

# طراحی پارامتری، طراحی و ساخت قالبهای فورج دقیق چرخنده هرزگرد پژو ۴۰۵ با استفاده از CAD/CAM

محمدحسین صادقی<sup>۱\*</sup>، علی خسروی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\*صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳، تهران، ایران

sadeghi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

**چکیده**- فناوری طراحی پارامتری، در پاسخ به نیاز مهندسان طراح و با اطلاع از فرایند تکراری حاکم بر عملیات طراحی و مهندسی محصولات و آزمایش، خطاهای احتمالی و اصلاحات مکرر محصول تا رسیدن به مرحله تولید انبوه به وجود آمده است. برای قطعات یک خانواده و قطعاتی با هندسه یکسان اما با ابعاد مختلف، مانند فنرها، پیچها، بلبرینگها، مهرهها و چرخندهها استفاده از طراحی پارامتری با CAD/CAM بسیار مفید است و طراح می‌تواند با طراحی پارامتری، تمامی قطعات هم‌خانواده را با واردکردن پارامترهای لازم ایجاد کند. به دلیل وجود کاتوره‌های پیچیده و دقت بالایی که دندان‌های چرخنده نیاز دارند، ساخت این قطعه بسیار تخصصی بوده و با روشهای ماشینکاری سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار است. طراحی و تولید این چرخندهها با استفاده از فرایند فورج دقیق، در مقایسه با روشهای سنتی، باعث صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در مواد خام اولیه، زمان تولید و نیز بهبود خواص مکانیکی می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌ای از چرخنده هرزگرد ساده، به صورت پارامتری طراحی و قالبهای فورج دقیق آن با روش CAD/CAM، طراحی، تحلیل و ساخته شده است.

**کلید واژگان:** CAD/CAM، طراحی پارامتری، فورج دقیق، چرخنده هرزگرد.

## ۱- مقدمه

CAD/CAM، باعث افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری فرایند می‌شود. در این پروژه، پارامترها و ویژگیهای مختلف فرایند طراحی پارامتری چرخندههای هرزگرد ساده جعبه‌دنده با استفاده از CAD/CAM، مورد بحث قرار گرفته و روشی برای

طراحی و ساخت چرخندههای هرزگرد ساده جعبه‌دنده به روش سنتی، توأم با سعی و خطای فراوان بوده و مستلزم زمان و هزینه زیادی است. به‌کارگیری فناوریهای جدیدی مانند

طراحی پارامتری آنها ارائه شده است. با استفاده از این روش، طراحی قطعات هم‌خانواده صنعتی را در کمترین زمان می‌توان انجام داد و علاوه بر آن با وارد کردن پارامترهای قطعه جدید، به نمونه موردنظر دست پیدا کرد. به دلیل کانتورهای پیچیده و نیاز به دقت بالا در دندان‌های چرخنده، ساخت این قطعه بسیار تخصصی بوده و با روشهای ماشینکاری سنتی، مستلزم صرف زمان و هزینه بسیاری است.

میزان دورریز مواد نیز یکی از دیگر مشکلات این فرایندها است. در سالهای اخیر، توجه زیادی به تولید چرخنده‌ها با استفاده از روش فورج دقیق شده و این فرایند به تولید دندان‌هایی با تolerانس‌های نهایی منجر می‌شود که در مقایسه با روشهای سنتی ماشینکاری، موجب صرفه‌جویی در مواد خام اولیه، زمان تولید و نیز خواص مکانیکی بهبود یافته دندان‌ها می‌شود.

در مقابل، فورج دقیق چرخنده‌ها با مشکلاتی در رابطه با طراحی قالب، هندسه و حجم پیش‌فرم، دقت ابعادی دندان، ارزیابی نیرو و انرژی لازم، مشکلات بیرون‌اندازی قطعه و نیز عمر کارکرد قالب، همراه است.

## ۲- مرور کارهای انجام شده در زمینه فورج دقیق چرخنده

هدف از فورج دقیق، تولید قطعاتی با کیفیت بالای سطوح کاری است. یعنی سطوح به‌صورت نهایی یا نزدیک به نهایی به‌دست می‌آیند و نیاز به عملیات ماشینکاری به حداقل می‌رسد. از طرف دیگر به فورجینگ دقیق، فورج با قالب بسته نیز می‌گویند؛ یعنی در فورج دقیق، پلیسه‌ای وجود نداشته یا حداقل است.

دین<sup>۱</sup> در مطالعاتی که بر روی دو قطعه مدور انجام داد، نشان داد که با حذف پلیسه، نه تنها از اتلاف مواد جلوگیری

می‌شود بلکه باعث افزایش عمر قالب (بیشترین سایش در گلوگاه پلیسه اتفاق می‌افتد)، بالاتر بردن دقت ابعادی و تolerانس‌های محصول، حذف عملیات پلیسه‌زدایی و به حداقل رساندن عملیات ماشینکاری می‌شود. پس از جنگ جهانی دوم، فورج دقیق چرخنده‌ها در آلمان غربی پایه‌گذاری و به دنبال آن در این کشور از روش‌های طراحی کامپیوتری برای طراحی قالبهای آهنگری دقیق استفاده و چرخنده‌هایی ساخته شدند. در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، آلتان<sup>۲</sup> طراحی را برای روش ساخت به‌کمک کامپیوتر در آهنگری عرضه کرد. از نظر وی در حالت ایدئال، سیستم طراحی به‌کمک کامپیوتر باید بتواند با استفاده از تشریح سه‌بُعدی قطعه ماشینکاری شده، قطعه آهنگری نهایی را به‌صورت سه‌بُعدی طراحی کند. لیکن به‌دلیل پیچیده بودن چنین کاری، فرایند طراحی، در عمل بر روی سطح دو‌بُعدی انتخاب شده انجام شده است.

وی در مقاله خود به اهمیت شبیه‌سازی کامپیوتری فرایند آهنگری در طراحی بهینه قالب اشاره می‌کند. در سال ۱۹۸۲، آلتان یک سیستم طراحی و ساخت به‌کمک کامپیوتر را برای فرایند آهنگری دقیق چرخنده‌ها ارائه کرد. دکتر صادقی در تحقیقات جدید خود، فرایند فورج چرخنده ساده را به‌صورت ریاضی مدلسازی کرد و نتایج حاصل از آن را در تأثیر پارامترهای مختلف هندسی چرخنده، با نتایج تجربی به‌دست آمده در آزمایشها، مقایسه و ارزیابی کرده است [۱].

## ۳- کاربرد CAD/CAM در فرایند ساخت قالبهای قطعات پیچیده

کاربرد CAD/CAM به طراح اجازه می‌دهد تا با به‌کارگیری توانایی کامپیوتر در محاسبات، زمان و هزینه را

1. Dean

2. Altan

مختلف ساخت و تولید کارخانه (به صورت ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم کامپیوتر با بخشهای مختلف تولید) که هدف نهایی آن افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در تولید است. امروز نرم‌افزارهای قدرتمندی مانند Mastercam و Edgcam در این زمینه به بازار عرضه شده که ساخت قطعات و قالبهای پیچیده را امکان‌پذیر می‌سازند. یکی از قطعات پر استفاده در خودروها، چرخنده‌های هرزگرد است. با توجه به تنوع خودروها و چرخنده‌های آنها، چرخنده‌های هرزگرد نیز با توجه به نوع خودرو، در ابعاد و اندازه‌های مختلفی باید تولید شوند که مستلزم طراحی جداگانه برای هر نمونه است. از آنجاکه این چرخنده‌ها از نظر شکل و قیافه، شبیه به یکدیگرند و فقط بعضی از جزئیات آنها تفاوت دارند، لذا می‌توان آنها را در یک خانواده قرار داد. طراحی این چرخنده‌ها به روش سنتی، بسیار وقتگیر و مشکل‌ساز بوده و همزمان با پیشرفت CAD/CAM، طراحی دستی جای خود را به طراحی کامپیوتری داده است. از آنجاکه طراحی برای هر نمونه نیز به وقت نسبتاً زیادی نیاز داشت و در حین فرایند تولید نیز امکان تغییر در طرح وجود داشت، بحث طراحی پارامتری مطرح شد تا به کمک CAD/CAM، تغییرات طرح در کوتاهترین زمان صورت گیرد و به طراحی مجدد نیاز نباشد.

#### ۴-۱- طراحی پارامتری چرخنده هرزگرد ساده

برای قطعات یک خانواده و قطعات با هندسه یکسان اما با ابعاد مختلف، مانند فنرها، پیچ‌ها، بلبرینگها، مهره‌ها و چرخنده‌ها، روش طراحی پارامتری، بسیار مفید است. در این روش، طراح می‌تواند با طراحی یک نمونه از قطعات هم‌خانواده، و با وارد کردن پارامترهای جدید، به نمونه موردنظر دست پیدا کند. برای طراحی پارامتری می‌توان از

به حداقل رسانده و بدون متحمل شدن هزینه‌های بالای ساخت قالب و احتمال بروز مشکلات بعدی، قبل از اقدام به ساخت قالب، پیش‌بینیهای لازم انجام شود. کارهایی که در زمینه طراحی قالب با روشهای CAD/CAM انجام می‌شود عبارتند از:

- طراحی مدل سه‌بعدی قطعه نهایی و پیش‌فرم‌ها، مدل دو نیمه قالب و مجموعه مونتاژی قالب.
- شبیه‌سازی سازوکار حرکت اجزای قالب.
- شبیه‌سازی و تحلیل فرایند شکل‌دهی قطعه در داخل قالب با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف فرایند، مانند ضریب اصطکاک، دما، جنس قالب و سرعت حرکت ابزار.
- دستیابی به نتایج مورد نیاز و ضروری از تحلیل فرایند در راستای اجرا و عملی کردن فرایند و مقایسه آنها با نتایج تجربی موجود.

#### ۴- طراحی پارامتری

CAD/CAM یکی از فناوریهای جدید و امروزی است که در بیشتر کارخانجات صنعتی و مؤسسات علمی و تحقیقاتی پیشرفته، از آن استفاده می‌شود. در حالت کلی، CAD به فرایندی گفته می‌شود که در آن از بسته‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کامپیوتر برای انجام عملیات طراحی استفاده می‌شود.

متداولترین ابزار CAD، نرم‌افزار AUTOCAD است، اما در سالهای اخیر نرم‌افزارهای قدرتمندی مانند SOLIDWORKS، برای مدلسازی کامپیوتری به بازار عرضه شده که عملیات مدلسازی، مونتاژپذیری و تولید نقشه‌های ساخت را به‌طور خودکار انجام داده و بهره‌وری فرایند طراحی و انعطاف‌پذیری فعالیتها را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهند. CAM عبارت است از کاربرد مؤثر نرم‌افزار و سخت‌افزار کامپیوتر در فعالیتهای

اطلاعات مورد نیاز برای طراحی و مدلسازی قطعه موردنظر را وارد کرده و در کوتاهترین زمان ممکن، قطعاتی را با ابعاد مختلف و هندسه یکسان طراحی و مدلسازی کند. روابط خاصی که در طراحی یک خانواده از قطعات، مورد نیاز است، در داخل برنامه به صورت پارامتری گنجانده شده و نرم افزار Solidworks فقط بر اساس روال برنامه طراحی شده، کار مدلسازی طرح فوق را مرحله به مرحله انجام می دهد.

در دو روش پیشین، قدرت انعطاف پذیری طراحی پارامتری بسیار کمتر بوده و فقط مدل‌های ساده‌ای از قطعات با پروفیل‌های ساده را می توان طراحی و مدلسازی پارامتری کرد.

در طراحی پارامتری چرخنده هرزگرد موضوع این مقاله که ابعاد متعددی برای ارتباطدهی با یکدیگر داشته و نیز از پروفیل دندانان اینولوت برخوردار است، از روش سوم استفاده شده است. برای این کار، در ابتدا پارامترهای مختلف چرخنده که در طراحی آن مورد نیاز است، بر اساس نقشه قطعه کار و مشخصات درج شده در نقشه، تنظیم و گردآوری شده است. برای طراحی پروفیل اینولوت دندانان، بر طبق استاندارد طراحی چرخنده، از روابط موجود استفاده و از ۲۰ نقطه قرارگرفته در روی پروفیل، برای ترسیم آن استفاده شده است. طراحی و مدلسازی پارامتری این نوع چرخنده، بر طبق پارامترهای مربوط به استاندارد فرانسه انجام شده؛ یعنی ابعادی از چرخنده به صورت پارامتری درآمده که در این استاندارد گنجانده شده است. از آنجاکه این نوع چرخنده از نوع ساده<sup>۱</sup> است، بعد از طراحی و مدلسازی چرخنده در نرم افزار Solidworks، می توان بخشهای اضافی این چرخنده هرزگرد را از نمودار درختی Solidworks حذف یا بخشهای دیگری را به آن اضافه کرد و بدین طریق، طراحی و مدلسازی پارامتری را برای هر نوع

نرم افزارهای مدلسازی مختلفی مانند Solidworks استفاده کرد که در آن امکان طراحی و مدلسازی قطعات به صورت پارامتری وجود دارد. از آنجاکه قطعه‌ای مانند چرخنده هرزگرد ساده، ابعاد مختلفی دارد که در ارتباط با یکدیگر بوده و این ارتباط خاص، هندسه قطعه و در نتیجه عملکرد درست آن را ایجاد می کند، باید بتوان با استفاده از نرم افزار، این قیود را بین ابعاد آن به صورت پارامتری و بر طبق اصول طراحی، برقرار ساخت. سپس فقط با وارد کردن و تغییر در ابعاد خاصی که طراحی بر اساس آنها انجام شده، به خانواده‌ای از قطعات با توپولوژی یکسان و ابعاد مختلف دست پیدا کرد. در نرم افزار Solidworks، این کار به چند روش قابل انجام است که عبارتند از:

- ۱- استفاده از بخش Table در Toolbar نرم افزار: در این حالت می توان با ایجاد جدولی مرتبط با هندسه قطعه کار به صورت جدول Excel، برای ابعاد مختلف نامگذاری کرده و آنها را به صورت دلخواه تغییر داد.
- ۲- استفاده از بخش Equations در Toolbar نرم افزار: در این حالت فقط می توان بین ابعاد مختلف قطعه کار که با نامهای مختلفی مشخص شده، رابطه ریاضی مشخصی را برقرار ساخت که این رابطه فقط می تواند رابطه‌ای ساده باشد. به این طریق و به صورت بسیار ساده، طراحی پارامتری برای قطعه ساده انجام می شود که با تغییر بعضی از ابعاد کلیدی پارامتری شده، بقیه ابعاد بر اساس آنها تغییر کرده و لذا مدل تغییر خواهد کرد.
- ۳- نوشتن برنامه‌ای در نرم افزار Visual Basic و ارتباط دادن آن به نرم افزار Solidworks:

این روش که نسبت به روشهای دیگر بسیار قدرتمندتر و دقیقتر است، این امکان را به کاربر می دهد که بتواند به راحتی در یک پنجره طراحی شده از طریق نرم افزار فوق، کلیه

1. Spur

## ۵- فرایند فورج دقیق چرخنده

اصطلاح<sup>۱</sup> یا فورج دقیق، فرایند را به صورت دقیق مشخص نمی کند اما می توان آن را حالت پیشرفته فورجینگ معمولی در نظر گرفت.

در این فرایند هدف تولید قطعه با شکل نهایی<sup>۲</sup> یا نزدیک به شکل نهایی<sup>۳</sup> در شرایط فورجینگ است. شکل نهایی یعنی این که بعد از فرایند فورج، عملیات ماشینکاری یا پرداخت روی سطوح لازم نیست؛ اما در نزدیک به شکل نهایی ممکن است برای ایجاد سوراخ، پرداخت سطوح یا ایجاد جزئیات دیگر، عملیات تکمیلی بعد از فرایند فورج نیاز باشد؛ یعنی تعدادی از سطوح در عملیات فورج در شکل نهایی نبوده و باید ماشینکاری شوند. فورج دقیق در بعضی موارد، فورج با تلرانس بسته نیز نامیده می شود.

## ۵-۱- مزایا و معایب فرایند فورج دقیق

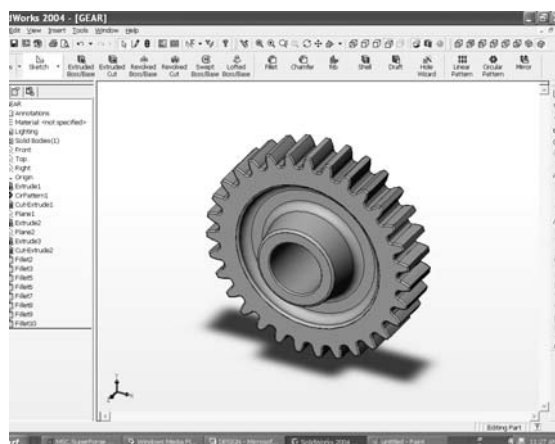
### الف) مزایا

- افزایش میزان تولید، کاهش هزینه تولید از طریق صرفه جویی در مصرف مواد و زمان ماشینکاری به میزان بیش از ۲۰٪؛
- افزایش بهره وری به میزان ۷۰٪ در مقایسه با ۴۰٪ در فرایند ماشینکاری؛
- کاهش زمان تولید از ۲۰ دقیقه در ماشینکاری به ۲۰ ثانیه در فورج؛
- افزایش استحکام خمشی به میزان ۲۰ درصد و چقرمگی ضربه به میزان ۱۵ درصد؛
- کاهش لقی چرخنده های تولیدی با روش فورج دقیق در یک سیکل کاری در مقایسه با چرخنده های ماشینکاری شده به میزان ۵۰ درصد (شکل ۳)؛

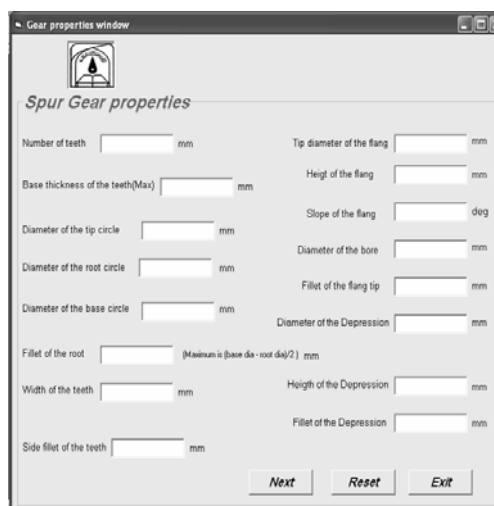
1. Precision Forging
2. Net Shape
3. Near Net Shape

چرخنده ساده، مورد استفاده قرار داد. در شکل ۱، مدل طراحی شده توسط نرم افزار، بعد از طراحی پارامتری آورده شده است.

شکل ۲ پنجره در نظر گرفته شده از طریق برنامه نویسی با Visual Basic را برای وارد کردن پارامترهای چرخنده مورد نظر، مدلسازی آن در نرم افزار Solid Works نشان می دهد.



شکل ۱ چرخنده ساده مدل شده از طریق طراحی پارامتری



شکل ۲ پنجره طراحی شده، برای وارد کردن پارامترهای چرخنده هرزگرد ساده

دقت سازگار است. در فرایند فورج دقیق چرخنده، باید اختلاف کوچکی بین ابعاد دندان حفره قالب و دندان فورج شده وجود داشته باشد. این اختلاف، برای جبران تغییرات زیر نیاز است:

۱- تحت نیروهای فورج، حفره‌های قالب به صورت الاستیک منبسط شده و بنابراین ابعاد اولیه آن باید کوچکتر ساخته شود.

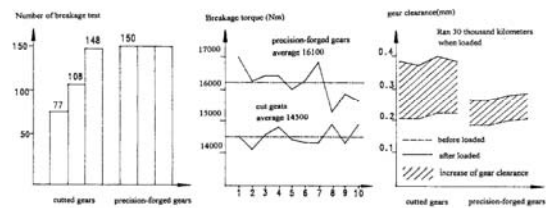
۲- چنانچه قطعه کار در دمای بسیار بالا باشد، قالبها پیش گرم شده و بنابراین منبسط می‌شوند و حفره قالب باید کوچکتر ساخته شود.

۳- انقباض قطعه کار پس از فرایند فورج، در دماهای بالا اتفاق می‌افتد و بنابراین حفره قالب باید بزرگتر ساخته شود.

۴- در فرایند فورج دقیق چرخنده، معمولاً قالبها از طریق فرایند ماشینکاری اسپارک ساخته می‌شوند. به دلیل گشادی حفره اسپارک شده، الکتروود باید کوچکتر ساخته شود.

بنابراین برای دستیابی به چرخنده‌های فورج شده دقیق، بزرگی هر یک از عوامل بالا باید محاسبه و در نظر گرفته شوند. با استفاده از مقادیر تغییر ابعادی که قبلاً برای استوانه‌های صلب استخراج شده، عوامل بالا که بر ابعاد نهایی فورج تأثیرگذار هستند، می‌توانند برای تعیین ارتباط بین شعاع قالب و قطعه فورج شده به کار روند.

با فرض اینکه، هر نقطه‌ای بر روی شعاع قطعه فورج، تنها در امتداد همان شعاع حرکت می‌کند، دیده شده است که پروفیل دندان فورج شده در حفره دندان دار قالب، به صورت اینولوت باقی می‌ماند. شکل ۴، اثر تجربی به دست آمده از دندان فورج شده در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  را با پروفیل‌های تئوری قالب نظیر و قطعه فورج شده نهایی مقایسه می‌کند [۱].



شکل ۳ مقایسه چرخنده‌های فورج شده به صورت دقیق و چرخنده‌های ماشینکاری شده

- افزایش سختی در گوشت میانی دندانها در حالت فورج سرد،  $1/75$  برابر، در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد،  $1/6$  برابر و در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد  $1/2$  برابر ماده خام اولیه؛
- کاهش تغییر شکلهای ناشی از عملیات حرارتی به میزان بیش از  $30\%$  نسبت به چرخنده‌های ماشینکاری شده و افزایش دقت؛
- صدای بسیار کمتر حرکت چرخنده‌های تولید شده با فورج دقیق نسبت به چرخنده‌های ماشینکاری شده.

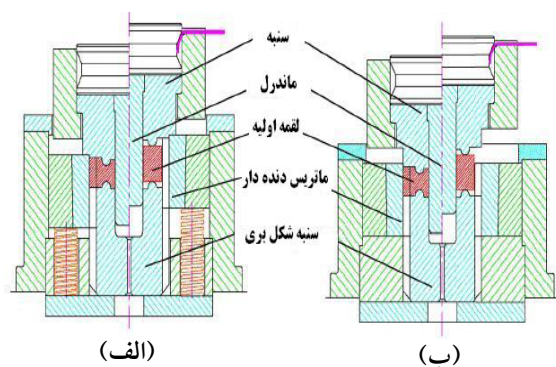
#### ب) معایب

- سرمایه‌گذاری اولیه زیاد؛
- ساخت ابزارها و قالبهای گران قیمت؛
- زمان طولانی برای تهیه مقدمات به علت پیچیدگی فرایند؛ وابسته به افزایش پارامترهای فرایند نسبت به فورج معمولی.

#### ۵-۲- ملاحظات مربوط به دقت ابعادی

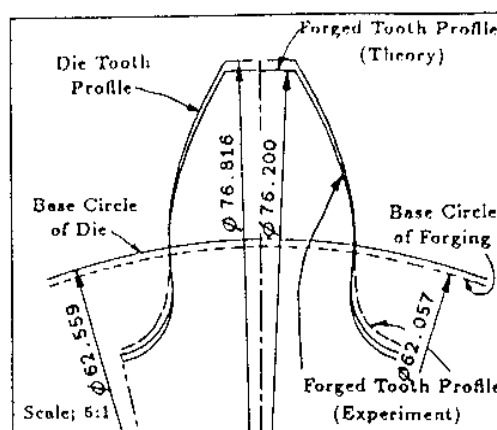
در فورج دقیق چرخنده، هدف نهایی تولید چرخنده‌هایی با دندانهای کامل و بدون نیاز به هیچگونه عملیات ماشینکاری پس از فرایند فورج است. این کار نیازمند طراحی و ساخت قالبهایی با

برای طراحی قالب این نوع قطعه، چندین روش وجود دارد. در دو نوع مهم از طراحی مجموعه ابزار، قالب به صورت صلب به میز ماشین پرس ثابت شده یا از طریق یک فنر نرم به میز فوق متصل است به طوری که قالب می‌تواند همراه با رم و سنبه حرکت کند. در هر دو حالت، سنبه با حرکت رم دستگاه به سمت پایین حرکت می‌کند در حالی که سنبه زیرین در طی فرایند فورج به میز ماشین پرس، ثابت می‌ماند. طرحواره از دو نوع طرح فوق در شکل ۶ نشان داده شده که در این شکل، قالب به صورت ارتجاعی (الف) یا به صورت صلب (ب) متصل شده است.



شکل ۶ شماتیکی از طراحی‌های ابزار فورج چرخنده با یک سنبه و سنبه زیرین تخت

اختلاف اصلی این دو طرح در تأثیر نیروهای اصطکاکی به وجود آمده در سطح مشترک بین قطعه کار و قطعه در هنگامی است که ماده، حفره دندانه دار شده قالب را پر می‌کند. در حالتی که قالب، ثابت است، سنبه در طی فرایند فورج به داخل حفره قالب حرکت کرده و فرم‌های دندانه باید بر روی سنبه نیز ایجاد شود؛ در حالی که در وضعیت قالب متحرک، سنبه به داخل حفره قالب وارد نمی‌شود بلکه قالب را به سمت پایین فشرده

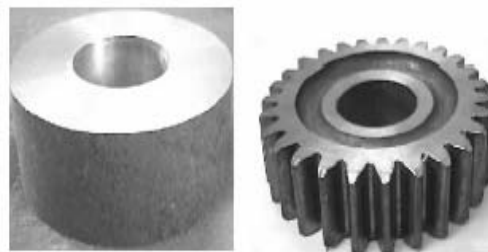


شکل ۴ موقعیت پروفیل‌های تجربی به دست آمده از دندانه فورج شده نسبت به پروفیل‌های تئوری مربوط به قالب و قطعه فورج شده نهایی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

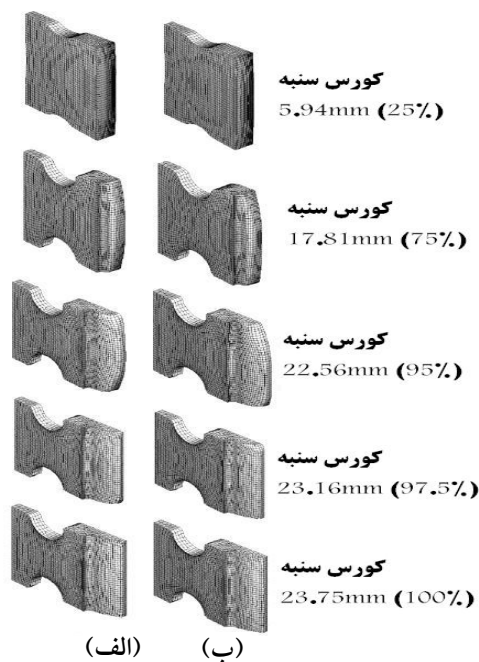
این شکل نشان می‌دهد که پروفیل پس از فرایند فورج، از دندانه فورج شده در داخل حفره دندانه دار قالب به شکل اینولوت، به صورت اینولوت باقی می‌ماند.

### ۳-۵- طراحی‌های قالب برای فورج چرخنده [۲، ۳]

پیش‌فرم معمول مورد استفاده برای فورج چرخنده، بیلت استوانه‌ای حلقوی بوده که قطر خارجی آن نزدیک به قطر ریشه چرخنده است. نمونه بیلت و چرخنده فورج شده در شکل ۵، نشان داده شده است.



شکل ۵ بیلت و چرخنده فورج شده از آن



شکل ۷ شکل گیری دندان با استفاده از دو طرح قالب (الف) قالب صلب (ب) قالب متحرک

در مراحل ابتدایی فرایند فورج چرخنده، شیوه جریان فلزی، تقریباً به حالت کله‌زنی با قالب باز شبیه است. بنابراین ماده موجود در مقطع میانی، سریعتر از ماده موجود در نواحی بالا و پایین جریان می‌یابد که دلیل آن نیروی اصطکاک موجود در روی سنبه و سنبه زیرین است. با ادامه یافتن فرایند فورج، دندان نسبتاً شکل گرفته، در تماس با سطح قالب دنداندار شده است که این قالب یا به صورت صلب به میز ماشین ثابت شده یا بر اثر اتصال ارتجاعی به میز، همراه با سنبه حرکت می‌کند.

مقاومت اصطکاکی ناشی از سطح قالب دنداندار شده، با توجه به حرکت قالب، به صورت متفاوتی رفتار می‌کند. وقتی که قالب ثابت باشد، نیروی اصطکاکی با جریان فلز به سمت پایین مخالفت کرده و ناحیه بالایی سریعتر پر می‌شود. بخش بالاتر دندان، قبل از نواحی میانی و پایینی دندان شکل می‌گیرد.

کرده و بنابراین به‌هیچ‌گونه شکلی از دندان نیاز نداشته و از شکل ساده استوانه‌ای می‌توان استفاده کرد. ابعاد فرم دندان فورج شده، تنها به انبساط ناشی از دماهای بالای بیلت و ابزارها وابسته نبوده بلکه همچنین به انبساط الاستیک مربوط به فشار شعاعی وابسته است که در ارتباط با نیروی فورج لازم برای کامل شدن شکل قطعه فورج شده ایجاد می‌شود. در فرایند فورج چرخنده، مقطع میانی دندانهای چرخنده، در پیشبرد سطوح بالا و پایین پر می‌شود.

در آخرین مراحل فرایند فورج که گوشه‌های بالا و پایین دندان پر می‌شوند، به نیروی فورج بالایی نیاز است. زمانی که قطعه‌کار با قالب تماس پیدا می‌کند، افزایش قابل توجهی در نیرو رخ می‌دهد. بر طبق تحلیلهای انجام شده در [۴]، حرکت نهایی سنبه به اندازه  $0.3\text{mm}$ ، تغییر شکلی به اندازه  $1/2\%$  بیلت را در پی دارد که برای پر کردن گوشه‌ها بوده و با افزایش نیرویی در حدود  $50\%$  توأم است.

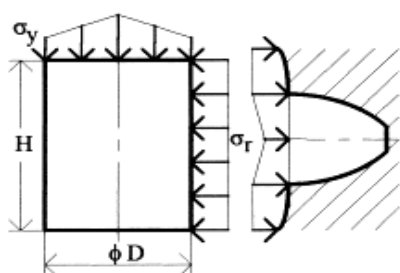
سهولت جریان یافتن مواد به سمت گوشه‌ها، از طریق تکنیکهای طراحی قالب یا طراحی چرخنده‌هایی که گوشه‌های تیز نداشته باشند، به‌طور شگرفی می‌تواند تجهیزات نیرویی و تنشهای وارد شده به ابزار فورج را کاهش دهد.

مزیت این کار، اعوجاج کم، دقت ابعادی بهتر و عمر طولانی‌تر ابزار است.

#### ۵-۴- تشکیل فرم دندان

مراحل شکل‌گیری دندان حاصل از شبیه‌سازی تحلیل المان محدود و برای دو طرح قالب در نظر گرفته شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.





شکل ۹ توزیع تنش نرمال برای مرحله دوم تغییر شکل

با فرض اینکه تنش شعاعی وابسته به Y نیست، به راحتی می توان رابطه زیر را بیان کرد:

$$\frac{\epsilon F}{(\pi D^2)} = P = \sigma_p \left[ 1 + \left( \frac{\mu}{\nu} \right) \left( \frac{D}{H} \right) \right] + \sigma_r \quad (1)$$

مقدار متوسط تنشهای شعاعی لازم برای جایگزینی در معادله (۱)، می تواند بر اساس هندسه دندانچه تخمین زده شود. با استفاده از روش قاچی، تقریبی برای نهایی شدن پرشدگی دندانچه برای تعداد دندانچه های  $12 < z < 50$ ، به صورت زیر می تواند نوشته شود [۸]:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_p} = 1/\epsilon + \epsilon/3\mu \quad (2)$$

با استفاده از تحلیل زمینه خطوط لغزشی، رابطه مشابه اما پیچیده تری از این تقریب برای تعداد دندانچه های کمتر از ۲۰ به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_p} = 0.78 + 2/6\mu + 2/8 \ln \left( \frac{D_p}{H} \right) \quad (2-f)$$

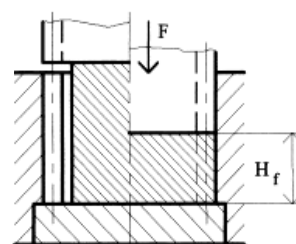
جدول ۱ معادلات ساده شده از فشار متوسط

Slab method
$p = \sigma_p \left[ 2/\epsilon + \mu \left( \epsilon/3 + \frac{D}{rH} \right) \right]$
Slip – line field analysis
$p = \sigma_p \left[ 1/8 + \mu \left( 2/6 + \frac{D_p}{rH} \right) + 2/8 \ln \left( \frac{D_p}{H} \right) \right]$

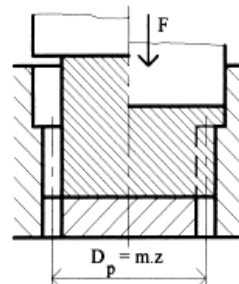
زمانی که قالب به صورت ارتجاعی به میز ماشین متصل باشد، در طی فرایند فورج همراه با سنبه به سمت پایین حرکت می کند. نیروی اصطکاک به جریان فلز به سمت پایین کمک کرده و مواد در بخشهای پایینی نسبت به نواحی بالا و میانی قطعه کار، سریعتر جریان می یابند. بنابراین در طی پر شدن حفره قالب، شکل گیری دندانچه از پایین به بالا خواهد بود.

### ۵-۵- ارزیابی نیروی مورد نیاز برای فورج دقیق چرخنده ساده

بعضی از مهمترین نتایج مربوط به محاسبه تنش و تخمین فشار متوسط برای فورج قالب بسته داغ مربوط به چرخنده های ساده استوانه ای، در اینجا بیان می شود. شکل ۸ نمای ساده ای از فورج به حالت نزدیک به شکل نهایی، با وجود فلش و بدون وجود فلش نشان می دهد [۵، ۶، ۷].



(الف)



(ب)

شکل ۸ فورج قالب بسته چرخنده ساده استوانه ای (الف) بدون پلیسه (ب) با پلیسه

ساده ترین توزیع تنشهای شعاعی و محوری نشان داده شده در شکل ۹، به منظور دستیابی به یک راه حل تحلیلی برای تخمین فشار متوسط، پذیرفته شده است.

## 6-5- تعیین تعداد مراحل پیش فرم فورج چرخنده

هدف از این بخش، مشخص کردن تعداد مراحل پیش فرم مورد نیاز برای تولید چرخنده ساده با ابعاد نهایی است. از روی تعداد مراحل و نیز قطعه ساخته شده در هر مرحله، نقشه‌های اجرایی برای ساخت الکترودهای اسپارک ارائه می‌شود.

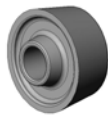
برای شروع طراحی لازم است ابتدا قطعه فورج نهایی با در نظر گرفتن اصول فورج در محیط نرم‌افزار CAD، به صورت دقیق ایجاد شود. با توجه به اینکه در این پروژه، هدف تولید شکل نهایی دندانه‌های چرخنده است، لذا هیچ‌گونه اضافه گوشت ماشینکاری یا هر نوع تغییر دیگری در دندانه‌ها اعمال نمی‌شود.

از آنجاکه در دو سطح پیشانی قطعه، هیچ‌گونه اهمیتی از نظر نوع فرایند انجام شده بر روی آنها وجود ندارد، تنها بر روی این دو سطح به میزان 1mm اضافه گوشت ماشینکاری در نظر می‌گیریم. این کار باعث می‌شود که چنانچه پس از فرایند فورج، در گوشه‌های بالا و پایین دندانه، پرشدگی به صورت ناقص انجام شده باشد، با یک مرحله ماشینکاری، این عیب را بتوان برطرف کرد.

علاوه بر این در سطوح خارجی مربوط به دو بخش فلنجی شکل قطعه کار، شیب 10 درجه وجود دارد که از این شیب طبیعی قطعه، در قالب آن استفاده می‌شود.

بخشهای مربوط به فیلتهای قطعه کار نیز به همان صورت استفاده می‌شود تا حداقل نیاز به عملیات ماشینکاری را جوابگو باشد. در سطح بالایی قطعه کار، بخشی جزئی با ضخامت 1mm در نظر گرفته می‌شود که برای اطمینان از پرشدن گوشه بالایی قطعه کار است.

فرایند شکل‌دهی فلزها، به‌ویژه فرایندهای از نوع<sup>۱</sup>، طوری هستند که در یک مرحله نمی‌توانند شکل‌دهی را ایجاد کنند و برای تعیین تعداد مراحل مورد نیاز، روابط کاملاً تعیین کننده‌ای وجود ندارد و فقط باید با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی ماده و نیز با توجه به نحوه جریان مواد که تنها از طریق شبیه‌سازهای کامپیوتری قابل تعیین است، مراحل فوق و شکل هندسی لازم را برای آنها مشخص ساخت. شکل 10 پیش فرم‌های در نظر گرفته شده را برای فورج دقیق چرخنده هرزگرد مورد نظر نشان می‌دهد.



(الف) مدل پیش فرم مرحله اول فورج چرخنده



(ب) مدل پیش فرم مرحله دوم فورج چرخنده



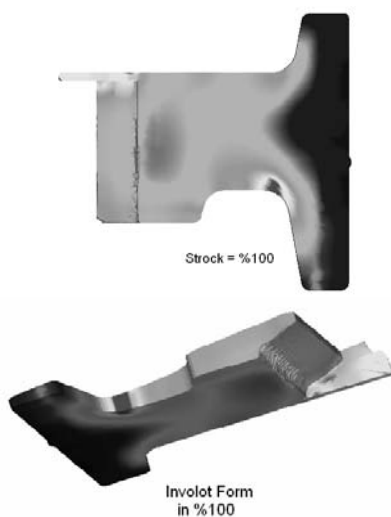
(ج) مدل مرحله آخر فورج چرخنده

شکل 10 پیش فرم‌های در نظر گرفته شده برای فورج چرخنده هرزگرد

مراحل طوری در نظر گرفته شده، که قطعه ایجاد شده از هر مرحله بتواند به راحتی در مرحله بعدی موقعیت یابد.

## ۶-۱- شبیه‌سازی و تحلیل فرایند فورج دقیق چرخنده هرزگرد

به منظور شبیه‌سازی و تحلیل فرایند فورج، از نرم‌افزار Super Forge استفاده شده است. کارهای طراحی مربوط به هندسه قالبها در مراحل مختلف، در نرم‌افزار Solid works انجام شده و سپس در محیط Assembly این نرم‌افزار، قالبها و اجزای هر مرحله از فرایند فورج، به طور مناسب موقعیت‌دهی شده است. بعد از آن، فایل‌های مربوط با فرمت Stl که قابل خواندن توسط نرم‌افزار Super Forge است، ذخیره شده. از آنجا که چرخنده فوق ۳۱ دندانه نسبتاً ریز دارد، برای تحلیل فرایند با نرم‌افزار تحلیلی مربوط، فقط نیمی از دندانه برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود، زیرا بخشهای دیگری از چرخنده به صورت متقارن نسبت به این جزء قرار داشته و این سبب خواهد شد که زمان تحلیل فرایند، بسیار کمتر شده و سریعتر بتوان اشکالات طراحی را پس از تحلیل و مشاهده نتایج آن برطرف ساخت. شکل ۱۱ دندانه شکل گرفته در انتهای کورس از مرحله آخر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ دندانه شکل گرفته از تحلیل فرایند در مرحله آخر

## ۵-۷- تجهیزات و مواد مصرفی برای فورج دقیق چرخنده ساده پژو ۴۰۵

### ۵-۷-۱- جنس قطعه کار

با توجه به کاربرد قطعه و نیز مطالعه استانداردهای مربوط، قطعه‌کار از جنس (۱/۰۴۰۱\_W) انتخاب شد، که درصد عناصر آلیاژی آن به صورت زیر است.

شماره ماده	علامت DIN	C %	Si %	Mn %	P %	S %	% عناصر دیگر
۱/۰۴۰۱_W	C۱۵	۰/۱۲ ۰/۱۸	<=۰/۴	۰/۳ ۰/۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	-

### ۵-۷-۲- جنس قالب

قالب مورد استفاده برای فورج این قطعه، فولاد گرم کار است که شامل ۵٪ کروم بوده و نیتریده شده است. در مراجع، فولادهای H۱۱، H۱۲، H۱۳، برای قالبهای فورج پیشنهاد شده است. فولادی که در این پروژه استفاده و تحلیل بر اساس آن انجام شده، فولاد H۱۳ است.

### ۵-۷-۳- انتخاب دمای مناسب فورج

با توجه به تحقیقات آقای محمدحسین صادقی و نیز جداول موجود در استانداردها، دمای مناسب فورج گرم برای فولادهای آلیاژی و کربنی که در ساخت چرخنده به کار می‌رود، در حالت فورج دقیق در حدود ۷۱۵ - ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است. بر اساس اطلاعات گرفته شده، بعد از تحلیل از نرم‌افزار و با توجه به اینکه بر اثر تغییر شکل پلاستیکی در قطعه کار، افزایش دما رخ می‌دهد و نیز کاهش درجه حرارت ناشی از همرفت و تماس قطعه کار با قالبها و دمای شروع اکسایش فولاد، دمای مناسب برای بیلت اولیه برابر  $820^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شده است.

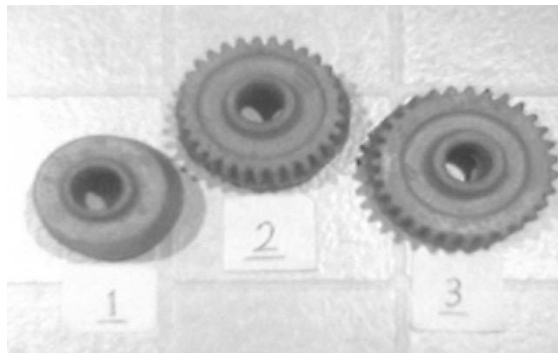
## ۶-۲- محاسبه حداکثر نیروی لازم و نحوه جریان

### یافتن مواد در قالب طراحی شده

محاسبه دقیق نیرو در فرایند فورج دقیق که نوعی آهنگری قالب بسته است ممکن نیست؛ زیرا کمیتهای متعددی مانند دمای تغییر شکل، فرایندهای بین کریستالی در مواد، سرعت تغییر شکل، شکل قطعه کار، جنس قطعه کار و نوع پرس به کار رفته در فرایند، به طور همزمان بر فرایند شکل دادن تأثیر می گذارند.

بر طبق نتایج به دست آمده از کارهای تجربی، به ویژه در زمینه فورج قالب بسته چرخنده که در بخشهای قبلی به آنها اشاره شد، نیروی لازم برای فرایند فورج دقیق چرخنده هرزگرد ساده مورد نظر قابل محاسبه است. با مقایسه نتایج تحلیلی مربوط به تناژ مورد نیاز پرس در آخر کورس در هر مرحله، با نتایج تجربی به دست آمده در بخش (۵-۵)، می توان درصد اختلاف یا دقت تحلیل نرم افزار را به دست آورد.

میزان این خطا برای مرحله دوم برابر ۰/۵٪ و برای مرحله سوم برابر ۴/۱٪ به دست آمده است. برای ارزیابی نحوه جریان مواد، از «پلاستیسین» استفاده شده است. شکل ۱۴ قطعات شکل گرفته از این ماده را نشان می دهد که به خوبی معرف نحوه جریان یافتن<sup>۱</sup> صحیح و پیش بینی شده مواد در قالبهای فوق است.



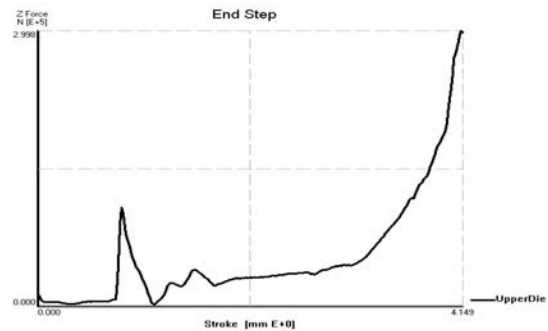
شکل ۱۴ قطعات شکل گرفته از قالبهای سه مرحله ای از ماده

پلاستیسین

#### 1. Grain Flow

بعد از تحلیل در هر مرحله از فرایند، می توان اطلاعات و عوامل مختلفی مانند توزیع دما، نرخ کرنش، تنش مؤثر و غیره را در زمانهای مختلفی از هر مرحله به دست آورد.

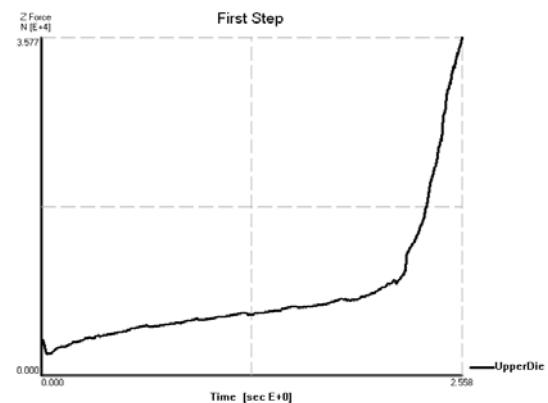
همچنین با ترسیم منحنی مربوط به نتایج فرایند، تناژ مورد نیاز برای شکل گیری هر مرحله از فرایند را می توان استخراج کرد. منحنی شکل ۱۲ که از نتایج تحلیل نرم افزار گرفته شده، بیانگر تناژ مورد نیاز پرس به کار رفته در مرحله آخر فرایند است. تغییرات به وجود آمده در شکل ۱۲، ناشی از مشکلات ترسیمی نرم افزار بوده و همچنین ناشی از بخشهای به شکل پلیسه ناشی از مراحل قبلی است.



شکل ۱۲ منحنی نیرو - کورس در مرحله آخر فرایند

همانطور که شکل ۱۳ نشان می دهد، این تغییرات در

منحنی نیرو - کورس مرحله اول دیده نمی شود.



شکل ۱۳ منحنی نیرو - کورس در مرحله اول فرایند

- [2] cai, J; "precision forging and post processing of spur gears"; Ph. D. Thesis; The university of Birmingham, UK; 2001.
- [3] Tuncer, C.; Dean, T. A; "Design alternatives for precision forging hallow parts"; Int. J.Mach Tools; 27(1); 1987; pp. 65-76.
- [4] Hu, Z. M; Dean, T. A; "Some aspects of net-shape forging of gears"; proceedings of the second international seminar on precision forging; osako, Japan; 2000.
- [5] Bryukhanov, A; Rebelsky, A;"Closed Die forging and Die Design";GNTIML, Moscow; 1962.
- [6] Gagov, V.; "Modern Technology and Industrial Reengineering";Varna; 1992; p. 63.
- [7] Tomov, B; Gogov, V; Kolev, D; "Topical problems of Metal Forming";Varna; 1989; pp. 104-108.
- [8] Tomov, B; Wahnheim, T; "Advanced Manufacturing Technology"; vol. 2; 1993; pp. 147-156.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، پارامترها و متغیرهای مختلف فرایند طراحی پارامتری چرخدنده‌های ساده برای مدلسازی و نیز ساخت قالبهای آنها با استفاده از CAD/CAM شرح داده شد.

تغییرات در حین فرایند تولید و تنوع چرخدنده‌های ساده، دو عامل مهمی است که مهندسان طراح و سازنده با آنها روبه‌رو هستند.

در این مقاله پیش‌فرم‌های مورد نیاز برای فرایند فورج دقیق چرخدنده هرزگرد ساده پژو ۴۰۵، با توجه به رعایت اصول فرایند فوق، طراحی، تحلیل و ساخته شده است.

همچنین روشی ارائه شده که با استفاده از آن، طراحی قطعات هم‌خانواده از چرخدنده‌های ساده در کمترین زمان ممکن و در هنگام طراحی یا ساخت، میسر باشد. نتایج حاصل از تحلیل فرایند، از جمله تناژ مورد نیاز پرس و نحوه جریان مواد، با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی را نشان داده است. تدوین فرایند طراحی و ساخت این چرخدنده‌ها در داخل کشور، علاوه بر صرفه‌جوییهای ارزی، گام بزرگی در جهت دستیابی به فناوری ساخت قطعات مشابه محسوب می‌شود.

## ۸- منابع

- [1] Sadeghi, M. H.; Dean, T. A. "Analysis of Tooth profile Accuracy in Precision Forged Spur Gears with Involute Teeth"; Proc, Conf. of SME/NAMRC; Vol. 21; 1993.

