دانشکده فنی مکانیک
گروه مهندسی ساخت وتولید

**جلسه دفاعیه از:**

**پایان نامه**

**برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک – ساخت و تولید**

**عنوان**

# تحلیل عددی و تجربی فرایند فورج دقیق چرخدنده‌های ساده

استاد راهنما

**دکترمحمد زادشکویان**

اساتید مشاور:

**دکترمحمد زهساز**

**مهندس محمد ملتجی حق**

پژوهشگر

**احسان عبدی سبوحی**

۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به :

# پدر و مادرم

که با محبت‌های بی دریغ خود همواره یاریگرم بودند.

## تقدیر و تشکر

با سپاس و قدردانی فراوان از زحمات بی‌شائبه اساتید ارجمند جناب آقای دکترمحمد زادشکویان و دکترمحمد زهساز و مهندس محمد ملتجی‌حق که از راهنمایی‌های خالصانه ایشان در انجام این تحقیق بهره‌مند شدم.

همچنین وظیفه خود می‌دانم تشکر خود را به حضور دوستان عزیزم مهندس حسین جعفرزاده و مهندس حیدر امجدی که یاریگر اینجانب بوده‌اند، تقدیم دارم که بدون کمک و همکاری ایشان این مهم انجام‌پذیر نبود.

احسان عبدی سبوحی

شهریور ۱۳۸۸

**نام‌خانوادگی‌دانشجو:** عبدی سبوحی **نام:** احسان

**عنوان پایان‌نامه:** تحلیل عددی و تجربی فرایند فورج دقیق چرخدنده‌های ساده

**استاد راهنما:** دکتر محمد زادشکویان

**اساتید مشاور:** دکتر محمد زه ساز- مهندس محمد ملتجی حق

**مقطع تحصیلی:** کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** ساخت و تولید

**دانشگاه:** تبریز **دانشکده:** فنی‌مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۱۳۸۸

**تعداد صفحه: ۱۴۵**

**کلید واژه‌ها:** فورج دقیق ـ روش المان محدود ـ چرخدنده ساده- آزمایش تجربی

**چکیده:**

فورج دقیق یکی از پیشرفت‌های جدید در زمینه آهنگری است که به خاطر مزایایی که دارد از سایر فرایندهای آهنگری متمایز شده است. هدف از این فرایند تولید قطعات با شکل نهایی یا حداقل نزدیک به شکل نهایی در شرایط فورج معمولی است. چرخدنده‌های ساده از قطعاتی هستند که در صنعت کاربرد زیادی دارند. دو گروه از روش های ساخت یعنی روش برشی و روش غیر برشی برای تولید چرخدنده ها مورد استفاده قرار می گیرند. آهنگری چرخدنده‌های ساده یکی از روش‌های غیر برشی است که با توجه به تقاضای گسترده از طرف صنعت برای تولید چرخنده‌های با استحکام بالا به کار می‌رود. از جمله مزایای فورج دقیق چرخدنده‌ها در مقایسه با روش ماشینکاری می‌توان به به خواص مکانیکی بهتر و استحکام بیشتر به دلیل بهبود ریز ساختار در اثر کار مکانیکی، مصرف ماده خام کمتر، نرخ تولید بالا و از همه مهمتر حذف عملیات ماشینکاری و برشکاری بعدی و در نتیجه کاهش زمان و هزینه تولید اشاره کرد.

در این تحقیق فورج دقیق چرخدنده‌های ساده با روش تحلیل عددی با استفاده از المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر پارامترهای هندسی چرخدنده نظیر تعداد دندانه، مدول و ارتفاع و همچنین قطر بیلت اولیه و شرایط تماسی بین قالب‌ها و قطعه‌کار مطالعه شده است. با توجه به اینکه بیشتر چرخدنده‌ها بعد از تولید با روش‌های گوناگون به محور اتصال می‌یابند لذا به منظور حذف این عمل در ادامه، فرایند فورج چرخدنده‌های متصل به محور و یا همان کله‌زنی چرخدنده‌های ساده مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر پارامترهای ذکر شده بر این فرایند نیز بررسی شده است. برای انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود از نرم‌افزار DEFORM 3D استفاده شده‌است. در قسمت انتهایی به منظور معتبرسازی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، آزمایشات تجربی برای ساخت یک چرخدنده

صنعتی که در تراکتور 285-4WD مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام گرفته است. برای انجام آزمایش‌های تجربی از ماده سرب استفاده شده است.

نتایج بررسی های عددی و تجربی نشان می‌دهند که در فورج دقیق چرخدنده‌های ساده باید قطر بیلت اولیه همواره نزدیکترین مقدار به ریشه چرخدنده باشد تا هم باعث کاهش نیروی شکل‌دهی شود و هم شکل‌گیری گوشه‌های چرخدنده با مشکل مواجه نشود. بررسی تاثیر تعداد دندانه‌ها بیانگر این است که با افزایش تعداد دندانه‌ها مقدار نیروی لازم افزایش پیدا می‌کند و با توجه به مقادیر فشار ویژه تعداد دندانه‌های بهینه چرخدنده برای شکل‌دهی به روش فورج دقیق ۱۰ تا ۲۰ دندانه می‌باشد. همچنین به منظور دستیابی به سیلان مواد یکنواخت‌تر با نیروی کمتر باید ضریب اصطکاک مابین سطوح در کمترین مقدار ممکن باشد. همچنین بررسی مقادیر تنش و کرنش موثر نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش و کرنش در ریشه چرخدنده اتفاق می‌افتد که در فورج چرخدنده‌های ساده متصل به محور سطح زیرین گوشه پایینی نیز به این مناطق اضافه می‌شود. همچنین مقایسه نتایج بدست‌آمده از روش المان محدود با نتایج تجربی نشان‌دهنده قابل اعتماد بودن نتایج بدست‌آمده از تحلیل عددی در فرایند فورج دقیق می‌باشد.

**نام‌خانوادگی‌دانشجو:** عبدی سبوحی **نام:** احسان

**عنوان پایان‌نامه:** تحلیل عددی و تجربی فرایند فورج دقیق چرخدنده‌های ساده

**استاد راهنما:** دکتر محمد زادشکویان

**اساتید مشاور:** دکتر محمد زه ساز- مهندس محمد ملتجی حق

**مقطع تحصیلی:** کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** ساخت و تولید

**دانشگاه:** تبریز **دانشکده:** فنی‌مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۱۳۸۸

**تعداد صفحه: ۱۴۵**

**کلید واژه‌ها:** فورج دقیق ـ روش المان محدود ـ چرخدنده ساده- آزمایش تجربی

**چکیده:**

فورج دقیق یکی از پیشرفت‌های جدید در زمینه آهنگری است که به خاطر مزایایی که دارد از سایر فرایندهای آهنگری متمایز شده است. هدف از این فرایند تولید قطعات با شکل نهایی یا حداقل نزدیک به شکل نهایی در شرایط فورج معمولی است. چرخدنده‌های ساده از قطعاتی هستند که در صنعت کاربرد زیادی دارند. دو گروه از روش های ساخت یعنی روش برشی و روش غیر برشی برای تولید چرخدنده ها مورد استفاده قرار می گیرند. آهنگری چرخدنده‌های ساده یکی از روش‌های غیر برشی است که با توجه به تقاضای گسترده از طرف صنعت برای تولید چرخنده‌های با استحکام بالا به کار می‌رود. از جمله مزایای فورج دقیق چرخدنده‌ها در مقایسه با روش ماشینکاری می‌توان به به خواص مکانیکی بهتر و استحکام بیشتر به دلیل بهبود ریز ساختار در اثر کار مکانیکی، مصرف ماده خام کمتر، نرخ تولید بالا و از همه مهمتر حذف عملیات ماشینکاری و برشکاری بعدی و در نتیجه کاهش زمان و هزینه تولید اشاره کرد.

در این تحقیق فورج دقیق چرخدنده‌های ساده با روش تحلیل عددی با استفاده از المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر پارامترهای هندسی چرخدنده نظیر تعداد دندانه، مدول و ارتفاع و همچنین قطر بیلت اولیه و شرایط تماسی بین قالب‌ها و قطعه‌کار مطالعه شده است. با توجه به اینکه بیشتر چرخدنده‌ها بعد از تولید با روش‌های گوناگون به محور اتصال می‌یابند لذا به منظور حذف این عمل در ادامه، فرایند فورج چرخدنده‌های متصل به محور و یا همان کله‌زنی چرخدنده‌های ساده مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر پارامترهای ذکر شده بر این فرایند نیز بررسی شده است. برای انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود از نرم‌افزار DEFORM 3D استفاده شده‌است. در قسمت انتهایی به منظور معتبرسازی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، آزمایشات تجربی برای ساخت یک چرخدنده

صنعتی که در تراکتور 285-4WD مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام گرفته است. برای انجام آزمایش‌های تجربی از ماده سرب استفاده شده است.

نتایج بررسی های عددی و تجربی نشان می‌دهند که در فورج دقیق چرخدنده‌های ساده باید قطر بیلت اولیه همواره نزدیکترین مقدار به ریشه چرخدنده باشد تا هم باعث کاهش نیروی شکل‌دهی شود و هم شکل‌گیری گوشه‌های چرخدنده با مشکل مواجه نشود. بررسی تاثیر تعداد دندانه‌ها بیانگر این است که با افزایش تعداد دندانه‌ها مقدار نیروی لازم افزایش پیدا می‌کند و با توجه به مقادیر فشار ویژه تعداد دندانه‌های بهینه چرخدنده برای شکل‌دهی به روش فورج دقیق ۱۰ تا ۲۰ دندانه می‌باشد. همچنین به منظور دستیابی به سیلان مواد یکنواخت‌تر با نیروی کمتر باید ضریب اصطکاک مابین سطوح در کمترین مقدار ممکن باشد. همچنین بررسی مقادیر تنش و کرنش موثر نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش و کرنش در ریشه چرخدنده اتفاق می‌افتد که در فورج چرخدنده‌های ساده متصل به محور سطح زیرین گوشه پایینی نیز به این مناطق اضافه می‌شود. همچنین مقایسه نتایج بدست‌آمده از روش المان محدود با نتایج تجربی نشان‌دهنده قابل اعتماد بودن نتایج بدست‌آمده از تحلیل عددی در فرایند فورج دقیق می‌باشد.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

**مقدمه..... ۱**

**فصل اول/ "معرفی فرایند آهنگری و بررسی منابع"**

**۱-۱) معرفی فرایند آهنگری..... ۵**

۱-۱-۱) تاریخچه پیدایش آهنگری..... ۵

۱-۱-۲) طبقه‌بندی فرایندهای شکل‌دهی فلزات..... ۷

۱-۱-۳) فرایندهای آهنگری..... ۸

۱-۱-۴) طبقه‌بندی فرایندهای آهنگری..... ۸

۱-۱-۴-۱) از لحاظ دمای آهنگری..... ۸

۱-۱-۴-۲) از لحاظ شکل قالب..... ۱۰

۱-۱-۵) انواع تجهیزات آهنگری..... ۱۴

۱-۱-۶) پیشرفت‌های اخیر در فرایند آهنگری..... ۱۸

**۱-۲) معرفی فرایند فورج دقیق..... ۲۲**

۱-۲-۱) مقدمه..... ۲۲

۱-۲-۲) مزایای فورج دقیق..... ۲۲

۱-۲-۳) کاربردهای فورج دقیق..... ۲۴

۱-۲-۳-۱) ملاحظات فیزیکی..... ۲۴

۱-۲-۳-۲) ملاحظات اقتصادی..... ۲۵

فهرست مطالب


۱-۲-۳-۳) ملاحظات طراحی قالب..... ۲۷

۱-۲-۳-۴) ابعاد قطعه فورج شده..... ۲۷

۱-۲-۳-۵) قابلیت کارپذیری مواد قطعه‌کار..... ۲۸

۱-۲-۴) مدل ریاضی..... ۲۸

۱-۲-۵) مدل‌سازی فیزیکی..... ۲۹

۱-۲-۶) ملاحظات کنترل فرایند..... ۲۹

**۱-۳) تاریخچه و پیشینه تحقیق..... ۳۵**

۱-۳-۱) مدل‌سازی المان محدود..... ۳۵

۱-۳-۲) فورج دقیق چرخدنده..... ۳۶

**فصل دوم / "مطالعه عددی و تجربی فورج دقیق چرخدنده‌های ساده"**

**۲-۱) روش های تحلیل فرایندهای آهنگری..... ۴۲**

۲-۱-۱) مقدمه..... ۴۲

۲-۱-۲) کار ایده‌آل یا انرژی یکنواخت..... ۴۳

۲-۱-۳) تحلیل قاچی..... ۴۴

۲-۱-۴) تحلیل کران بالایی..... ۴۵

۲-۱-۵) نظریه میدان خط لغزش..... ۴۶

۲-۱-۶) روش اجزاء محدود در شکل دهی فلزات(FEM) ..... ۴۷

۲-۱-۶-۱) اساس فرمول بندی اجزاء محدود..... ۴۸

۲-۱-۶-۲) اجرای کامپیوتری روش اجزاء محدود..... ۴۹

**۲-۲) روش‌های برآورد تنش سیلان و ضریب اصطکاک..... ۵۵**

۲-۲-۱) مقدمه..... ۵۵

۲-۲-۲) روش‌های تعیین تنش سیلان..... ۵۵

۲-۲-۳) روش‌های تعیین ضریب اصطکاک..... ۵۹

۲-۲-۴) نتیجه‌گیری..... ۶۴

**۲-۳) مطالعه عددی فرایند فورج دقیق چرخدنده..... ۶۶**

۲-۳-۱) تعیین خواص ماده قطعه‌کار..... ۶۶

۲-۳-۲) تعیین شرایط سطح تماس..... ۷۱

۲-۳-۳) آماده سازی پارامترهای هندسی فرایند..... ۷۳

۲-۳-۴) مراحل مدل‌سازی فرایند..... ۷۶

۲-۳-۴-۱) وارد کردن مدلهای هندسی قالب‌ها و قطعه‌کار..... ۷۶

۲-۳-۴-۲) اعمال خواص مکانیکی جسم..... ۷۷

۲-۳-۴-۳) المان‌بندی بیلت اولیه..... ۷۷

۲-۳-۴-۴) اعمال کنترل‌های شبیه‌سازی..... ۷۹

۲-۳-۴-۵) اعمال شرایط تماسی دو قطعه..... ۸۰

۲-۳-۵) نتایج حاصل از مطالعه عددی تاثیر پارامترهای موثر بر فرایند فورج دقیق چرخدنده..... ۸۱

۲-۳-۵-۱) بررسی تاثیر پارمترهای مختلف در فرایند فورج دقیق چرخدنده‌های ساده..... ۸۱

۲-۳-۵-۱-۱) بررسی تاثیر قطر بیلت اولیه..... ۸۱

۲-۳-۵-۱-۲) بررسی تاثیر پارامترهای هندسی چرخدنده..... ۸۶

۲-۳-۵-۱-۲-۱) بررسی تاثیر تعداد دندانه‌ها..... ۸۶

۲-۳-۵-۱-۲-۲) بررسی تاثیر مدول چرخدنده..... ۹۰

۲-۳-۵-۱-۲-۳) بررسی تاثیر ارتفاع چرخدنده..... ۹۲

۲-۳-۵-۱-۳) بررسی تاثیر شرایط تماسی بین بیلت و قالب‌ها..... ۹۵

۲-۳-۵-۲) بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در فرایند فورج دقیق چرخدنده‌های ساده متصل به محور..... ۹۹

۲-۳-۵-۲-۱) بررسی تاثیر پارامترهای هندسی چرخدنده..... ۹۹

۲-۳-۵-۲-۱-۱) بررسی تاثیر تعداد دندانه‌های چرخدنده..... ۹۹

۲-۳-۵-۲-۱-۲) بررسی تاثیر مدول چرخدنده..... ۱۰۴

۲-۳-۵-۲-۱-۳) بررسی تاثیر ارتفاع چرخدنده..... ۱۰۶

۲-۳-۵-۲-۲) بررسی تاثیر شرایط تماسی بین بیلت و قالب‌ها..... ۱۰۹

**۲-۴) مطالعه تجربی فرایند و مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی..... ۱۱۳**

۲-۴-۱) مقدمه..... ۱۱۳

۲-۴-۲) روش اجرای آزمایشات تجربی..... ۱۱۴

۲-۴-۲-۱) آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش تجربی..... ۱۱۶

۲-۴-۲-۲) ساخت مجموعه قالب فرایند فورج دقیق چرخدنده ساده..... ۱۱۶

۲-۴-۳) نتایج حاصل از مطالعه تجربی فرایند و مقایسه با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی عددی..... ۱۲۱

۲-۴-۳-۱) بررسی تاثیر قطر بیلت اولیه..... ۱۲۱

۲-۴-۳-۲) بررسی تاثیر ارتفاع چرخدنده..... ۱۲۷

۲-۴-۳-۳) بررسی تاثیر شرایط سطح تماس قالب و قطعه‌کار..... ۱۲۹

۲-۴-۳-۴) بررسی نیروی شکل‌دهی و نحوه سیلان فلز در فرایند کله‌زنی چرخدنده..... ۱۳۱

**۲-۴-۴) نتیجه‌گیری.....۱۳۵**

**فصل سوم / "نتیجه‌گیری و پیشنهادات"**

**۳-۱) نتیجه‌گیری.....۱۳۷**

**۳-۲) پیشنهادات..... ۱۴۰**

**منابع و مراجع.....۱۴۱**

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**

شکل۱-۱ تصویری از اولین آهنگران در حال ساخت قطعه‌ای فولادی با استفاده از چکش و سندان.....۶

شکل۱-۲ مجموعه‌ای از قطعات فورج شده به روش فورج سرد، گرم و داغ [۶].....۹

شکل ۱- ۳ الف) فورج قالب باز ب) فورج قالب بسته [۵].....۱۰

شکل ۱-۴ مراحل مختلف تولید انواع اشکال متداول در فورج باز [۱].....۱۱

شکل۱-۵ نمای شماتیک از قالب بالایی، پایینی و پلیسه در فورج قالب بسته [۲].....۱۲

شکل۱-۶ مقایسه فورج قالب بسته پلیسه‌دار و بدون پلیسه. الف ) ابتدای فرایند. ب) انتهای فرایند [۲].....۱۳

شکل۱-۷ تجهیزات آهنگری: الف) چکش ب) پرس پیچی چ) پرس مکانیکی د)پرس هیدرولیکی ه) پرس سطح افزایی افقی [۵].....۱۵

شکل۱-۸ نمایی از فرایند سطح افزایی افقی. الف) در هنگام تغذیه بیلت ب) در حین انجام فرایند.....۱۷

شکل ۱-۹ فرایند آهنگری شعاعی [۱].....۱۸

شکل۱-۱۰ فرایند آهنگری چرخشی ( آهنگری مداری) [۱].....۱۹

شکل ۱-۱۱ نمایی از فرایند پودر فورجینگ[۲].....۲۰

شکل۱-۱۲ الف) فرایند فورج معمولی یا فورج سنتی. ب) فرایند فورج دقیق.....۲۳

شکل۱-۱۳ مقایسه هزینه تولید یک قطعه تیتانیومی با استفاده از دو روش ماشینکاری و فورج دقیق [۹].....۲۶

شکل۲-۱ نمودار جریان اجرای فرایند المان محدود[۲].....۵۱

شکل۲-۲ فرایند تحلیل اجزای محدود.....۵۳

شکل۲-۳ مقایسه نمونه آزمایش فشار الف) نمایی از نمونه که نشان دهنده شیارهای کم عمق روانکاری است. ب) شکل نمونه قبل و بعد از آزمایش.....۵۶

شکل ۲-۴ الف) نمونه با شیارهای مارپیچ ب) نمونه‌های راستگایف.....۵۸

شکل۲-۵ الف) اصطکاک کم ب) اصطکاک زیاد.....۶۱

فهرست اشکال و جداول

شکل۲-۶ جریان فلز در آزمایش حدیده‌کاری پسرو دو فنجانی.....۶۲

شکل۲-۷ تصویر یک قطعه خام اولیه و قطعه بعد از مرحله آپست.....۶۳

شکل۲-۸ نمونه‌های سربی بکار رفته برای آزمایش فشار.....۶۷

شکل ۲-۹ دستگاه پرس هیدرولیکی و نمونه آزمایش فشار قبل از تغییرشکل.....۶۸

شکل۲-۱۰ نمونه آزمایش فشار قبل از تغییرشکل.....۶۹

شکل۲-۱۱ نمونه آزمایش فشار بعد از تغییرشکل.....۶۹

شکل۲-۱۲نمودار تنش-کرنش حقیقی سرب بکار رفته در آزمایشات.....۷۰

شکل ۲-۱۳نمونه‌های قبل و بعد از آزمایش فشار.....۷۱

شکل۲-۱۴ نمونه‌های عملی حاصل از آزمایش فشار استوانه برای تعیین ضریب اصطکاک (A:بااستفاده از گریس،B :استفاده از روغن موتور، C:بدون استفاده از ماده روانکار).....۷۲

شکل۲-۱۵ مدل نمونه‌ای از چرخدنده مدل‌سازی شده.....۷۴

شکل۲-۱۶ مجموعه مونتاژ شده قالب و قطعه‌کار.....۷۶

شکل۲-۱۷ الف) المان جهار وجهی. ب) بیلت اولیه المان‌بندی شده و قطعه‌کار بعد از انجام فرایند.....۷۹

شکل ۲-۱۸ اعمال شرایط تماسی در گره‌های موجود در سطح تماس قالب-قطعه‌کار.....۸۰

شکل۲-۱۹ نمودار کورس-نیرو برای شکل‌دهی چرخدنده ای با ۱۵ دندانه، ارتفاع ۲۰ میلی‌متر، زاویه فشار ۲۰ درجه با ضریب اصطکاک ۰.۰۴ با قطر بیلت متفاوت . الف) مدول۳ ب)مدول۴ .....۸۲

شکل۲-۲۰ مقادیر توزیع کرنش موثر برای چرخدنده‌ای با تعداد ۱۵ دندانه، مدول ۳، ارتفاع ۲۰ میلی‌متر ،زاویه فشار ۲۰درجه با قطر بیلت اولیه متفاوت.....۸۴

شکل۲-۲۱ چرخدنده شکل‌یافته از بیلت‌های با قطر متفاوت در ۰.۳ میلی‌متر مانده به انتهای فرایند شکل‌دهی.با مدول۴، تعداد دندانه ۱۵، ارتفاع چرخدنده ۲۰، ضریب اصطکاک ۰.۰۴ .....۸۵

شکل۲-۲۲ نمودار کورس- نیرو برای چرخدنده‌هایی با مدول ۳ و تعداد دندانه‌های متفاوت.....۸۶

شکل۲-۲۳ نمودار تغییرات فشار ویژه در برابر درصد کاهش ارتفاع برای چرخدنده‌هایی با مدول۳.....۸۷

شکل ۲-۲۴ توزیع تنش موثر در چهار چرخدنده با مدول یکسان و تعداد دندانه‌های متفاوت.....۸۸

شکل۲-۲۵ تغییرات کرنش موثر در چرخدنده‌هایی با مدول یکسان و تعداد دندانه متفاوت.....۸۹

شکل۲-۲۶ نمودار تغیرات فشار ویژه برای چرخدنده‌هایی با مدول ۲ و تعداد دندانه‌های مختلف.....۹۰

فهرست اشکال و جداول

شکل۲-۲۷ نمودار تغیرات فشار ویژه برای چرخندنده‌هایی با مدول ۴ و تعداد دندانه‌های مختلف.....۹۱
شکل۲-۲۸ نمودار تغیرات فشار ویژه برای چرخندنده‌هایی با مدول ۵ و تعداد دندانه‌های مختلف.....۹۱
شکل۲-۲۹ نمودار کورس-نیرو برای شکل‌دهی چرخندنده‌هایی با ارتفاع مختلف.....۹۲
شکل۲-۳۰ تغییرات مقادیر فشار ویژه با افزایش ارتفاع چرخندنده.....۹۳
شکل ۲-۳۱ نحوه پر شدن قالب و تغییرات سرعت سیلان شعاعی با افزایش ارتفاع چرخندنده.....۹۴
شکل۲-۳۲ تغییرات حداکثر نیروی شکل‌دهی با تغییر ضریب اصطکاک سطح تماس.....۹۵
شکل۲-۳۳ توزیع سرعت سیلان شعاعی برای چرخندنه‌ای با ۱۵ دندانه، مدول ۳ در ضرایب اصطکاک متفاوت.....۹۶
شکل۲-۳۴ پر شدن گوشه پایینی قطعه‌کار در انتهای فرایند و افزایش آنی سرعت سیلان در این قسمت.....۹۷
شکل۲-۳۵ مراحل مختلف تکمیل شکل‌گیری چرخندنه بعد ار ۲۷ درصد کاهش ارتفاع.....۹۸
شکل۲-۳۶ تغییرات مقدار فشار ویژه با درصد کاهش ارتفاع برای چرخندنده‌هایی با تعداد دندانه‌های متفاوت.....۱۰۰
شکل۲-۳۷ مقایسه نمودار نیروی آهنگری برای دو حالت فورج چرخندنه و کله‌زنی چرخندنه.....۱۰۱
شکل۲-۳۸ توزیع کرنش موثر در چرخندنه ایجاد شده به روش کله‌زنی.....۱۰۲
شکل۲-۳۹ نحوه سیلان فلز و توزیع کرنش در قسمت‌های مختلف چرخندنه در حین فرایند کله‌زنی.....۱۰۲
شکل۲-۴۰ نحوه توزیع سرعت سیلان شعاعی در مراحل مختلف شکل‌دهی برای فرایند کله‌زنی.....۱۰۳
شکل۲-۴۱ تغییرات مقادیر فشار ویژه با افزایش درصد کاهش ارتفاع برای چرخندنده‌هایی با مدول۲ و تعداد دندانه متفاوت.....۱۰۴
شکل۲-۴۲ تغییرات مقادیر فشار ویژه با افزایش درصد کاهش ارتفاع برای چرخندنده‌هایی با مدول۴ و تعداد دندانه متفاوت.....۱۰۵
شکل۲-۴۳ تغییرات مقادیر فشار ویژه با افزایش درصد کاهش ارتفاع برای چرخندنده‌هایی با مدول۵ و تعداد دندانه متفاوت..... ۱۰۵
شکل۲-۴۴ تغییرات نیروی آهنگری با افزایش ارتفاع چرخندنده.....۱۰۶

شکل۲-۴۵ تغییرات حداکثر فشار ویژه با افزایش ارتفاع چرخدنده.....۱۰۷
شکل۲-۴۶ توزیع سرعت سیلان شعاعی در فرایند کله‌زنی چرخدنده‌هایی با ارتفاع مختلف.....۱۰۸
شکل۲-۴۷ تغییرات حداکثر نیروی شکل‌دهی با افزایش ضریب اصطکاک.....۱۰۹
شکل۲-۴۸ چگونگی توزیع سرعت سیلان شعاعی برای فرایند کله‌زنی چرخدنده در ضرایب اصطکاک متفاوت در ۱۵ درصد کاهش ارتفاع.....۱۱۰
شکل۲-۴۹ طرح کلی چرخدنده مورد مطالعه در تحلیل‌های تجربی.....۱۱۵
شکل۲-۵۰ نمونه‌های ماشینکاری شده از جنس سرب جهت آهنگری.....۱۱۶
شکل۲-۵۱ شماتیک مجموعه قالب ساخته شده برای آزمایش تجربی فرایند فورج چرخدنده ساده.....۱۱۷
شکل۲-۵۲ اجزای مختلف قالب قبل از مونتاژ.....۱۱۸
شکل۲-۵۳ مجموعه قالب مورد استفاده در فرایند فورج چرخدنده‌ها بعد از مونتاژ.....۱۱۸
شکل۲-۵۴ شماتیک مجموعه قالب ساخته شده برای آزمایش تجربی فرایند فورج چرخدنده متصل به محور.....۱۱۹
شکل۲-۵۵ مجموعه پرس هیدرولیک مورد استفاده در آزمایشات تجربی و مجموعه قالب نصب شده بر روی آن.....۱۲۰
شکل۲-۵۶ مقایسه تاثیر قطر بیلت اولیه بر نیروی شکل‌دهی در دو روش تحلیل عددی و آزمایش تجربی.....۱۲۲
شکل۲-۵۷ چرخدنده‌های ایجاد شده در آزمایش تجربی از بیلت‌های اولیه با قطر متفاوت.....۱۲۳
شکل۲-۵۸ مقایسه نحوه سیلان مواد درگوشه‌های پایینی چرخدنده.....۱۲۳
شکل۲-۵۹ نحوه سیلان فلز در محفظه قالب بعد از ۱۳/۷۵، ۲۲/۵ و ۲۸/۶درصد کاهش ارتفاع در نمونه‌های حاصل از آزمایش تجربی.....۱۲۴
شکل۲-۶۰ نحوه سیلان فلز در محفظه قالب بعد از ۱۳/۷۵، ۲۲/۵و ۲۸/۶ درصد کاهش ارتفاع در اشکال حاصل از تحلیل عددی.....۱۲۵
شکل۲-۶۱ مقایسه جبهه سیلان مواد الف) ۱۳/۷۵ درصد کاهش ارتفاع ب)۲۲/۵ درصد کاهش ارتفاع.....۱۲۶
شکل۲-۶۲ نمودارهای کورس-نیرو برای شکل‌دهی چرخدنده‌هایی با ارتفاع ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۴ میلی‌متر.....۱۲۷
شکل۲-۶۳ نمونه‌های تجربی فورج شده با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۴ میلی‌متر از جنس سرب.....۱۲۸
شکل۲-۶۴ نمودارهای کورس-نیروی حاصل از آزمایش تجربی ضرایب اصطکاک مختلف در سطح تماس.....۱۲۹
شکل۲-۶۵ تغیرات حداکثر نیروی لازم برای شکل‌دهی با افزایش ضریب اصطکاک.....۱۳۰
شکل۲-۶۶ نمونه‌های تولید شده به روش فورج دقیق در شرایط سطح متفاوت. با ضریب اصطکاک به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۲۱ .....۱۳۰

شکل۲-۶۷ مقایسه نمودار کورس نیروی حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای کله‌زنی چرخدنده.....۱۳۱
شکل۲-۶۸ نمونه‌های تجربی شکل‌گرفته در فرایند کله‌زنی چرخدنده..... ۱۳۲
شکل۲-۶۹-الف-سیلان فلز در فرایند کله‌زنی چرخدنده در ۱۲/۱، ۱۸/۲ و ۲۱ در صد کاهش ارتفاع.....۱۳۲
شکل۲-۶۹-ب سیلان فلز در فرایند کله‌زنی چرخدنده در ۱۲/۱، ۱۸/۲ و ۲۱ در صد کاهش ارتفاع در نمای دید از بالا...۱۳۳
شکل۲-۷۰ نمایش نحوه سیلان فلز در محفظه قالب بعد از ۱۲/۱، ۱۸/۲ و ۲۱ درصد کاهش ارتفاع در اشکال حاصل از تحلیل عددی.....۱۳۳
شکل۲-۷۱ مقایسه جبهه سیلان مواد الف) ۱۲/۱ درصد کاهش ارتفاع ب)۱۸/۲ درصد کاهش ارتفاع.....۱۳۴

# فهرست جداول

جدول۲-۱ مشخصه‌های روش‌های مختلف تحلیل.....۴۲
جدول۲-۲ ابعاد و مشخصات چرخدنده‌های مورد مطالعه در تحلیل عددی.....۷۵
جدول ۲-۳ ابعاد و مشخصات چرخدنده مورد مطالعه در تحلیل‌های تجربی.....۱۱۴

## مقدمه

آهنگری یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید قطعات می‌باشد. در این فرایند یک قطعه با شکل اولیه ساده مانند یک لقمه بین تکه‌های قالب به طور مومسان تغییر شکل می یابد تا شکل مطلوب نهایی بدست آید. در دهه های اخیر فرایندهای مختلف آهنگری معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می توان به فورج شعاعی، فورج مداری، فورج همدما و فورج دقیق اشاره کرد . فورج دقیق یکی از پیشرفت‌های جدید است که به خاطر مزایایی که دارد از سایر فرایندهای آهنگری متمایز شده است. هدف از این فرایند تولید قطعات با شکل نهایی یا حداقل نزدیک به شکل نهایی است[۱]. آهنگری شکل نهایی را می توان به صورت فرایند آهنگری قطعات به ابعاد نهایی، بدون نیاز به ماشینکاری پس از آهنگری تعریف نمود. درمقایسه، قطعات آهنگری شده نزدیک به شکل نهایی تا حد امکان به ابعاد نهایی قطعه مطلوب آهنگری می‌شود که پس از آن، به ماشینکاری ناچیز یا فقط به سنگ زنی نیاز دارند[۲].

از میان تمام اجزای ماشینی که وجود دارند، چرخدنده‌ها از جمله آنهایی هستند که کاربرد زیادی دارند. به عنوان مثال می توان به چرخدنده ساده که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد اشاره نمود. درصنعت دو گروه از روش‌های ساخت چرخدنده‌ها یعنی روش برشی و روش غیربرشی به کار برده می‌شود. از جمله روش‌های غیربرشی در تولید چرخدنده‌ها می توان به ریخته گری و متالورژی پودر اشاره کرد که بسته به دقت مورد نیاز و در مقادیر بالای تولید به کار برده می شوند[۳]. آهنگری چرخدنده‌های ساده یکی دیگر از روش های غیر برشی است که با توجه به تقاضای گسترده از طرف صنعت برای تولید چرخنده‌های با استحکام بالا به کار می‌رود و نیز به خاطر مزایای ذاتی این فرایند در مقایسه با روش های ماشینکاری در سال های اخیر تمایل فزاینده‌ای در تولید چرخدنده ها با تکنولوژی فورج دقیق یا فورج نزدیک به شکل نهایی وجود داشته است. از جمله مزایای فورج دقیق چرخدنده‌ها در مقایسه با روش ماشینکاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

۱- خواص مکانیکی بهتر و استحکام بیشتر به دلیل بهبود ریز ساختار در اثر کار مکانیکی.

۲- مصرف ماده خام کمتر و نهایتا کاهش هزینه تولید.

۳- کاهش عملیات ماشینکاری، برشکاری و تمام‌کاری بعدی و در نتیجه کاهش زمان و هزینه تولید.

۴- نرخ تولید بالا.

برای آهنگری چرخدنده‌های ساده چگونگی پرشدن مواد در محفظه قالب به عنوان یک عامل اساسی جهت بهبود دقت چرخدنده در نظر گرفته می‌شود. برای پر شدن کامل قالب نیز باید بتوان مقدار بار مورد نیاز را در مرحله طراحی پیش بینی