

«یادداشت تحقیقاتی»

شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی توسط پلاستیسین برای تولید قطعه گردوبی پلوس با استفاده از فرایند فورج دقیق

یوسف پارسه^۱، محمد حسین صادقی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندس مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳

sadeghim@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: بهمن ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۷)

چکیده- از مفاصل انتقال قدرت سرعت ثابت، به طور وسیعی در صنعت خودرو استفاده می‌شود. قطعه گردوبی یکی از قطعات مفصل انتقال قدرت است. تولید این قطعه به روش‌های سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه تولید بالایی است. هدف اصلی این مقاله، بررسی جریان مواد در فرایند فورج دقیق قطعه گردوبی و بهینه‌سازی فرایند با استفاده از روش‌های جدید قالب‌سازی است. برای تعیین و بهبود شرایط فرایند، شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Super Forge و آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی انجام شده است. برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی و بررسی جریان مواد در مدل‌سازی فیزیکی، از پلاستیسین استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، انطباق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

کلیدواژگان: فورج دقیق، گردوبی پلوس، مدل‌سازی فیزیکی، پلاستیسین.

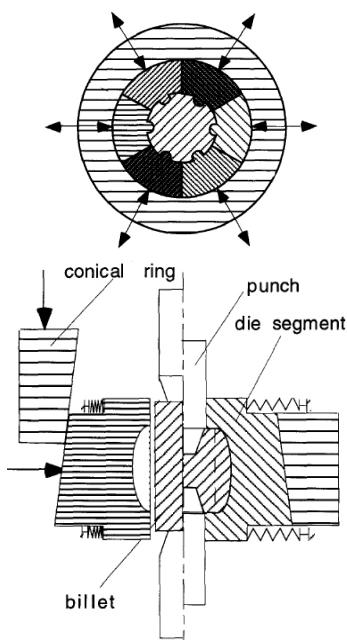
بهتر و کاستن از عملیات ماشینکاری است که این باعث

دستیابی به روش فورج دقیق^۱ شده است [۱]. تعداد زیادی از قطعات، طرح هندسی نامتقارن و بسیار پیچیده‌ای دارند. روش‌های فورج سنتی همیشه قابلیت تولید قطعات پیچیده را ندارند؛ بنابراین چنین قطعاتی توسط فرایندهایی که نیاز به عملیات ماشینکاری زیادی دارند، تولید می‌شوند که این هزینه تولید را بالا می‌برد.

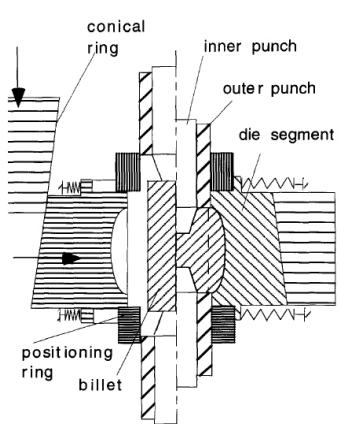
۱- مقدمه

فورجینگ یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای شکلدهی فلزها محسوب می‌شود. فرایند شکلدهی فلز تحت فشار یا ضربه به منظور تولید قطعه‌ای با شکل هندسی و خواص مطلوب را فورجینگ می‌نامند. در روش‌های جدید فورجینگ، تلاش برای دستیابی به قطعه مطلوب همراه با صرفه‌جویی در مواد، هزینه‌های اورسیدن به خواص مکانیکی و متالورژیکی

چند تکه استفاده شده که در آن بعد از فرایند شکلدهی، تکه‌های قالب از هم جدا شده و قطعه به راحتی از قالب خارج می‌شود [۴]. ساختار قالب‌های چند تکه ارائه شده توسط واکوئز و همکاران در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. قطعه تولید شده توسط واکوئز و همکاران از نظر شکل هندسی با قطعه مورد مطالعه در این مقاله تفاوت‌هایی دارد.

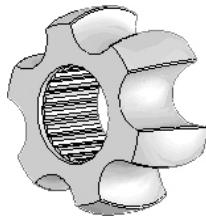


شکل ۲ مکانیزم پانچ ساده [۴]



شکل ۳ مکانیزم پانچ دو کاره [۴]

قطعه گردوبی پلوس یکی از قطعاتی است که تولید آن با مشکلات بسیاری رو به رو است (شکل ۱).



شکل ۱ نمای سه بعدی قطعه گردوبی

سطح شیارها در قطعه فوق باید بسیار صاف و صیقلی باشد (در حد ۴ تا ۸ میکرون زبری داشته باشد) و استحکام این قطعه نیز در برابر سایش و تنش‌های خستگی باید زیاد باشد، بنابراین فورج سرد دقیق یکی از بهترین گرینه‌هایی است که توسط آن می‌توان به سطوحی با کیفیت بالاتر و استحکام بیشتر دست یافت [۲].

قطعه گردوبی به علت داشتن خروج از مرکزی در مرکز شیارها نسبت به مرکز قطعه، دارای شکل هندسی پیچیده‌ای بوده و این خروج از مرکزی باعث به وجود آمدن شیب منفی در قطعه می‌شود، در نتیجه خروج چنین قطعه‌ای از قالب فورج با استفاده از روش‌های معمول امکان‌پذیر نیست.

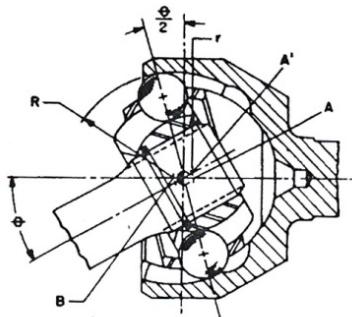
در سال ۱۹۹۲ کینچی و اووندرا، قطعه گردوبی را تا حدودی نزدیک به حالت نهایی^۱ در طی چند مرحله با استفاده از فرایند فورج سرد تولید کردند. قطعه نهایی فورج شده، به عملیات ماشینکاری نسبتاً زیادی نیاز داشت [۳].

در سال ۱۹۹۶ واکوئز و همکاران به علت مشکل خروج قطعه فرم یافته از قالب، طرحی را ارائه کردند که می‌تواند قطعه فوق را توسط فرایند فورج سرد دقیق به صورت نزدیک به حالت نهایی تولید کند. در این طرح از قالب‌های

1. Near Net Shape

تحمل نمایند. مفاصل سرعت ثابت شامل محفظه داخلی (گردوبی)، محفظه خارجی، شش ساقمه و یک قفسه بین محفظه داخلی و خارجی است. موقعیت ساقمه‌ها به مقدار زاویه انحراف پلوس بستگی دارد و در حالت کلی در طول مسیر شیارها متغیر است [۲].

در شکل ۴ نمایی از پلوس با زاویه انحراف θ ، نشان داده شده است.



شکل ۴ نمایی از پلوس شبیا با زاویه انحراف θ [۲]

محفظه داخلی یا گردوبی، قطعه‌ای حلقوی با تقارن محوری است که شیارهایی بر روی سطح خارجی آن تعییه شده. شکل این محفوظه شبیه به مقطعی از کره است. شیارهای واقع در سطح خارجی قطعه نیز محدب و به شکل هزار خار مادگی برای کوپل شدن به محور ایجاد شده است. این قطعه معمولاً توسط یک یا چند خار حلقوی بر روی هزار خار محور محکم می‌شود. وظیفه گردوبی، انتقال گشتاور از شفت به ساقمه‌ها است [۲]. در شکل ۵ نمای دو بعدی قطعه گردوبی در حالت بدون هزارخار داخلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، C1 مرکز سطح خارجی قطعه یا مرکز مفصل و C2 مرکز دایره شیار قطعه است که به

قالب‌های چندتکه به دو گونه پانچ ساده و پانچ دو کاره تقسیم می‌شود. تفاوت این دو در آن است که در پانچ دوکاره هر یک از سنبه‌های بالایی و پایینی به دو سنبه داخلی و خارجی تقسیم می‌شود. این طرح باعث می‌شود که پرسدن قالب و کنترل حجم بیلت اولیه راحت‌تر انجام شود. برای تولید قطعه توسط قالب‌های چندتکه، به پرس‌های چندکاره برای شکل دادن قطعه و باز و بسته کردن تکه‌های قالب نیاز است. بنابراین تولید قطعه گردوبی توسط روش‌های فوق، با امکانات و تجهیزات بسیار گران‌قیمت انجام می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد قالب‌های چندتکه به [۴] مراجعه شود.

در این مقاله روشی ارائه شده که با آن می‌توان قطعه گردوبی را با امکانات و تجهیزات کمتر و ساده‌تری تولید کرد. تولید قطعه فوق توسط این روش، با تغییر بسیار جزیی در هندسه قطعه صورت می‌گیرد که این باعث می‌شود قطعه به راحتی از قالب خارج شود. این تغییر در هندسه قطعه، توسط عملیات ساده ماشین‌کاری حذف می‌شود. این روش بسیار مفروض به صرفه بوده و برای تولید انبوه قطعه روش مناسبی است.

۲- مفصل انتقال قدرت و معرفی قطعه گردوبی مورد مطالعه

مفاصل انتقال قدرت به عنوان واسطه‌ای برای انتقال گشتاور یا حرکت دورانی از محوری به محور دیگر به کار می‌روند. یکی از انواع مفاصل انتقال قدرت، مفصل سرعت ثابت^۱ یا پلوس است که در آن سرعت زاویه‌ای محورهای ورودی و خروجی برابر است. این مفاصل قابلیت انتقال قدرت را با سرعت ثابت در یک زاویه نسبتاً بزرگ دارند و نیز می‌توانند گشتاورهای پیچشی و بارهای بزرگ محوری را

1. Constant Velocity Joint

- سنگزنه بر روی سطح شیارهای قطعه، به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب سطح.

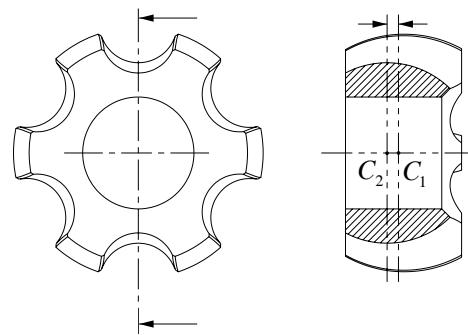
۴- مشکلات تولید قطعه گردوبی

- خروج از مرکزی هندسه قطعه گردوبی باعث می‌شود که خروج قطعه شکل یافته از قالب با روش‌های معمول غیر ممکن باشد.
- دستیابی به کیفیت سطح مطلوب در سطوح شیارها (در حدود ۸-۴ میکرون) بسیار مشکل است.
- قطعه گردوبی تحت بارهای سایشی و تنش‌های سیکلی زیادی قرار دارد. بنابراین قطعه ساخته شده باید از نظر استحکام و خصوصیات مکانیکی، در سطح مطلوب و مورد قبول باشد.
- در فرایند فورج سرد قطعه گردوبی، به دلیل افزایش کارسختی، معضل عدم تغییر شکل پذیری و پرنشدن گوشها و لبه‌های قالب وجود دارد.

۵- روش طراحی قالب، برای فرایند فورج سرد قطعه گردوبی

تولید قطعه گردوبی با استفاده از روش‌های پیشین به امکانات و تجهیزات بسیار زیاد و گران‌قیمتی نیاز دارد و هزینه اولیه تولید این قطعه توسط این روشها بالا است. در این مقاله روشی ارائه شده که در آن تولید قطعه با امکانات و تجهیزات بسیار ساده‌تر و با هزینه کمتر صورت می‌گیرد. همان‌طور که در معرفی قطعه گردوبی اشاره شد، خروج از مرکزی هندسه قطعه گردوبی باعث می‌شود که در صورت انتخاب خط جدایش قالب در هر قسمتی از قطعه، دهانه قالب تنگ‌تر از قسمت‌های دیگر آن شود؛ باعث به وجود آمدن شب منفی در قطعه شده و خروج قطعه را از

فاصله ۳/۹ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند و این اختلاف فاصله باعث به وجود آمدن خروج از مرکزی نسبت به مرکز مفصل می‌شود. در این صورت قطر بیشینه سطح خارجی و قطر ماکریم شیار قطعه بر روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند.



شکل ۵ نمای برش خورده قطعه گردوبی

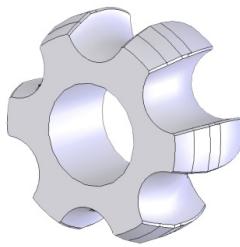
لازم است ذکر شود که سطوح شیارهای قطعه به علت تحمل بیشترین تنش‌های سایشی و سیکلی، بحرانی ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردوبی، است [۲].

۳- ساخت قطعه گردوبی پلوس

مراحل معمول ساخت قطعه گردوبی پلوس به صورت زیر است [۵]:

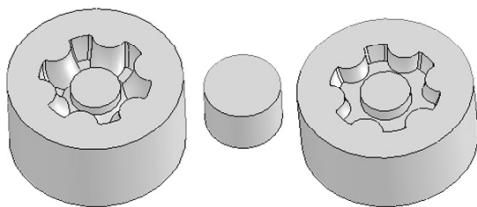
- برطرف کردن پوسته‌های سطح میله بیلت برای کنترل دقیق حجم.
- بریدن بیلت از یک میله طولانی سرد.
- فرایند فورج سرد.
- سوراخکاری مرکز قطعه و ایجاد هزارخوار و ماشین‌کاری سطوح خارجی قطعه.
- عملیات حرارتی کربورایزینگ^۱

1. Carburizing



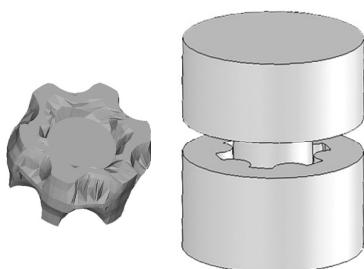
شکل ۷ نمای سه بعدی قطعه پس از تغییر هندسه

بنابراین می‌توان قالب فورج را به دو نیمه بالایی و پایینی تقسیم کرده و با انتخاب یک بیلت استوانه‌ای، فرایند فورج قطعه گردوبی را توسط نرم‌افزار Msc Super Forge شیوه‌سازی کرد. شکل ۸ نمای سه بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه را نشان می‌دهد.



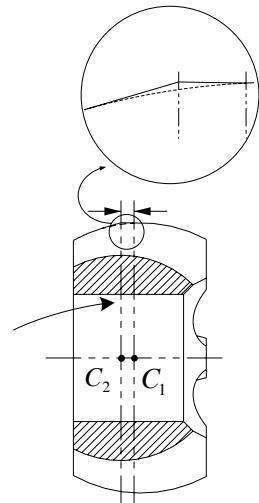
شکل ۸ نمای سه بعدی نیمه‌های قالب و بیلت اولیه

اما با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که قبل از پرسدن قالب، مواد از اطراف حفره‌ها بیرون زده و بنابراین قالب بسته نمی‌شود. همچنین باعث آسیب‌دیدگی سطوح قالب می‌شود.



شکل ۹ الف: نیمه‌های قالب و بیلت اولیه در حالت بسته
ب: قطعه شکل گرفته

قالب ناممکن می‌سازد. در نتیجه برای خروج قطعه از قالب، تغییری را در هندسه قطعه ایجاد کرده و به صورت زیر عمل می‌کنیم (شکل ۶):

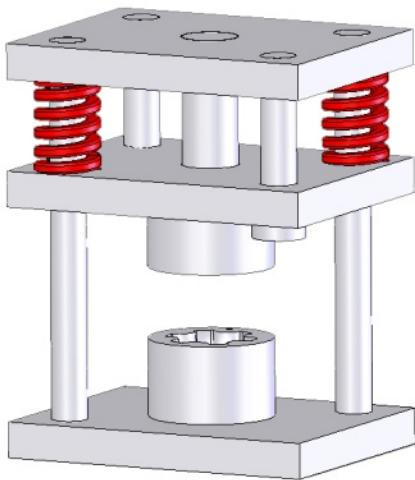


شکل ۶ نحوه تغییر شکل هندسی قطعه گردوبی

همان‌طور که اشاره شد، بحرانی‌ترین و حساس‌ترین قسمت قطعه گردوبی، سطوح شیارهای آن است. بنابراین طراحی قالب باید به نحوی صورت گیرد که شیارهای این قطعه حتی‌الامکان به شکل نهایی مورد نظر تولید شود. در نتیجه محل خط جدایش حفره‌های قالب، در روی مرکز مسیر شیارها و در روی بیشترین قطر شیار انتخاب می‌شود؛ در این صورت سطوح خارجی قطعه به علت خروج از مرکزی نسبت به مرکز شیارها دارای شیب منفی بوده و از قالب خارج نمی‌شود. برای این کار خطی را با شیب یک درجه از مرکز سطوح خارجی تا مرکز شیارها مماس کرده و بدین ترتیب هندسه قطعه تغییری جزئی می‌یابد و این باعث می‌شود که قطعه از قالب خارج شود. این تغییر هندسی در روی سطوح خارجی قطعه، پس از فرایند فورج، به راحتی در عملیات ساده ماشین‌کاری حذف می‌شود. شکل ۷ نمای سه بعدی قطعه گردوبی را پس از تغییر هندسه نشان می‌دهد.

حفره بالایی وارد شده و بیلت استوانه‌ای به اطراف جریان پیدا کرده و قالب پر می‌شود. در شکل ۱۲ نمای سه‌بعدی قالب طراحی شده برای آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، نشان داده شده است.

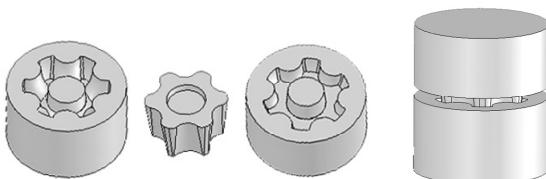
بنابراین نتیجه گرفته شد که برای راحت‌تر پرسدن قالب، قطعه پیش فرم لازم است. نزدیکترین قطعه پیش فرم به شکل نهایی قطعه گردوبی همراه با نیمه‌های قالب در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ساختار فنری طراحی شده برای مدل‌سازی فیزیکی

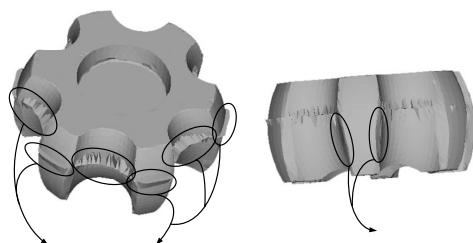
فرایند تولید قطعه در این ساختار با استفاده از پرس ساده صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیمه پایینی قالب به کفشک پایین و نیمه بالایی قالب به کفشک وسط پیچ شده؛ سنبه نیز به کفشک بالا متصل است. برای عملکرد قالب و شکلدهی قطعه داخل حفره کاملاً بسته، از دو فنر به طور موازی استفاده شده که دور میل راهنمای قرار دارد. عملکرد قالب و ساختار آن به صورت زیر است:

ابتدا نیمه‌های بالایی و پایینی قالب از هم باز و بیلت استوانه‌ای داخل حفره قالب قرار داده می‌شود؛ سپس کل مجموعه کفشک وسط و کفشک بالا که توسط دو میله به یکدیگر متصل شده‌اند، پایین می‌آید تا جایی که نیمه‌های بالایی و پایینی قالب بر روی هم قرار گرفته و کاملاً بسته شوند. با افزایش فشار پرس، فنرها به آرامی فشرده و سنبه به حفره قالب وارد شده و شکلدهی کامل می‌شود. پس از پرس



شکل ۱۰ قطعه پیش فرم همراه با نیمه‌های قالب

اما همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در این حالت نیز قبل از اینکه گوشه‌ها و لبه‌های قالب پر شوند، مواد از محل خط جدایش نیمه‌های قالب بیرون زده و باعث بسته نشدن قالب یا له شدن سطوح حفره‌ها می‌شود.

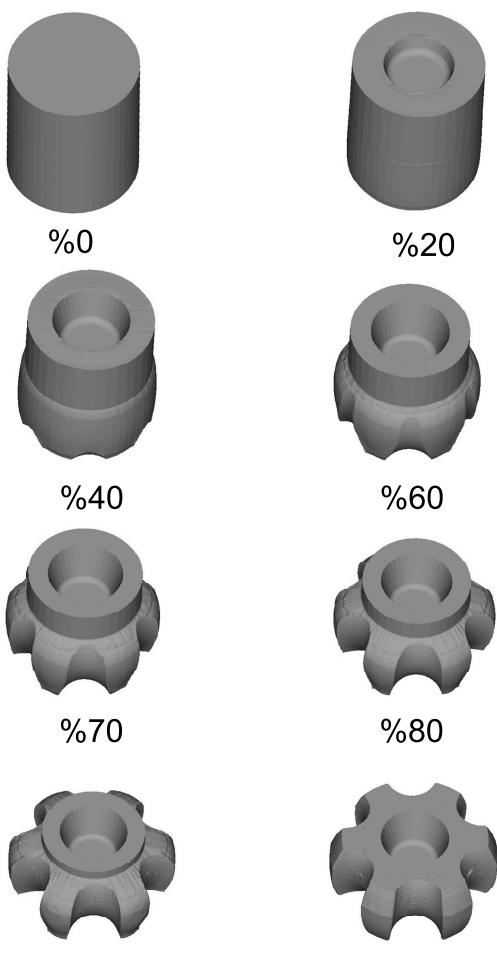


شکل ۱۱ قطعه شکل گرفته با استفاده از پیش فرم

در نهایت، تولید قطعه گردوبی توسط فرایند فورج دقیق، باید در یک حفره کاملاً بسته صورت گیرد تا هیچ‌گونه خروجی مواد و پلیسه از اطراف حفره نداشته باشد.

در این صورت، قالب فورج به دو نیمه بالا و پایین تقسیم می‌شود و بیلت استوانه‌ای بین دو نیمه قرار می‌گیرد. بنابراین زمانی که نیمه‌های بالایی و پایینی قالب بر روی هم قرار گرفته و کاملاً بسته می‌شوند، سنبه به

شکل ۱۳ نحوه شکل‌گیری قطعه را در کورس‌های مختلف جابه‌جایی سنبه، با درصدهای ذکر شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکلها مشاهده می‌شود، نحوه شکلدهی فرایند به صورت کوبیش انجام شده و جریان مواد داخل حفره قالب به صورت عرضی بوده و گوشه‌ها و لبه‌های قطعه در آخرین مرحله کامل شده و پر می‌شوند.



شکل ۱۳ نحوه شکل‌گیری قطعه در کورس‌های مختلف
جابه‌جایی سنبه

شکل ۱۴ نمای دو بعدی شکل‌گیری قطعه گردوبی را
نشان می‌دهد.

شدن قالب و رسیدن سنبه به پایان حرکت خود، فشار از روی قالب برداشته می‌شود. در این صورت فنرها باز شده و سنبه از داخل حفره قالب خارج می‌شود. سپس با بالاتر رفتن رم^۱ پرس، میله‌های رابط باعث می‌شوند که نیمه‌های قالب از هم باز شده و قطعه نهایی از قالب خارج شود. باید در نظر داشت که فشار بستن قالب از فشار داخل حفره قالب در انتهای فرایند شکلدهی بیشتر باشد؛ در غیر این صورت نیروی پر شدن قالب بر نیروی فنر غلبه کرده، نیمه‌های قالب از هم باز شده و مواد از اطراف آن خارج و باعث خرابی قالب می‌شود [۶].

۶- شبیه‌سازی عددی به روش FVM

در این مقاله، فرایند شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار super forge برای دو جنس مختلف انجام شده است:

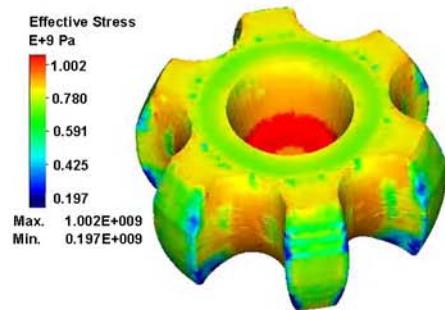
- جنس AISI ۱۰۵۰ که به عنوان جنس اصلی قطعه گردوبی انتخاب شده است.
 - جنس پلاستیسین که به عنوان جنس قطعه برای آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی انتخاب شده است.
- جدول ۱ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) را برای جنس AISI ۱۰۵۰ نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) را برای جنس AISI ۱۰۵۰ [۶]

جنس قطعه کار	AISI ۱۰۵۰
جنس قالب	AISI M2
ضریب اصطکاک	۰/۱
سرعت رم پرس	۱۰۰ mm/s
دماهای فرایند	۲۰ °C
رابطه تنش-کرنش	$\bar{\sigma} = 971 \bar{\varepsilon}^{0.16}$

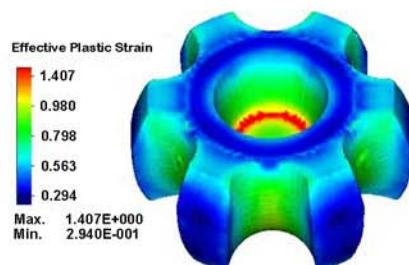
1. Ram
2. Finite Volume Method

فشار قالب را تحمل کرده و دارای بیشترین کرنش است؛ در نتیجه تنش مؤثر در سطوح شیارها، نسبت به سایر نقاط قطعه، افزایش بیشتری یافته و بحرانی‌تر است.



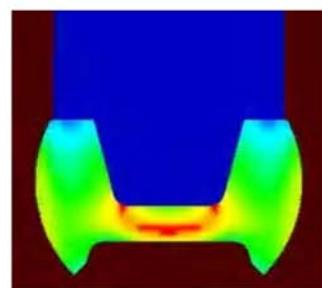
شکل ۱۶ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی

شکل ۱۷ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر را در پایان فرایند نشان می‌دهد. در این شکل نیز با صرف‌نظر از راهگاه قطعه، سطوح شیارها به علت کشیدگی مواد بر روی سطوح قالب و افزایش فشار قالب، تحت تأثیر بیشترین کرنش مؤثر قرار دارند.



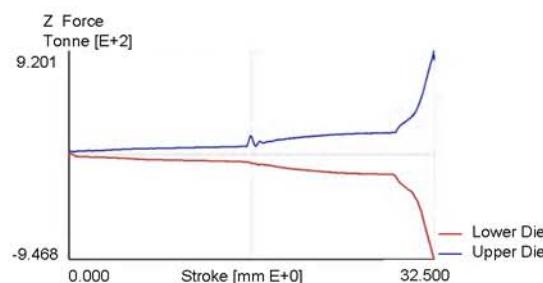
شکل ۱۷ توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در پایان فریند

شکل ۱۸ توزیع دمای قطعه گردوبی را در پایان فرایند شکلدهی نشان می‌دهد. افزایش دمای قطعه کار، با پارامترهای تنش و کرنش مؤثر نسبت مستقیم دارد. بنابراین شیارهای قطعه گردوبی به علت متحمل شدن بیشترین تنش و کرنش مؤثر، بیشترین افزایش دما را دارند.



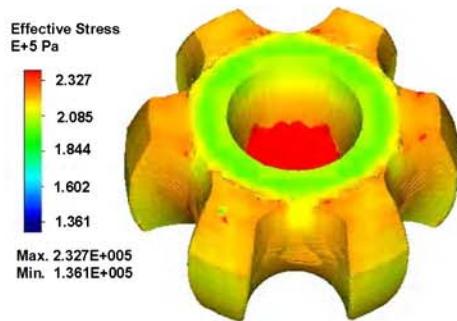
شکل ۱۴ نمای دو بعدی شکل گیری قطعه گردوبی

شکل ۱۵ نمودار تغییرات نیرو بر حسب طول کورس تعیین شده را نشان می‌دهد که منحنی بالا مربوط به سنبه و منحنی پایین مربوط به حفره قالب است. بنابراین مطابق شکل، نیروی شکلدهی در انتهای فرایند در حدود ۹۲۰ تن به دست آمده است.

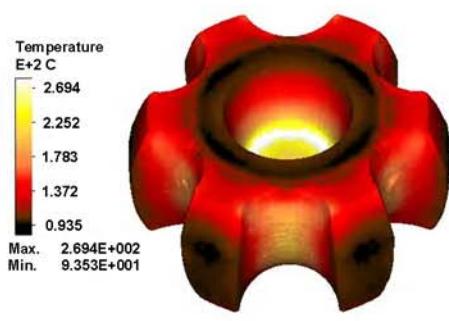


شکل ۱۵ نحوه شکل گیری قطعه در کورس‌های مختلف جایه‌جایی سنبه

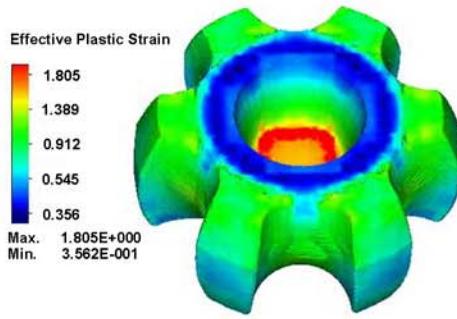
شکل ۱۶ توزیع تنش مؤثر در انتهای فرایند شکلدهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با صرف‌نظر کردن از راهگاه قطعه، که بحرانی‌ترین قسمت قطعه در فرایند شکلدهی است - سطوح شیارهای قطعه گردوبی در مقایسه با دیگر سطوح قطعه، تحت تنش بیشتری قرار گرفته است. علت آن است که مواد داخل حفره قالب پس از رسیدن به سطوح شیارها، بیشترین



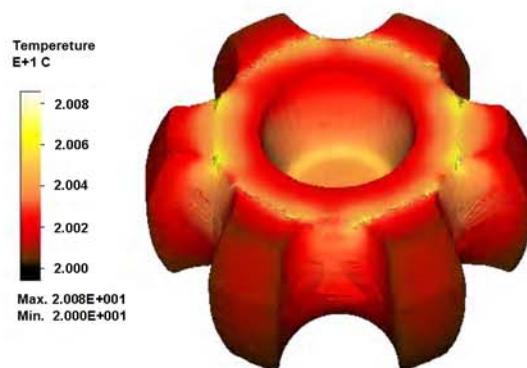
شکل ۲۰ توزیع تنش مؤثر در پایان فرایند شکلدهی برای پلاستیسین



شکل ۱۸ توزیع دمای قطعه گردوبی در پایان فرایند شکلدهی



شکل ۲۱ توزیع کرنش پلاستیکی مؤثر در پایان مرحله برای پلاستیسین



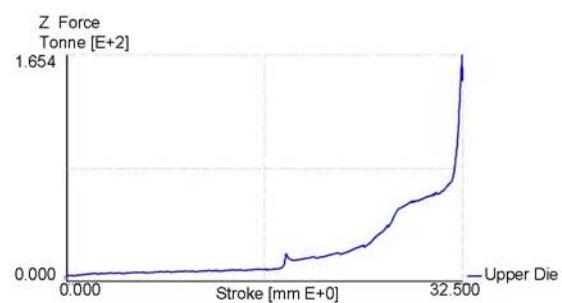
شکل ۲۲ توزیع دمای قطعه گردوبی، در پایان فرایند شکلدهی برای ماده پلاستیسین

جدول ۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) را برای جنس پلاستیسین نشان می‌دهد.

در شکلهای ۱۹ تا ۲۲ به ترتیب نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی، توزیع تنش مؤثر، توزیع کرنش پلاستیک مؤثر و توزیع دما برای جنس پلاستیسین نشان داده شده است.

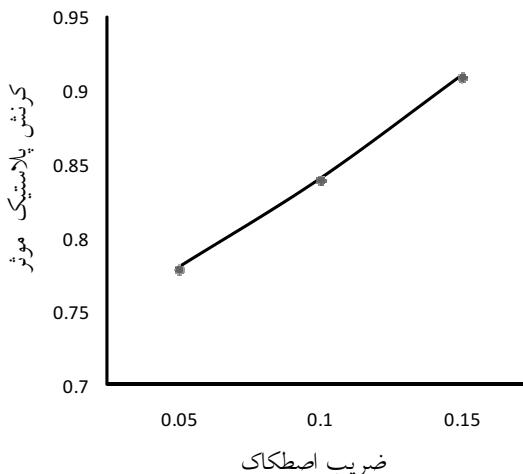
جدول ۲ شرایط شبیه‌سازی سه‌بعدی (FVM) برای جنس پلاستیسین [۷ و ۸]

پلاستیسین	جنس قطعه کار
AISI M2	جنس قالب
۰/۱	ضریب اصطکاک
۱۰۰ mm/s	سرعت رم پرس
۲۰ °C	دماه فرآیند
$\bar{\sigma} = 0.208\bar{\varepsilon}^{0.133}$	رابطه تنش-کرنش



شکل ۱۹ نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی برای پلاستیسین

محدوده ضریب اصطکاک (m) تحت رونکارهای مختلف برای فرایند فورج سرد بین $۰/۰۵$ تا $۰/۱۵$ انتخاب شده است [۱]. بنابراین برای سه مقدار مختلف ضریب



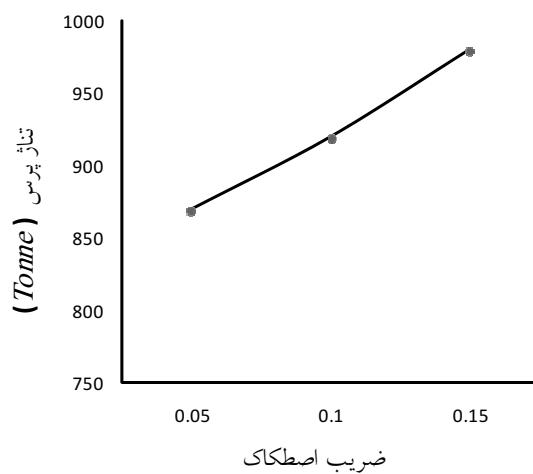
شکل ۲۵ تغییرات کرنش پلاستیک موثر بر حسب ضریب اصطکاک

اصطکاک، تغییرات نیروی شکلدهی بر طبق شکل ۲۳ برای تولید قطعه گردوبی با جنس AISI 1050 بررسی شده است. همان‌طور که انتظار داشتیم، با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی شکلدهی افزایش می‌یابد. در شکل ۲۴ و ۲۵ تأثیر ضریب اصطکاک بر تنش و کرنش پلاستیک مؤثر نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، جریان مواد بر روی سطوح قالب، دشوارتر می‌شود. در نتیجه تنش و کرنش پلاستیک مؤثر افزایش می‌یابد.

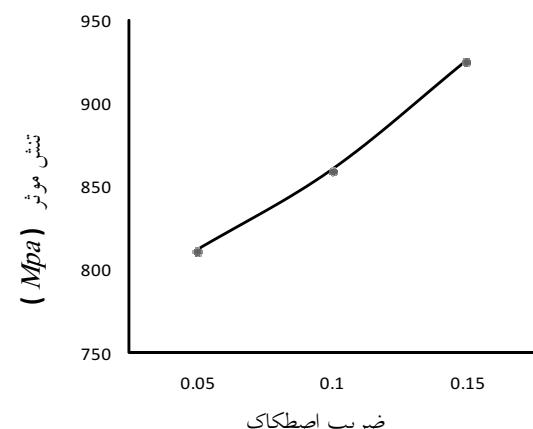
۷- آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی

از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی برای مطالعه و پیش‌بینی جریان مواد داخل حفره قالب و نحوه پرشدن آن و همچنین بررسی شکل صحیح هندسه قطعه مورد نظر قبل از ساخت قالب اصلی استفاده می‌شود. برای این منظور، قالب مربوط با استفاده از جنس معمولی ساخته شده و برای آزمایش قالب، از موادی نرم مانند پلاستیسین، سربو موم و ... استفاده می‌شود.

در این مقاله، برای آزمایش قالب از جنس پلاستیسین استفاده شده. که در ابتدا به صورت خمیر بوده و پس از گذشت زمان سخت می‌شود. برای انجام آزمایش، ابتدا بیلت استوانه‌ای با ابعاد مشخص از جنس پلاستیسین ساخته و داخل حفره قالب قرار داده می‌شود. سپس با حرکت رم پرس و وارد شدن سنبه به داخل حفره قالب، جنس مربوط شکل می‌یابد. برای انجام این آزمایش، از پرس هیدرولیک ساده برای تغییر شکل استفاده شده است. لازم است ذکر شود که برای دستیابی به جریان صحیح مواد به داخل حفره قالب و همچنین نزدیک بودن آن به



شکل ۲۳ تغییرات تناثر پرس بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲۴ تغییرات تنش موثر بر حسب ضریب اصطکاک



شکل ۲۷ قطعه نهایی داخل حفره قالب پس از تغییر شکل زیر

پرس هیدروليک



شکل ۲۸ نحوه شکل گیری قطعه گردوبی در کورس‌های

مختلف جابه‌جایی سنبله

-۸ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی برای جنس پلاستیسین

در شکل‌های ۲۹ تا ۳۱ قطعات تولید شده توسط مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی به ترتیب در

فرایند فلز اصلی، انتخاب شرایط اصطکاک بین قطعه کار و قالب، باید بسیار نزدیک به فرایند واقعی صورت گیرد. بنابراین انتخاب روانکار مناسب، برای آزمایش مدل‌سازی فیزیکی، برای دستیابی به جریان صحیح مواد، بسیار بحرانی و مهم است. روانکارهای مورد استفاده در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی توسط پلاستیسین به صورت زیر است [۴] و [۸]:

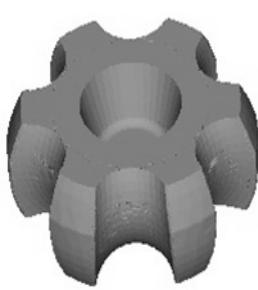
مخلوط گلیسیرین و آب صابون، واژلين، گریس و... در این آزمایش - با توجه به پیچیدگی شکل هندسی قطعه و مکانیزم قالب، روانکار گریس بهتر جواب داده است. شکل‌های ۲۶ تا ۲۸ قالب مربوط به انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی را همراه با قطعات تولید شده نشان می‌دهد.



شکل ۲۶ بیلت اولیه داخل قالب قبل از تغییر شکل زیر

پرس هیدروليک

در مجموع همانطور که انتظار داشتیم در ۱۰۰٪ کورس جابه‌جایی در شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی، شکل نهایی پره‌ها و شیارها، کامل شده و تمامی گوش‌ها و لبه‌های قطعه به طور کامل پر شده‌اند.



شکل ۳۱ قطعه تولید شده در ۱۰۰٪ کورس جابه‌جایی توسط
الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

در جدول ۳ مقایسه نیروی شکلدهی به‌دست آمده در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

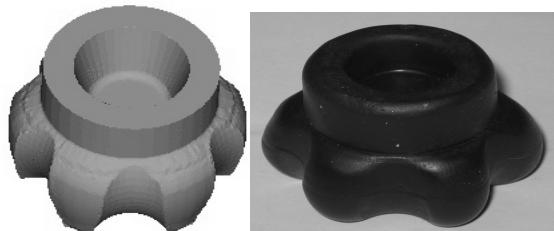
پرس هیدرولیک مورد استفاده در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی، مجهز به نیروسنجد بوده و نیروی مورد نیاز برای شکلدهی، توسط آن اندازه‌گیری شده است. نیروی به‌دست آمده توسط شبیه‌سازی عددی نیز بر طبق نمودار شکل ۱۹ مشخص شده است.

جدول ۳ مقایسه نیروی شکلدهی برای جنس پلاستیسین توسط مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی

۱/۸ (Ton)	نیروی به‌دست آمده در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی به جز نیروی فشردن فنر
۱/۶۵۴ (Ton)	نیروی به‌دست آمده در شبیه‌سازی عددی

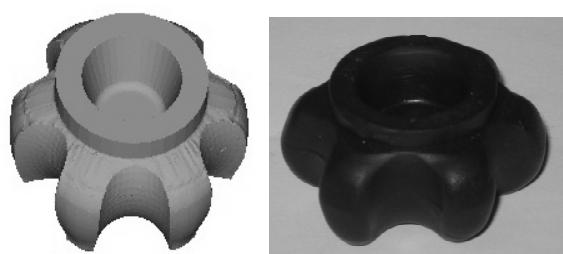
کورس‌های جابه‌جایی ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نشان داده شده است.

در ۶۵٪ کورس جابه‌جایی بر طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، پره‌ها و شیارها تا حدودی شکل گرفته و در قسمت بالای پره‌ها، لبه‌های قطعه دارای شعاع انحنای زیادی است. در مدل‌سازی فیزیکی نیز همان‌طور که انتظار داشتیم، نحوه شکل گیری پره‌ها و شیارها و همچنین شعاع انحنای لبه‌های قطعه، مشابه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی است.



شکل ۲۹ قطعه تولید شده در ۶۵٪ کورس جابه‌جایی توسط
الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی مدل در ۸۵٪ کورس جابه‌جایی نشان می‌دهد که پره‌ها و شیارها تا حد زیادی شکل گرفته و شعاع انحنای لبه‌های بالای قطعه نیز نسبت به کورس ۶۵٪ کمتر شده اما هنوز به مقدار نهایی خود نرسیده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی نیز بیانگر این موضوع است.



شکل ۳۰ قطعه تولید شده در ۸۵٪ کورس جابه‌جایی توسط
الف) مدل‌سازی فیزیکی ب) شبیه‌سازی عددی

- با تغییر در هندسه قطعه گردویی می‌توان از ساختار فنری و پرس ساده به جای ساختار قالب چند تکه و پرس چند کاره استفاده کرد که این باعث کاهش چشمگیری در هزینه تولید قطعه می‌شود.

$$\frac{1.8 - 1.654}{1.654} \times 100 = 8.8\%$$

با توجه به درصد خطای به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مقایسه نیروی شکلدهی به دست آمده در مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

۱۰- مراجع

- [1] ASM Handbook; "Forming And Forging", 10th edition, vol.14, 1992
- [2] رحمانیان مجید، «تجزیه و تحلیل و تدوین دانش فنی طراحی مفصل انتقال قدرت شپا»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۰
- [3] Onodera Sh., Sawai K.; "Current cold-forging techniques for the manufacture of complex precision near-net shapes", J. Materials processing Tech, Vol.35, 1992, pp385-396
- [4] Vazquez V., Sweeney K.; Wallace D., Wolff Ch., Ober M., Altan T.; "Tooling and process design to cold forging a cross groove inner race for a constant velocity joint-physical modeling and FEM process simulation", J. Materials processing Tech, Vol.59, 1996, pp144-157
- [5] Vazquez V., Altan T.; "New concepts in die design-physical and computer modeling applications", J. Materials processing Tech, Vol.98, 2000, pp 212-223

همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شد، توزیع دما در نقاط مختلف قطعه در شبیه‌سازی عددی تقریباً یکنواخت بوده و دمای قطعه نهایی تغییر چندانی نداشته است. در آزمایش مدل‌سازی فیزیکی نیز در انتهای فرایند شکلدهی، تغییری در دمای قطعه نهایی مشاهده نشد؛ بنابراین از نظر توزیع دما، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی، مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

۹- نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایش مدل‌سازی فیزیکی تطابق خوبی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طراحی ابزار برای این فرایند و همچنین جریان مواد داخل حفره قالب به طور صحیحی انجام شده است.
- تولید قطعه گردویی در فرایند فورج دقیق با استفاده از قالب دو نیمه قابل تولید است که استفاده از این روش راندمان تولید را بسیار بالا می‌برد. لذا در بازار رقابتی امروز بسیار باصرفه‌تر بوده و توجیه‌پذیر است.
- عملکرد خوب قالب در شکلدهی قطعات نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های CAD/CAM در طراحی قالب بسیار مفید بوده و از بروز بسیاری از خطاهای جلوگیری می‌کند.

-
- [8] Sofuođlu H., Rasty J.; "Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes", *Tribology International*, Vol.33, 2000, pp523-529
- [6] Doege E., Bohnasack R.; "Closed die technologies for hot forging", *J. Materials processing Tech*, Vol.98, 2000, pp165-170
- [7] Sofuođlu H., Rasty J.; "On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test", *Tribology International*, Vol.32, 1999, pp327-335