

تحلیل تجربی و عددی آهنگری سرد دورانی چرخ‌دنده مخروطی با آلیاژ 16MnCr5

سعید بهشتیان مسگران^{۱*}، محمد علی صادقی^۲

*نویسنده مسئول: A_sadeghi@out.ac.ir

واژه‌های کلیدی

آهنگری دورانی، آهنگری مرسوم، المان محدود، چرخ‌دنده مخروطی، ریز ساختار.

چکیده

هدف از این تحقیق، تحلیل و بررسی فرایند آهنگری مرسوم چرخ‌دنده مخروطی با شماره مواد ۱۷/۱۳۱ به روش المان محدود به کمک نرم‌افزار (SUPER FORGE) و مقایسه آن با آهنگری سرد دورانی بر اساس آزمایش‌های عملی است. بعد از انجام شبیه‌سازی بر روی آهنگری مرسوم و به‌دست آوردن تناژ پرس در روش آهنگری دورانی توسط نرم‌افزار DEFORM، قالب‌های آهنگری اوربیتال ساخته شد. از آنجایی که تولید چرخ‌دنده مخروطی به روش آهنگری مرسوم دارای سه مرحله پیش‌فرم است، پس فرایند آهنگری بایستی به روش آهنگری داغ صورت گیرد. اما در فرایند آهنگری اوربیتال، چرخ‌دنده مخروطی تنها در یک مرحله و به صورت آهنگری سرد تولید می‌شود. در انتها، ریز ساختار چرخ‌دنده‌های تولید شده به روش‌های آهنگری اوربیتال و ماشینکاری و ریز ساختار قالبها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر این است که روش تولید قطعات قبل از انجام عملیات حرارتی تأثیر به‌سزایی بر ریز ساختار دارد. در آهنگری دورانی، میزان تناژ پرس به مراتب کمتر از تناژ در آهنگری مرسوم است و قدرت پرکنندگی حفره قالب از مواد خام در آهنگری دورانی به مراتب بیشتر از آهنگری مرسوم است. هندسه بیلت تأثیر به‌سزایی در پر کردن حفره قالب دارد.

۱- کارشناس ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، باشگاه پژوهشگران جوان، مشهد، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۱- مقدمه

تقاضا برای کیفیت بهتر و هزینه کمتر تولیدات به صورت روز افزون در حال افزایش است. در عین حال تقاضای مداوم برای کاهش زمان انجام کار نیز وجود دارد و انتخاب روشهای تولیدی که کمترین هزینه و بهترین کیفیت را دارد توجه همگان را به خود جلب کرده است. از چرخ‌دنده‌های مخروطی در صنایع خودروسازی و ماشین افزار به صورت قابل توجهی استفاده می‌شود لذا ارائه روش تولیدی با تیراژ بالا و بهینه الزامی است. این دنده‌ها باید دارای سطحی سخت و مغزی نرم (چقرمه) باشند تا در مقابل سایش مقاومت داشته باشند و تحمل تنش به هنگام انتقال قدرت را دارا باشند. در روش تولید ماشینکاری الیاف فلز بریده شده و قطعه دارای استحکام کمتری است. اگر چرخ‌دنده از طریق آهنگری تولید شود الیاف فلز پیوسته است و در مقابل تنش‌های مختلف مقاومت بیشتری نسبت به نمونه ماشینکاری شده از خود نشان می‌دهد [۱]. امروزه طراحی قالبهای آهنگری با دید بهبود خواص مکانیکی قطعات آهنگری شده، افزایش عمر قالب، کاهش در هزینه ها، صرفه جویی در مواد اولیه مورد نیاز، کاهش میزان ماشینکاری لازم، بهبود رفتار خستگی قطعه آهنگری شده حین کار، انتخاب صحیح نوع پرس، انتخاب صحیح دما و غیره صورت می‌گیرد [۲]. بدیهی است علاوه بر تمهیداتی که در طراحی قالب‌های آهنگری اعمال می‌شود استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز طراحی قالب‌های آهنگری نیز می‌تواند در زمینه بهینه‌سازی فرایند کمک کند و در مواردی پیش‌بینی لازم برای جلوگیری از آسیب در قطعه یا شکست قالب را انجام دهد [۳]. تلفیق نرم افزارهای شبیه‌ساز با شرایط عملی می‌تواند در رسیدن به یک نتیجه قابل قبول و نزدیک به واقعیت در صنعت راهگشا باشد و باعث جلوگیری از خسارات ناشی از پیش‌بینی نادرست شود.

تحلیل فرایند آهنگری توسط روش‌های مختلفی در سال‌های گذشته انجام شده است. سونگ و همکاران [۳] بر روی طراحی قالب بسته آهنگری دنده مخروطی به روش اجزای محدود فعالیت‌هایی را انجام دادند. نتایج حاصل بیانگر این است که موقعیت‌دهی نادرست سنبه و ماتریس در حین فرایند

آهنگری و توزیع نامتعادل نیرو در قالب سبب ایجاد ترک در سنبه و ماتریس می‌شود و طراحی صحیح قالب و جریان مواد متعادل و افزایش نیروی سنبه گیر و ماتریس سبب بهبود فرایند تولید می‌شود. چو و همکاران [۴] بر روی اعوجاج ایجاد شده توسط عملیات حرارتی بر روی دو دنده مخروطی آهنگری شده و ماشینکاری شده تحقیقاتی را به عمل آوردند. نتایج بیانگر آن بود که بعد از عمل آب دهی^۱ اعوجاج در دنده‌های آهنگری افزایش می‌یابد. براملی و همکاران [۵] در زمینه ابزارها، کاربردها و مزایای شبیه‌سازی تحقیقاتی به عمل آورده و بین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی اولیه و امروزی مقایسه‌ای انجام داده‌اند. تحقیقات زیادی نیز به روش اجزا محدود بر روی فرایند آهنگری انجام شده است. بریانی و همکاران [۶] از جمله کسانی بودند که با تلفیق تکنیک‌های شبیه‌سازی فیزیکی و عددی به طراحی فرایندهای آهنگری گرم در تیغه‌های توربین فولادی ضد زنگ پرداختند و به ریزساختار و مقدار فاز فریت دلتای (δ) ایجاد شده در قطعه طی دماهای مختلف و همچنین نرخ کرنش‌های مختلف در طول فرایند آهنگری توجه ویژه‌ای داشتند. چنگ و همکاران [۷] نیز به شبیه‌سازی سه بعدی آهنگری چند مرحله‌ای تیغه کمپرسور توربین گازی و همچنین جریان تنش و کرنش طی درجه حرارت‌های مختلف پرداختند و میزان نیروی لازم برای عملیات آهنگری این قطعه از جمله کله زنی^۲، پیش شکل و آهنگری نهایی را نیز مورد بررسی قرار دادند. چو و همکاران [۸] برای بهینه‌سازی یک قالب باز آهنگری برای گرد و مدور کردن یک قطعه به روش اجزای محدود فعالیت‌هایی انجام دادند. لیو و سیو [۹] بر روی پیش فرم‌های آهنگری داغ مرسوم چرخ‌دنده مخروطی با آلیاژ AZ31B پژوهشی را انجام دادند. پیش فرم با دو سر مخروطی کاملاً حفره قالب را پر کرد. دینگ و همکاران [۱۰] برای تحلیل تجربی و عددی آهنگری سرد دورانی چرخ‌دنده مخروطی با آلیاژ 20CrMnTi فعالیت‌هایی را بر روی پیش فرم‌های این چرخ‌دنده با زوایای مختلف انجام دادند. در این تحقیق پیش فرم با دو سر

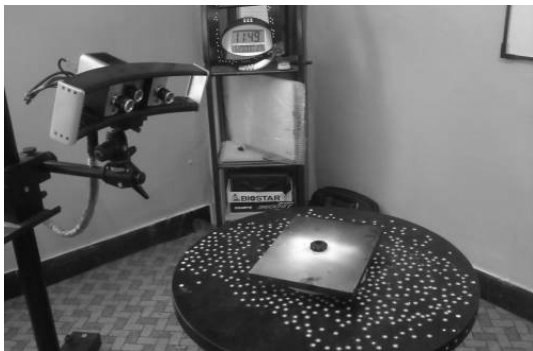
1- Quenching

2- Upsetting

از ارتفاع بالا رها شده و به زمین برخورد کرده و تا لحظه سکون در هر لحظه قسمتی از لبه سکه با سطح زمین در تماس خواهد بود. تعریف این حرکت در نرم افزار SUPER FORGE غیر ممکن است. همچنین نتایج تجربی برای مقایسه با نتایج تئوری آورده شده است. هدف اصلی تحقیق، یافتن مسیر سیلان فلز در قطعه مورد نظر، بهینه کردن ابعاد بیلت اولیه و انتخاب بهترین روش تولید چرخ‌دنده مخروطی جهت افزایش بهبود در کیفیت چرخ‌دنده با تغییر در هندسه بیلت است. در همین راستا مقایسه‌ای بین ریزساختار دنده‌های حاصل از روش‌های آهنگری و ماشینکاری صورت گرفت و در نهایت ریز ساختار قالبهای مربوط به آهنگری دورانی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

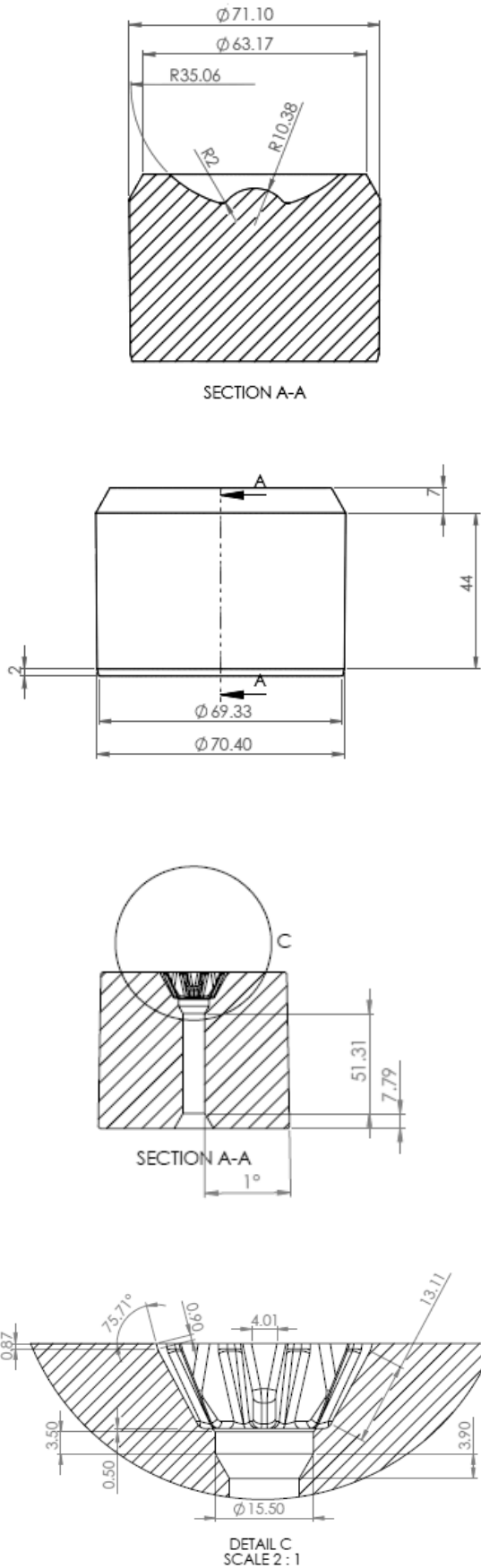
ابتدا چرخ‌دنده مخروطی توسط اسکنر نوری شکل (۱) از نوع RE SCAN III اسکن شده و نهایتاً فایل ابر نقاط حاصل طبق شکل (۲) به محیط Degitized Shap Editor در نرم‌افزار CATIA وارد شد. در این محیط می‌توان ابر نقاط را تصفیه کرد و غلظت و تراکم نقاط را کم کرد. پس از آن مدل طبق شکل (۳) شبکه‌بندی شد تا شکل ظاهری قطعه نمایش داده شود. طبق شکل (۴) سنبه و ماتریس براساس این مدل طراحی شدند. نقشه قطعات طراحی شده طبق شکل (۵) با پیوند STL به نرم‌افزار POWER MILL وارد شد و کدهای مربوط به ماشینکاری استخراج شد. در نهایت قالب‌های اولیه از جنس آلومینیم توسط ماشین فرز CNC طبق شکل (۶) ماشینکاری شدند.



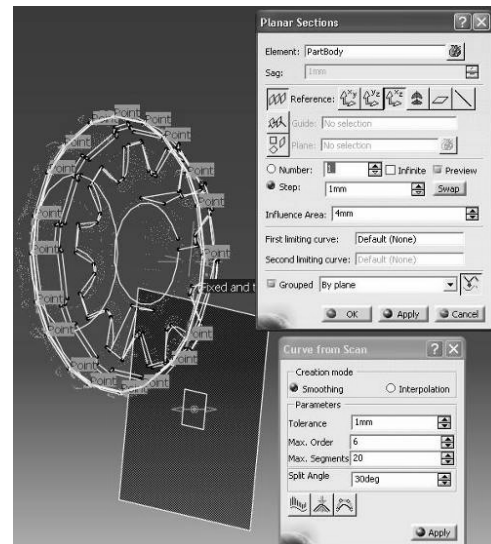
شکل (۱) نمای از اسکنر نوری در حال اسکن.

مخروطی با قطر میانی ۴۲/۶۷ میلیمتر بهترین پیش فرم به لحاظ پر کردن حفره قالب انتخاب شد. دینگ و همکاران [۱۱] بر روی شبیه‌سازی آهنگری سرد دورانی چرخ‌دنده ماریپچ نیز فعالیتهایی را انجام دادند. نتایج حاصل بیانگر آن است که روش دورانی به مراتب بهتر از دیگر روشهای آهنگری برای تولید چرخ‌دنده ماریپچ است. در تحقیقات فوق توجه خاصی به بررسی هر دو روش آهنگری مرسوم (معمولی) و دورانی با هم نشده است در تحقیق حاضر نه تنها دو روش با یکدیگر مقایسه شدند بلکه ریز ساختار در چرخ‌دنده‌های تولید شده به روش آهنگری دورانی و چرخ‌دنده‌هایی که پیش فرم اولیه آنها به روش آهنگری مرسوم و سپس ماشینکاری شده‌اند، با یکدیگر مقایسه شده و در همین راستا ریز ساختار مربوط به قالبهای آهنگری دورانی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

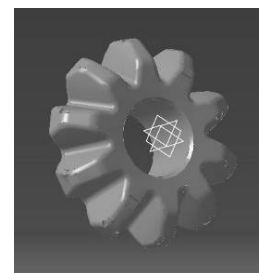
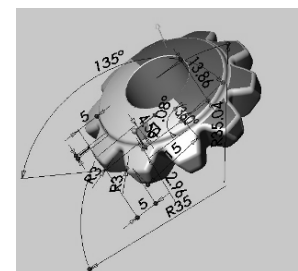
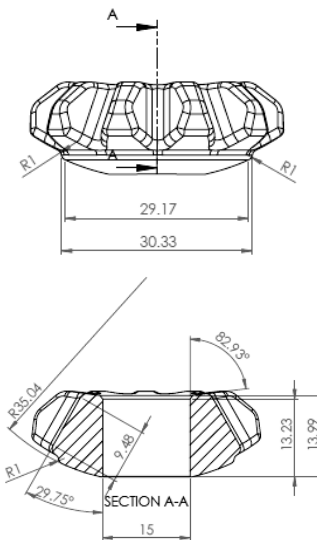
یکی از جنبه‌های مهم آهنگری دنده مخروطی کاهش در هزینه‌ها، زمان تولید، افزایش استحکام، چقرمگی و راندمان تولید است. در همین راستا بررسی سیلان پلاستیک فلز و روشن شدن این مطلب که فلز چگونه و تحت چه مدلی تغییر شکل می‌یابد و شکل اولیه (بیلت اولیه) را به سمت شکل نهایی پیش می‌برد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۲]. در طراحی قالب و در تعیین نیروهای دقیق آهنگری و در نتیجه طراحی خط تولید صحیح اهمیت خواهد داشت. از طرف دیگر با انتخاب صحیح ابعاد بیلت (حجم ثابت)، دانستن مسیر سیلان مناسب و طراحی قالب براساس آن، از به‌وجود آمدن بسیاری از عیوب جلوگیری خواهد کرد. در تحقیق حاضر نحوه سیلان پلاستیک مواد در دو فرایند آهنگری مرسوم و دورانی قطعه چرخ‌دنده مخروطی با استفاده از روش اجزای محدود به کمک نرم افزار SUPER FORGE و نرم‌افزار DEFORM مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از نرم‌افزار DEFORM برای تحلیل فرآیند آهنگری دورانی است زیرا نرم‌افزار SUPER FORGE قادر به تحلیل دورانی نیست. در فرایند آهنگری دورانی سنبه مانند حالت سوراخکاری به دور خود می‌چرخد و باعث پاشش مواد می‌شود. ولی در نرم‌افزار DEFORM این حرکت به‌طور مداری است. حرکت مداری مانند حالتی است که یک سکه



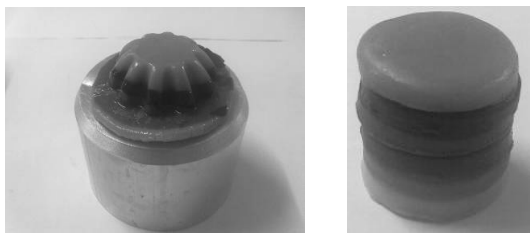
شکل (۴) شماتیکی از سنجه و ماتریس چرخ دنده مخروطی.



شکل (۲) شماتیکی از نحوه تبدیل فایل ابر نقاط به مدل سطحی در محیط نرم افزار CATIA.



شکل (۳) شماتیکی از مدل شبکه بندی شده و تبدیل آن به مدل نهایی.



شکل (۷) شماتیکی از بیلت ساخته شده از لایه‌های خمیر مجسمه‌سازی.

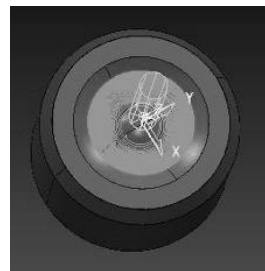
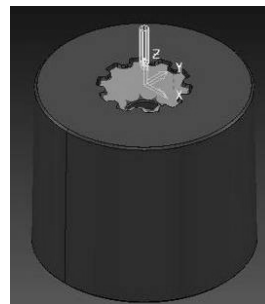


شکل (۸) شماتیکی از مدل برش خورده چرخ‌دنده مخروطی با لایه‌های رنگی متفاوت خمیر مجسمه‌سازی.

بعد از انجام این آزمایش فیزیکی و اطمینان از پر شدن قالب با مواد خمیر مجسمه‌سازی، قالبهای واقعی از فولاد DB.D2 ساخته شدند. بعد از طراحی قطعه و قالب‌ها در محیط نرم‌افزاری CATIA، الکترودهای مسی جهت فرایند ماشینکاری اسپارک تولید شد. بعد از اتمام فرایند ماشینکاری، قالب‌ها توسط خمیر پولیش^۱، پولیش کاری شدند. سپس فرایند عملیات حرارتی روی آنها صورت گرفت و نهایتاً قالب‌ها بر روی پرس قرار گرفتند. شکل (۹) نمونه قالب‌های ساخته شده در محیط کارگاه را نشان می‌دهد.



شکل (۹) سنبه و ماتریس ساخته شده از جنس DB.D2 در محیط کارگاهی.



شکل (۵) شماتیکی از مراحل G کدگیری سنبه و ماتریس در نرم‌افزار POWER MILL



شکل (۶) شماتیکی از سنبه و ماتریس ماشینکاری شده از جنس آلومینیوم توسط ماشین فرز.

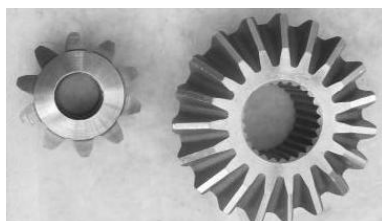
بعد از ساخت قالبهای اولیه از جنس آلومینیوم برای اطمینان از پر شدن قالب از مواد اولیه در فرآیند آهنگری مرسوم ابتدا لایه‌هایی از خمیر مجسمه‌سازی طبق شکل (۷) با قطر ۳۲ میلیمتر و ارتفاع ۴/۴ میلی‌متر به تعداد ۶ عدد روی همدیگر قرار گرفتند و با یک پرس دستی در بین قالبها تغییر شکل داده شدند و از روی این آزمایش فیزیکی مسیر جریان مواد با لایه‌های رنگی متفاوت خمیر مجسمه‌سازی مشخص شد. این مسیر سیلان پلاستیک لایه‌های خمیری با برش زدن چرخ‌دنده مخروطی در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل (۱۱) چرخ‌دنده‌های تولید شده به روش آهنگری سرد دورانی.

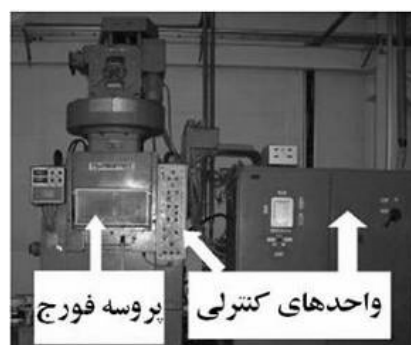


شکل (۱۲) پیش‌فرم خام چرخ‌دنده‌ها به روش آهنگری مرسوم جهت عملیات ماشینکاری.



شکل (۱۳) چرخ‌دنده‌های تولید شده به روش ماشینکاری.

شکل (۱۰) شماتیکی از دستگاه آهنگری دورانی و قالبهای بسته شده بر روی آن را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نمونه‌هایی از چرخ‌دنده‌های مخروطی تولید شده به روش آهنگری سرد دورانی و پیش‌فرم‌های تولید شده با آهنگری داغ مرسوم جهت تولید چرخ‌دنده به روش ماشینکاری نشان داده شده است. در تولید چرخ‌دنده به روش ماشینکاری طبق شکل (۱۳) بعد از اینکه پیش‌فرم‌ها آهنگری شدند دندانه‌ها ماشینکاری خواهند شد. در جدول (۱) نوع استاندارد و ترکیب شیمیایی جنس بیلت خام مشخص شده است، البته این مشخصات را می‌توان به راحتی از کتاب کلید فولاد استخراج کرد [۱۳]. فولاد مورد نظر باید از گروه فولادهای سممانته بوده تا قابلیت سخت کاری سطحی را داشته باشد.



شکل (۱۰) نمای از دستگاه پرس دورانی.

۳- طراحی آزمایش‌ها

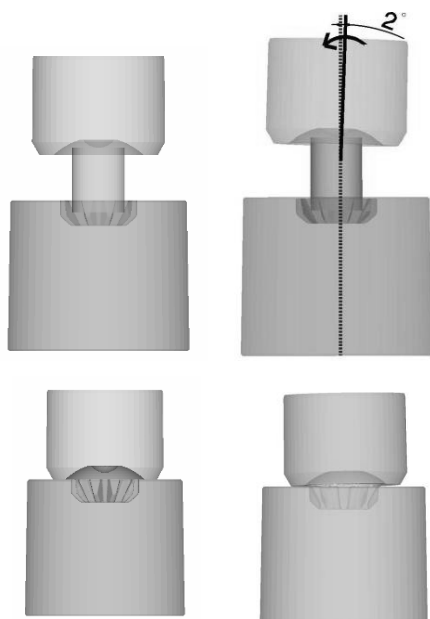
۳-۱- روش اول

بعد از انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی با ابعاد بیلت‌های مختلف نهایتاً ابعاد بیلت بهینه که به طور کامل تمام حفره قالب را پر کند با حجم $(V = 21243/43 \text{ mm}^3)$ به دست آمد. آزمایش‌های بر روی بیلت‌های مختلف با ابعاد متفاوت صورت گرفت ابعاد بیلت‌ها برحسب میلیمتر از دو نمای مختلف (نمای روبه‌رو و نمای بالا) در شکل (۱۴) به طور کامل نشان داده شده است. ابتدا شبیه‌سازی بر روی بیلت‌ها با قطر ۲۶-۲۸-۳۰-۳۲ میلی‌متر (حجم ثابت) صورت گرفت.

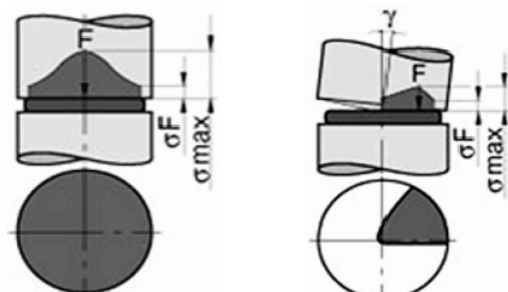
جدول (۱) ترکیب شیمیایی جنس قطعه.

نام استاندارد	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	استاندارد فولاد
16MnCr5	۰/۱۴-۰/۱۹	≤۰/۴۰	۱/۰۰-۱/۳۰	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۸۰-۱/۱۰	۱/۷۱۳۱

حالی که در آهنگری مرسوم تمام سطح مقطع قالب بالایی با تمام سطح مقطع بالایی بیلت درگیر است. این پدیده را می‌توان در شکل (۱۶) مشاهده کرد.



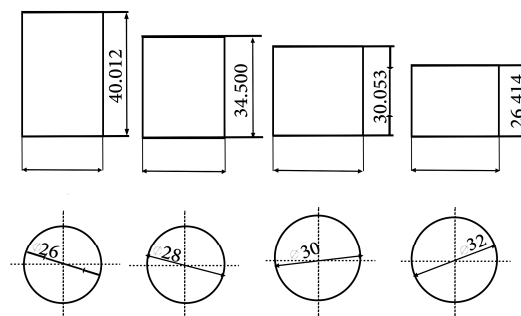
شکل (۱۵) شماتیکی از موقعیت دهی قالب‌ها و قطعه در دو حالت (سمت چپ) آهنگری مرسوم و (سمت راست) آهنگری دورانی.



(الف) آهنگری مرسوم (ب) آهنگری دورانی

شکل (۱۶) مقایسه‌ای بین مقدار سطح درگیری [۲].

در این تحقیق زاویه انحراف قالب بالایی نسبت به محور ماشین ۲ درجه است. قالب بالایی حول محور اصلی ماشین پرس با سرعت چرخشی ۲۰۰ rpm چرخش داشته و قالب پایین با سرعت $5 (m/s)$ به سمت قالب بالایی حرکت می‌کند. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نحوه شکل‌گیری بیلت خام قبل و بعد از عملیات آهنگری نشان داده شده است. نوع المان‌ها در این شبیه‌سازی از نوع المان حجمی چهار وجهی (هرمی شکل) است.



شکل (۱۴) شماتیکی از ابعاد بیلت‌های مورد آزمایش.

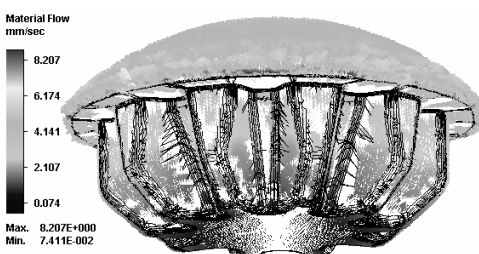
در شکل (۱۵) شماتیکی از موقعیت دهی بیلت نسبت به قالب‌ها قبل و بعد از عملیات آهنگری در محیط نرم‌افزار SUPER FORGE و DEFORM نشان داده شده است. با توجه به اینکه نرم‌افزار SUPER FORGE قادر به تحلیل آهنگری دورانی نیست باید حرکت دورانی را با نرم‌افزار DEFORM تحلیل کرد. همانطور که در شکل (۱۵) سمت چپ مشاهده می‌شود موقعیت قالب بالایی نسبت به بیلت بدون انحراف بوده و هیچ زاویه‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. این حالت را که نسبت به بیلت هیچ انحرافی نداشته و سنبه به صورت مستقیم به سمت ماتریس حرکت می‌کند را آهنگری مرسوم گویند. اما در شکل (۱۵) سمت راست قالب بالایی نسبت به بیلت یک زاویه انحراف ۲ درجه داشته و حول محور اصلی ماشین پرس چرخش دارد. این نوع آهنگری را آهنگری دورانی می‌نامند.

لازم به ذکر است که تفاوت عمده آهنگری مرسوم با آهنگری دورانی در نحوه پایین آمدن قالب بالایی به سمت قالب پایینی است. به این ترتیب که در آهنگری مرسوم طبق شکل (۱۶-الف) قالب بالایی به صورت مستقیم و بدون هیچ انحرافی به سمت قالب پایینی حرکت می‌کند به همین دلیل میزان تنش ایجاد شده در قالبها و بیلت بسیار زیاد است ولی در روش آهنگری دورانی طبق شکل (۱۶-ب) قالب بالایی تحت زاویه ۲ تا ۳ درجه قرار گرفته و در حین پایین آمدن به سمت قالب پایینی حول محور اصلی ماشین پرس یک حرکت چرخشی (دورانی) نیز دارد. این انحراف زاویه‌ای قالب بالایی در آهنگری دورانی باعث کاهش سطح درگیری بین قالب بالایی (سنبه) و بیلت می‌شود. همین امر باعث کاهش میزان تنش اعمالی در بین قالب‌ها و بیلت می‌شود. در

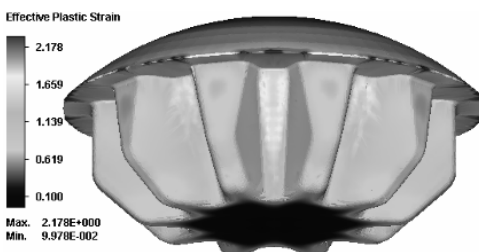
نتایج حاصل از شبیه سازی بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر در محیط نرم افزار SUPER FORGE را می توان در شکل های (۲۰)، (۲۱)، (۲۲)، و (۲۳) مشاهده کرد. صحت اعداد جدول (۲) که مربوط به نتایج به دست آمده از شبیه سازی بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر را می توان در کانتورهای زیر مشاهده کرد.



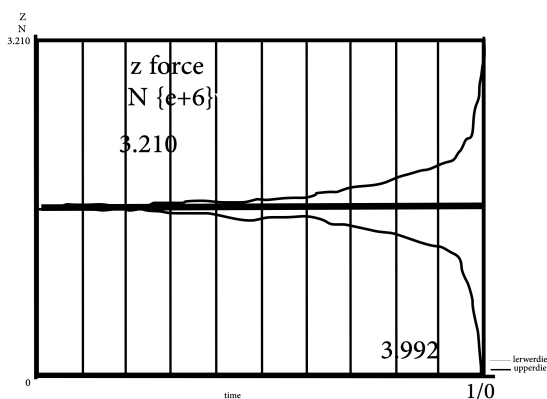
شکل (۲۰) نرخ کرنش.



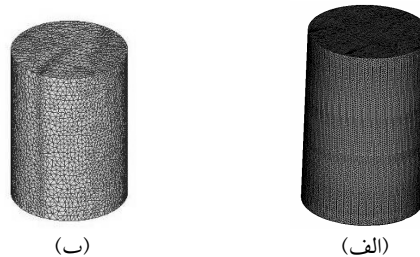
شکل (۲۱) جریان مواد.



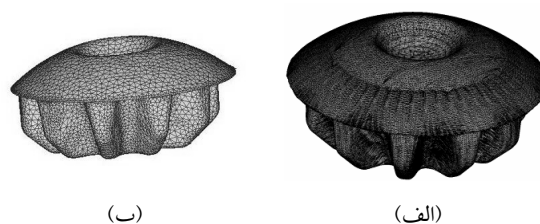
شکل (۲۲) کرنش پلاستیک مؤثر.



شکل (۲۳) نمودار زمان - نیروی پرس مربوط به بیلت با قطر ۳۲ میلیمتر در آهنگری مرسوم.



شکل (۱۷) شماتیکی از بیلت خام قبل از عملیات.



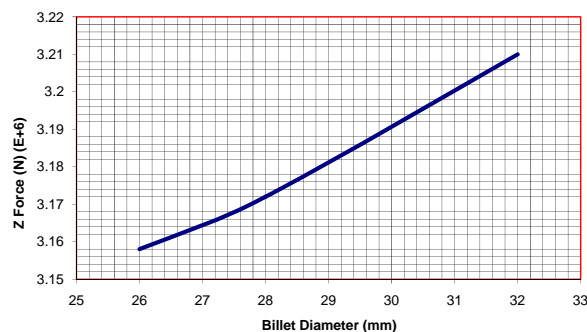
شکل ۱۸ - شماتیکی از بیلت خام بعد از عملیات (الف) آهنگری مرسوم و (ب) آهنگری دورانی.

نتایج حاصل از شبیه سازی آهنگری مرسوم در جدول (۲) مشخص شده است. آزمایش ها با پرس هیدرولیک با سرعت ثابت (۵ میلی متر بر ثانیه) انجام شده اند.

جدول (۲) نتایج آزمایشات آهنگری مرسوم.

ردیف	جریان مواد (mm/sec)	نرخ کرنش (mm/mm.s)	کرنش پلاستیک مؤثر (mm/mm)	نیروی پرس (N)	قطر بیلت (mm)
۱	۲۳/۰۸	۳۸/۸۹	۲/۳۲۰	$۳/۱۵۸ \times ۱۰^۶$	۲۶
۲	۱۳/۱۶	۴۹/۹۵	۲/۰۹۱	$۳/۱۷۸ \times ۱۰^۶$	۲۸
۳	۱۲/۴۰	۱۴/۲۵	۲/۰۲۶	$۳/۱۸۸ \times ۱۰^۶$	۳۰
۴	۸۲/۰۷	۱۵/۱۵	۲/۱۷۸	$۳/۲۱۰ \times ۱۰^۶$	۳۲

نتایج حاصل از شبیه سازی حاکی از این است که افزایش قطر بیلت باعث افزایش نیروی پرس خواهد شد. این نتیجه به صورت نمودار در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

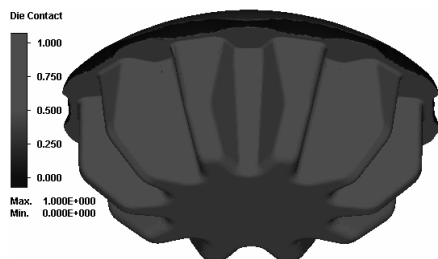


شکل (۱۹) نمودار قطر بیلت - نیروی پرس.

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های آهنگری مرسوم.

ردیف	جریان مواد (mm/sec)	نرخ کرنش (mm/mm.s)	کرنش پلاستیک مؤثر (mm/mm)	نیروی پرس (N)	قطر بیلت (mm)
۱	۲۰/۶۲	۲۰/۵۸	۲/۳۶۹	$1/839 \times 10^6$	۲۶
۲	۲۰/۴۳	۱۷/۸۵	۱/۹۷۰	$1/864 \times 10^6$	۳۲

(سر مخروطی)



شکل (۲۵) تماس بیلت با قالب مربوط به بیلت با سر مخروطی ناقص.



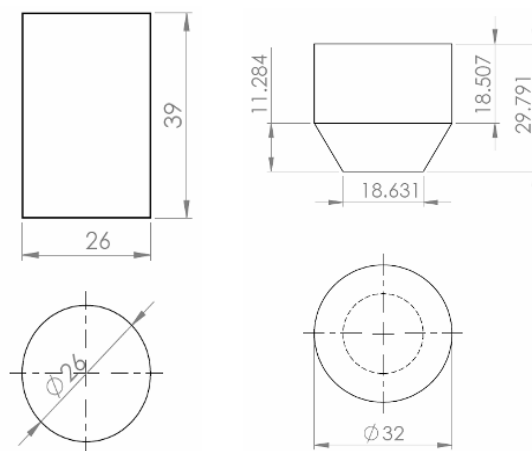
شکل (۲۶) تماس بیلت با قالب مربوط به بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر

۳-۳- روش سوم

در این آزمایش بیلت قبلی در روش دوم با قطر ۲۶ میلی‌متر طبق شکل (۲۴-ب) به روش آهنگری دورانی شبیه‌سازی شد. همانطور که مشاهده می‌شود این بیلت توانایی پر کردن حفره قالب را به روش آهنگری مرسوم در روش دوم را نداشته ولی همانطور که در شکل (۲۷) مشاهده می‌شود تمام حفره قالب از مواد خام پر شده است. در نرم‌افزار DEFORM نواحی از بیلت که با جداره قالب در تماس می‌باشد به رنگ آبی هستند. لذا همانطور که در شکل دیده می‌شود تمام قسمت‌های دنده آبی است و این پدیده نشان‌دهنده این موضوع است که در روش آهنگری به صورت دورانی به دلیل انحراف سنبه نسبت به محور ماشین و حرکت دورانی قالب بالایی موادی که در روش دوم (شکل ۲۶) توانایی پر کردن گوشه‌های دنده را نداشته‌اند اما در روش دورانی این مواد به راحتی گوشه‌های دنده را از مواد خام پر

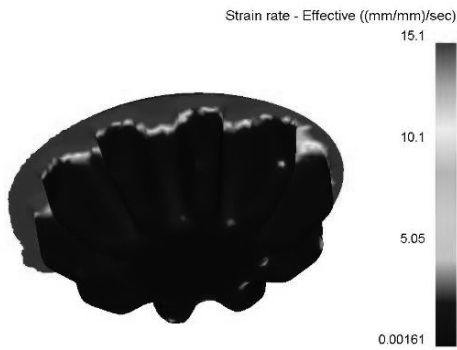
۳-۲- روش دوم

در این روش شبیه‌سازی بر روی دو بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر و بیلت با سر مخروطی ناقص با حجم ثابت (شکل ۲۴) صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول (۳) مشخص شده است. طبق نتایج به دست آمده کمترین نیروی مربوط به بیلت با قطر ۲۶ میلی‌متر است. ولی لازم به ذکر است که این بیلت قادر به پر کردن تمام حفره قالب نیست ولی بیلت با سر مخروطی ناقص با همین حجم قادر به پر کردن تمامی حفره قالب شد. این نتیجه در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) نشان داده شده است. در شکل (۲۵) تمام قسمت‌های دنده‌ها کاملاً پررنگ (قرمز رنگ) است که نشانگر تماس کامل مواد با بدنه حفره قالب است. در شکل (۲۶) گوشه‌های دنده به رنگ متفاوت (آبی رنگ) دیده می‌شود که نشان‌دهنده این است که مواد در این قسمت‌ها با حفره قالب تماس نداشته و توانایی پر کردن تمام حفره قالب را نداشته‌اند.



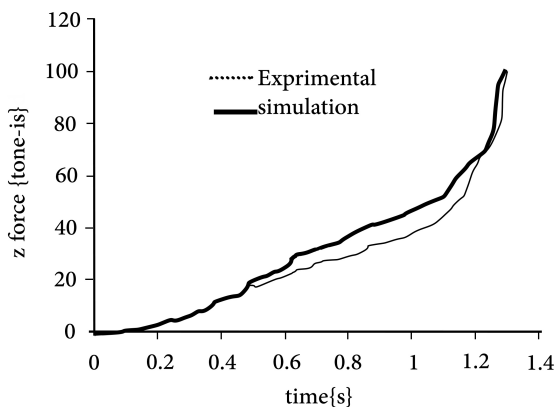
شکل (۲۴) شماتیکی از ابعاد بیلت‌های مورد آزمایش.

نتیجه حاصل از آزمایش این است که هندسه بیلت تأثیر به‌سزایی در پر کردن حفره قالب خواهد داشت. در این روش حجم بیلت نسبت به روش اول ۵۳۷/۱۶ میلیمتر مکعب کاهش پیدا کرده است.



شکل (۳۰) نرخ کرنش در آهنگری دورانی.

در پایان شبیه سازی به روش آهنگری دورانی توسط نرم افزار DEFORM، مقایسه ای عددی و تجربی در تناژ پرس به روش آهنگری دورانی صورت گرفت. نتیجه مقایسه در شکل (۳۱) قابل مشاهده است. نتایج حاصل از شبیه سازی بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر به روش آهنگری دورانی نیز در جدول (۴) مشخص شده است.



شکل (۳۱) مقایسه تجربی و عددی تناژ پرس در آهنگری دورانی بیلت با قطر ۲۶ میلی متر.

جدول (۴) نتایج آزمایشهای آهنگری دورانی بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر.

جریان مواد (mm/sec)	نرخ کرنش (mm/mm.s)	کرنش پلاستیک مؤثر (mm/mm)	نیروی پرس (N)	قطر بیلت (mm)
۸/۲	۱۵/۱	۲/۲	۹/۰۹×۱۰ ^۵	۲۶

۴- مقایسه ریز ساختارها

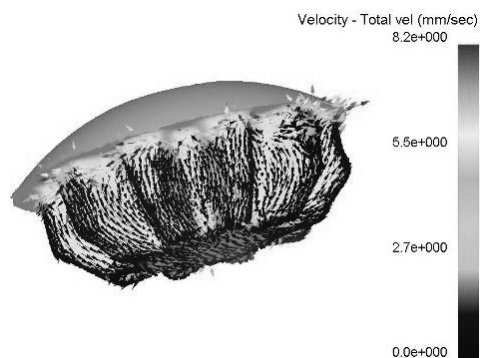
۴-۱- مقایسه ریز ساختار در چرخ دنده ها

در انتها مقایسه ای بین ریز ساختار قطعه تولید شده به روش آهنگری و همچنین قطعه تولید شده به روش ماشینکاری بعد از اتمام آزمایشهای متالوگرافی صورت گرفت. آزمایشهای متالوگرافی در دو نقطه مغز و سطح چرخ دنده ها و در دو

کرده است زیرا در روش دورانی مواد به دلیل انحراف و حرکت مداری سنبه براحتی به اطراف توزیع و جریان می یابند به شکل (۲۸) توجه شود. این پدیده در آهنگری مرسوم به مراتب مشکل تر است و افزایش چند برابری تناژ پرس به همراه دارد.

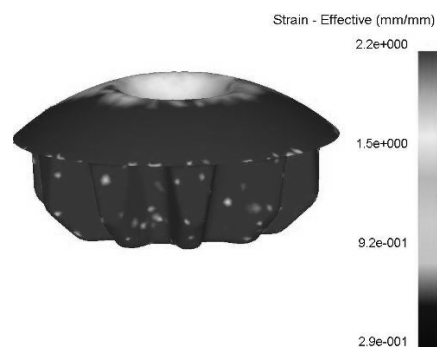


شکل (۲۷) تماس بیلت با قالب مربوط به بیلت با قطر ۲۶ میلیمتر در آهنگری دورانی.

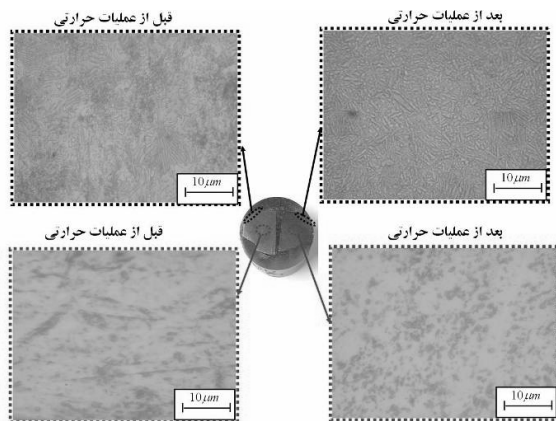


شکل (۲۸) جریان مواد در آهنگری دورانی.

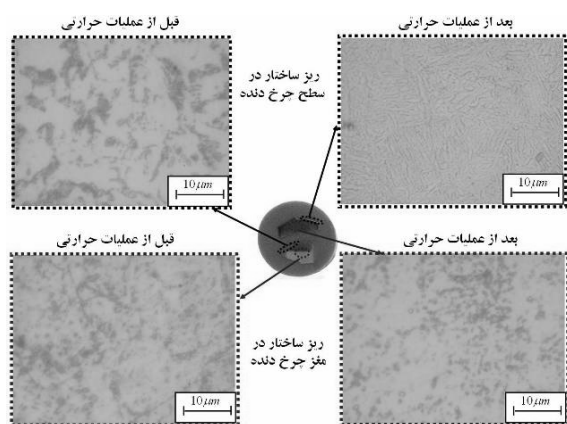
در شکل های (۲۹) و (۳۰) به ترتیب میزان کرنش پلاستیک مؤثر و نرخ کرنش در نقاط مختلف چرخ دنده تولید شده به روش آهنگری دورانی نشان داده شده است.



شکل (۲۹) کرنش پلاستیک مؤثر در آهنگری دورانی.



شکل (۳۴) ریز ساختار قبل و بعد از عملیات حرارتی در نواحی مختلف چرخ دنده تولید شده به روش آهنگری.



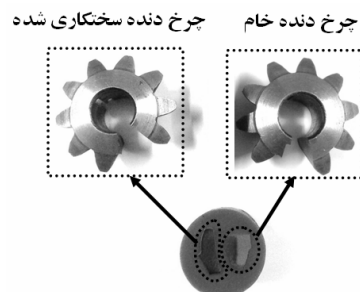
شکل (۳۵) ریز ساختار قبل و بعد از عملیات حرارتی در نواحی مختلف چرخ دنده تولید شده به روش ماشینکاری.

با توجه به اینکه در دنده‌ها سختی در سطح و چقرمگی در مغز مورد اهمیت است، این امر تنها در نمونه آهنگری شده قابل مشاهده است. زیرا از خصوصیات مارتنزیت ریز تر سختی بیشتر، مدول برشی، استحکام کششی و استحکام حد نهایی بیشتر است. به لحاظ نرمی و چقرمه بودن در مغز فرایند آهنگری تنها فرایندی است که بیشترین چقرمگی را به لحاظ بریده نشدن الیاف فلز توسط لبه برنده ابزار از خود نشان می‌دهد.

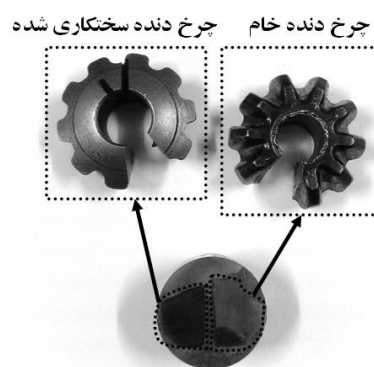
۴-۲- مقایسه ریزساختار در قالبها

در همین راستا مقایسه ریزساختاری در قالبی که ۵۰۰۰ قطعه تولید کرده و قالبی که ۱۰۰۰۰۰ قطعه تولید کرده انجام شد و نتایج حاصل از این آزمایش در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است. جزئیات کامل ریز ساختار قالبها را می‌توان در شکل‌های (۳۶) و (۳۷) مشاهده کرد. لازم به ذکر است که ترکیب شیمیایی محلول اچ، محلولی از اسید نیتریک و الکل می‌باشد.

حالت قبل و بعد از فرایند عملیات حرارتی صورت گرفت. در شکل‌های (۳۲) و (۳۳) شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده‌ها که مورد آزمایش متالوگرافی واقع گردید نشان داده شده است.



شکل (۳۲) شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده‌های ماشینکاری شده.



شکل (۳۳) شماتیکی از نواحی برش خورده چرخ دنده‌های آهنگری شده.

جزئیات کامل ریزساختارها در اشکال (۳۴) و (۳۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در سطح چرخ دنده تولید شده به روش آهنگری دورانی بعد از انجام عملیات حرارتی مارتنزیت‌های ریز با فواصل کم مشاهده شد. ولی در سطح چرخ دنده تولید شده به روش ماشینکاری مارتنزیت‌های درشت‌تر و با فواصل بیشتری نسبت به نمونه آهنگری شده مشاهده شد. وجود مارتنزیت‌های ریز در چرخ دنده آهنگری شده به این دلیل است که این چرخ دنده‌ها به روش آهنگری دورانی و از نوع سرد تولید می‌شوند. در صورتی که پیش‌فرم چرخ دنده‌های تولید شده بامشینکاری طبق شکل (۱۲) روش آهنگری مرسوم و از نوع داغ تولید شده لذا این چرخ دنده‌ها به دمای بحرانی خواهند رسید و سطح دندانه‌ها قبل از عملیات حرارتی کاملاً فریتی و پرلیتی شده و بعد از اتمام عملیات حرارتی سطح دارای مارتنزیت‌های درشت‌تر با فواصل بیشتری خواهند بود.

۵- نتیجه گیری

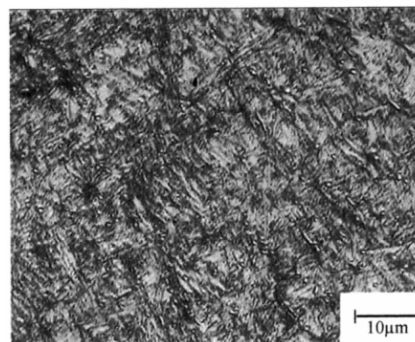
پس از انجام شبیه سازی بر روی فرایند آهنگری چرخ دنده مخروطی نتایج حاکی از این است که:

- افزایش قطر بیلت که به کاهش ارتفاع بیلت منجر می شود، باعث افزایش نیروی پرس خواهد شد.
- در آهنگری مرسوم با توجه به اینکه حجم بیلت به قطر ۲۶ میلی متر برابر با حجم بیلت با سر مخروطی ناقص بود ولی توانایی پر کردن تمامی حفره قالب را نداشته و گوشه های دنده در داخل قالب پر نمی شد. ولی بیلت با سر مخروطی ناقص به خوبی تمامی حفره قالب را پر می کرد این پدیده حاکی از آن است که هندسه بیلت نقش به سزایی در پر کردن حفره قالب دارد.
- بیلت با قطر ۲۶ میلی متر در آهنگری مرسوم توان پر کردن حفره قالب را ندارد ولی همان بیلت به راحتی توسط آهنگری دورانی و با تناژی کمتر از آهنگری مرسوم تمام حفره قالب را پر نموده است. لذا انتخاب روش تولیدی مناسب تأثیر به سزایی در بهینه سازی ابعاد بیلت خواهد داشت.
- با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی آهنگری دورانی و مقایسه آن با نتایج تجربی مشخص شد که میزان تناژ پرس در آهنگری دورانی به مراتب کمتر از تناژ در آهنگری مرسوم است.
- قدرت پرکنندگی حفره قالب از مواد خام در آهنگری دورانی به مراتب بیشتر از آهنگری مرسوم است.
- با توجه به آزمایش های متالوگرافی بر روی هر دو دنده حاصل از فرایند آهنگری و ماشینکاری نتایج حاصله بیانگر آن است که نوع فرایند تولید قطعات قبل از انجام عملیات حرارتی تأثیر به سزایی در تغییر ریز ساختار دارد.

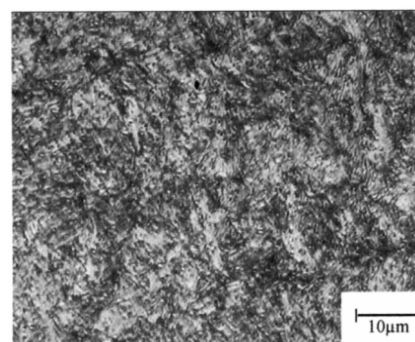
۶- مراجع

[۱] بیگلری ف.، صادقی م.، طراحی قالب های فورج، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان ۱۳۸۶.

[2] Johnson J.H., Kiepur R.T., *Metale Hanbook Ninth Edition Vol. 14 Forming and Forging*, ASM International, 1993.



شکل (۳۶) ریز ساختار مربوط به قالب با ۵۰۰۰ قطعه تولیدی با بزرگ نمایی $1000 \times$.



شکل (۳۷) ریز ساختار مربوط به قالب با ۱۰۰۰۰۰ قطعه تولیدی با بزرگ نمایی $1000 \times$.

جدول (۵) نتایج متالوگرافی از قالب با ۵۰۰۰ قطعه تولیدی.

توزیع ذرات پس از پولیش	مقدار زیادی ذرات کاربیدی به همراه مقدار اندکی ذرات احتمالاً سولفیدی
ریز ساختار نمونه پس از اچ	ریز ساختار شامل مارتنزیت تمپر شده به همراه ذرات ریز کاربیدهای کروی و مقداری فاز فریت می باشد. اندازه بسته های مارتنزیت در محدوده ASTM 8-11 (قطر متوسط $22/6 - 7/9$ میکرومتر) متغیر است.

جدول (۶) نتایج متالوگرافی از قالب با ۱۰۰۰۰۰ قطعه تولیدی.

توزیع ذرات پس از پولیش	مقدار زیادی ذرات کاربیدی به همراه مقدار اندکی ذرات احتمالاً سولفیدی
ریز ساختار نمونه پس از اچ	ریز ساختار شامل مارتنزیت تمپر شده به همراه ذرات ریز کاربیدهای کروی و مقداری فاز فریت می باشد. اندازه بسته های مارتنزیت در محدوده ASTM 9-11 (قطر متوسط $15/9 - 7/9$ میکرومتر) متغیر است.

- [11] Deng X., Hua L. and Han X.H., Three-dimensional FE modelling simulation of cold rotary forging of spiral bevel gear, *Iron making and Steelmaking*, Vol. 38, 2011, pp. 101-111.
- [12] Ghaei A., Movahhedy M.R., Karimi Taheri A., Finite Element Modelling Simulation of Radial Forging of Tubes Without mandrel, *Materials and Design*, Vol. 29, 2008, pp. 867-872.
- [۱۳] ساعتچی ا.، ادريس ح.، "تاب فولاد، انتشارات ارکان، بهار ۱۳۸۴.
- [3] Song J.H., Im Y.T., Process Design For Closed-Die Forging of Bevel Gear by Finite Element Analyses, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 193, 2007, pp. 1-7.
- [4] Cho J.R., Kang W.J., Distortions Induced by Heat Treatment of Automotive Bevel Gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 154, 2004, pp. 476-481.
- [5] Bramley A.N., and D. J. Mynors, The Use of Forging Simulation Tools, *Materials and Design*, Vol. 21, 2000, pp. 279-286.
- [6] Bariani P.F., Bruschi S., and Nergro T.D., Integrating Physical and Numerical Simulation Techniques to Design the Hot forging Process of Stainless Steel Turbine Blades, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 44, 2004, pp. 945-951.
- [7] Cheng L.V., Zhang L., Zhenguiun M.U., Qingan T., and Quying Z., 3DFEM Simulation of the Multi- Stage Forging Process of a Gas Turbine Compressor Blade, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, 2008, pp 463- 470.
- [8] Choi S.K., Chun M.S., Van Tyne C.J., Moon Y.H., Optimization of Open Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, 2006, pp. 88-95.
- [9] Liu J., Cuia Z., Hot forging process design and parameters determination of magnesium alloy AZ31B spur bevel gear, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 5871-5880.
- [10] Deng X., Hua L., Han X., Song Y., Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear, *Materials and Design*, Vol. 32, 2011, pp. 1376-1389.