سال ۳۰، شماره ۱۳۶، صفحات ۴۲–۴۸، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/mmep.2021.125644.1825

تأثیر فرآیند مجازی بر کاهش هزینه‌های مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده موتورسیکلت CB125R

سامان خلیل‌پور آذری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

*مسئول مکاتبات: s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

◄ چکیده

دقت در طراحی اولیه چرخ‌دنده‌ها می‌تواند تا حد زیادی کارکرد مناسب جعبه‌دنده به عنوان قسمتی از سیستم انتقال نیرو در موتورهای محرک را تضمین نماید. این مقاله تأثیر اقتصادی اجرای فرآیند مجازی را که دربرگیرنده طراحی به کمک کامپیوتر و روش نمونه‌سازی سریع است، در مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده انتقال نیرو در موتورسیکلت مدل CB125R ساخت شرکت هوندا به منظور اصلاح روند سنتی موجود و کاهش هزینه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌دهد. به این منظور چرخ‌دنده‌های فلزی از روی جعبه‌دنده موتورسیکلت دمونتاژ و از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار داده شد که با توجه به اصلاحی بودن آنها، محاسباتی به منظور یافتن مدول هر جفت چرخ‌دنده درگیر با هم انجام گرفت. پس از استخراج مشخصات ابعادی چرخ‌دنده‌ها، مدل کامپیوتری تک‌تک آنها ترسیم و سپس نمونه‌های فیزیکی از آنها توسط روش پرینت سه‌بعدی با لایه‌گذاری رسوبی تولید شد. از نمونه‌های تولیدشده برای تست نحوه مونتاژپذیری اولیه چرخ‌دنده‌ها در جعبه‌دنده و اطمینان از صحت ابعادی آنها برای تولید انبوه استفاده گردید. با تأیید طراحی اولیه، تولید انبوه چرخ‌دنده‌ها با پارامترهای تعیین شده توسط ماشین‌کاری به روش هاب‌زنی آغاز شد. نتایج حاصل از پایش کاربرد فرآیند مجازی در مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های مورد بررسی در بازه پنج‌ماهه از تولید انبوه نشان می‌دهد که فرآیند مجازی میزان هزینه‌های ناشی از خطا در تولید، ایرادات مونتاژپذیری و ضایعات ایجاد شده را به ترتیب به میزان ۱۰۰، ۵۵ و ۷۱ درصد و در مجموع کل هزینه‌های تولید انبوه را به میزان ٪۳۶ کاهش داده‌است.

◄ واژگان کلیدی

مهندسی معکوس
طراحی به کمک کامپیوتر
لایه‌گذاری رسوبی
چرخ‌دنده ساده

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

The effect of virtual process on reducing reverse engineering costs of CB-125R motorcycle gearbox gears

Saman Khalilpourazary

Department of Renewable Energy, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

► Abstract

The accuracy of the initial design of the gears can significantly ensure the proper function of the gearbox as a part of the transmission systems. This paper discusses the economic impact of performing a virtual process, which includes computer-aided design and rapid prototyping, on reverse engineering of a Honda CB-125R motorcycle gearbox to modify existing traditional trends and examines the reduction of production costs. For this purpose, the gears were disassembled from the motorcycle gearbox and examined in terms of dimensions. Then, calculations were performed to find the modulus of each pair of gears involved. After extracting the dimensional characteristics of the gears, a computer model of each was drawn, and then physical samples of them were produced layer by layer by fused deposition modeling method. To ensure the dimensional accuracy of the gears for mass production, the produced samples were used to test with assembly in the gearbox. After the approval of the initial design, the mass production of gears with the determined parameters was performed by the hobbing machine. The results of monitoring the application of the virtual process in reverse engineering of the studied gears in the five months of mass production prove that the virtual process reduces the costs of the production errors, assembly defects, and waste parts to 100%, 55%, 71% respectively. Hence, the virtual process reduces the total mass production costs by 36%.

► Keywords

Reverse engineering
Computer-aided design
Fused deposition modeling
Spur gear

► Article history

Received: *01 May 2020*
Accepted: *08 Mar 2021*

۱ مقدمه

امروزه حفظ قابلیت رقابت در عرصه تولید صنعتی تا حد زیادی به کاهش زمان طراحی و تکوین محصول و بالا بردن همزمان کیفیت آن بستگی دارد. با توجه به ماهیت فرآیندهای ساخت و تولید در هر دو مورد ذکرشده، احتمال وقوع مسائل مختلفی به دلیل مشکلات ناشی از طراحی و استخراج داده‌ها در خلق محصول یا مهندسی معکوس وجود دارد که بروز آن سبب افزایش هزینه نهایی تولید و تحمیل چرخه آزمون و خطا بر تولیدکننده می‌گردد [۱]. استفاده از فرآیند مجازی[1] در حین ساخت یک محصول، به دلیل توانایی تکرارپذیری آن در مشارکت با سایر تکنولوژی‌های تولیدی می‌تواند پاسخی مناسب در حل این مسئله و کاهش خطاهای ایجاد شده در مرحله طراحی اولیه باشد. فرآیند مجازی در مفهوم کلی عبارت است از کاربرد یکی از تکنولوژی‌های نمونه‌سازی سریع[2] جهت ایجاد مدل‌های واقعی، که با ترسیم مدل سه‌بعدی قطعه‌کار در نرم‌افزار کامپیوتری آغاز و در نهایت نمونه فیزیکی توسط روش نمونه‌سازی سریع تولید می‌گردد [۲]. به عبارت دیگر در فرآیند مجازی با بهره بردن از تکنولوژی‌های مبتنی بر کامپیوتر می‌توان قبل از تولید قالب یا اجرای تولید انبوه، صحت طراحی اولیه مدل‌های سه‌بعدی را بر روی تیراژ محدود قطعات تولیدشده با یکی از تکنولوژی‌های نمونه‌سازی سریع بررسی نموده و در همان مرحله اول و قبل از تحمیل هزینه‌های اضافی بر سیستم تولیدی از بروز خطاها در فرآیند ساخت محصول جلوگیری نمود [۳]. لازم به ذکر است که امروزه از روش‌های نمونه‌سازی سریع برای تولید قطعات در تیراژ محدود با جنس‌های مختلف پلاستیکی، لاستیکی، فلزی و سرامیکی استفاده می‌شود. در تمامی این روش‌ها بعد از طراحی مدل سه‌بعدی قطعه‌کار و انتقال آن به دستگاه موردنظر نمونه‌سازی سریع، قطعه به صورت لایه به لایه از طریق رسوب‌دهی ماده اولیه از بالا به پایین ساخته می‌شود [۴]. مواد اولیه مورد استفاده برای ساخت قطعه‌کار در این تکنولوژی‌ها بسته به نوع دستگاه می‌تواند به صورت فتوپلیمر مایع، پودرهای ماده اولیه و یا به صورت فیلمل‌های پلاستیکی باشد [۴]. همچنین قطعه‌کار ساخته شده به روش نمونه‌سازی سریع را می‌توان بر حسب جنس آن تحت کنترل کیفیت ابعادی، تست مونتاژپذیری و حتی تست عملکردی مستقیم قرار داد. امروزه به اثبات رسیده که فرآیند مجازی به سبب ایجاد کیفیت مطلوب و ایجاد پایداری در فرآیند ساخت یک محصول، می‌تواند سودآوری واحد تولیدی را تضمین نماید [۲]. به طور مثال گیبسون و همکاران جهت دستیابی به شرایط اقتصادی بهینه در طراحی خواص ارگونومی محصول، بررسی‌هایی مقدماتی را در رابطه با تجمیع روش‌های نمونه‌سازی سریع با طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر به انجام رسانیدند [۵]. بنابراین فرآیند مجازی نقشی ارزنده در برآورده نمودن نیازهای رقابتی در عرصه طراحی و ساخت داشته که علت آن کاهش درصد خطا در همان مراحل اولیه از طراحی محصول است. اولین بار فادل و همکاران فرآیند مجازی را برای تجسم یافتن از ترکیب سازه‌های تکیه‌گاهی نامناسب در شرایط استاتیکی به کار برده و پیرو آن در سال ۱۹۹۶ سیستمی هوشمند را برای تشخیص خطاهای موجود در فرمت اس‌تی‌ال[3] و با قابلیت تصحیح آنها ابداع نمودند [۶]. این امر گامی بزرگ در بهبود کیفیت مدل‌های تولیدی با روش‌های نمونه‌سازی سریع بود زیرا این فرمت، فرمت ورودی دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع می‌باشد. در سال ۲۰۰۲ یانگ و همکاران نیز کاربرد این روش را در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی و صفحات ورق در ترکیب با روش‌های نمونه‌سازی سریع و تکنولوژی مهندسی به کمک کامپیوتر پیشنهاد کردند [۷]. با توجه به موضوع مورد بررسی در مقاله حاضر، باید توجه داشت که فرآیند طراحی، محاسبه و ساخت چرخ‌دنده‌ها در انواع مختلف آن همواره امری چالش‌برانگیز است. در سال ۲۰۰۶ پاهیت به منظور تسهیل فرآیند ماشین‌کاری چرخ‌دنده‌های ساده و مارپیچ با استفاده از ابزار دندانه شانه‌ای، نرم‌افزاری را طراحی نمود تا اپراتور بتواند ضمن درک صحیح از حرکات ابزار و چرخ‌دنده در حالت واقعی ماشین‌کاری از طریق تغییر پارامترها شرایط بهینه ماشین‌کاری را به دست آورد [۸]. نتایج نشان داد که با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان فرآیند تولید را به صورت مجازی شبیه‌سازی کرده و از همان مرحله طراحی از بروز خطاهای ناخواسته در تولید واقعی جلوگیری نمود. این تحقیقات توسط پاهیت و کومار در سال ۲۰۱۲ منجر به تولید نرم‌افزاری جامع برای تولید انواع چرخ‌دنده گردید که در آن بعد از تأیید طراحی، نرم‌افزار مستقیماً به دستگاه نمونه‌سازی سریع متصل شده و چرخ‌دنده مدل را از جنس دلخواه تولید می‌نماید [۹]. بدیهی است با اندازه‌گیری نمونه تولیدشده با استفاده از دستگاه‌هایی نظیر اسکنر و مقایسه آن با داده‌های طراحی می‌توان از صحت طراحی انجام شده اطمینان حاصل نمود. ضمناً تولید چرخ‌دنده توسط دستگاه نمونه‌سازی سریع براساس طراحی مستقیم کامپیوتری، به سازنده این امکان را می‌دهد که با مونتاژ مستقیم چرخ‌دنده آن را از نظر طراحی و قابلیت مونتاژی بررسی نماید [۱۰]. از این رو با توجه به کمبود تحقیقات داخلی انجام‌شده در این زمینه، مقاله حاضر به بررسی تأثیر اجرای فرآیند مجازی، شامل تجمیع روش طراحی به کمک کامپیوتر و نمونه‌سازی سریع، بر کاهش هزینه‌های تولید و اصلاح روند سنتی مهندسی معکوس[4] چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده انتقال نیرو در موتورسیکلت مدل CB125R ساخت شرکت هوندا پرداخته‌است. به این منظور چرخ‌دنده‌های فلزی از روی جعبه‌دنده موتورسیکلت دمونتاژ و از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار داده شد. سپس با استخراج پارامترهای ابعادی چرخ‌دنده‌ها، مدل کامپیوتری آنها ترسیم و مستقیماً نمونه‌های پلاستیکی چرخ‌دنده‌ها از روی فایل‌های سه‌بعدی کامپیوتری توسط روش لایه‌گذاری رسوبی[5] تولید شد. از نمونه‌های پلاستیکی چرخ‌دنده‌ها برای تست نحوه مونتاژپذیری اولیه آنها و اطمینان از صحت ابعادی چرخ‌دنده‌ها جهت آغاز تولید انبوه استفاده گردیده‌است. همچنین در انتهای مقاله، مقایسه میزان کاهش هزینه ناشی از حذف خطاهای تولیدی قبل و بعد از استفاده از فرآیند مجازی در تولید انبوه مدنظر قرار گرفته‌است.

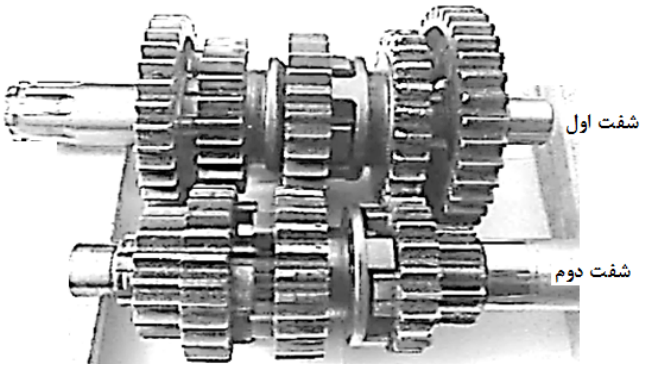
۲ مواد و روش‌ها

۱.۲ دمونتاژ چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده موتورسیکلت و اندازه‌گیری ابعاد قابل دسترسی

جعبه‌دنده بررسی شده در این تحقیق، جعبه‌دنده سنکرون انتقال نیرو در موتورسیکلت مدل CB125R با حجم موتور ۱۲۵ سی‌سی ساخت شرکت

[1] virtual process [2] rapid prototype [3] *.stl format [4] reverse engineering [5] fused deposition modeling (FDM)

هوندای ژاپن می‌باشد. برای دمونتاژ چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده، ابتدا پیچ‌های درپوش جعبه‌دنده باز شده و بعد از برداشتن درپوش، با بیرون آوردن اورینگ دور محفظه، چرخ‌دنده‌ها به آسانی از داخل جعبه‌دنده به خارج انتقال یافت. در شکل ۱، نمایی از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده این نوع موتورسیکلت نشان داده شده‌است.



شکل ۱: چرخ‌دنده‌های به کاررفته در جعبه‌دنده موتورسیکلت هوندا CB125R.

بعد از تمیزکاری چرخ‌دنده‌ها ابعاد اقطار بزرگ و کوچک آنها با استفاده از ساچمه و میکرومتر، ابعاد قطر سوراخ شفت چرخ‌دنده‌ها و ضخامت چرخ‌دنده‌ها نیز توسط کولیس دیجیتال سنجیده و سپس تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده‌ها شمارش گردید. با توجه به پیچیدگی فرآیند بازخوانی اطلاعات از روی چرخ‌دنده‌های دمونتاژ شده، در این مقاله از اجرای فرآیند مجازی بر روی قطعاتی نظیر شفت‌های جعبه‌دنده، پوسته جعبه‌دنده و ماهک‌های روی آن که برای تعویض دنده در حین حرکت به کار می‌رود، صرف‌نظر شده است. با بررسی انجام‌شده و سنجیدن فاصله بین مراکز دو شفت جعبه‌دنده که برابر ۴۵ میلی‌متر است، مشخص شد که تمام چرخ‌دنده‌های ساده مورد استفاده از نوع اصلاح‌شده می‌باشد.

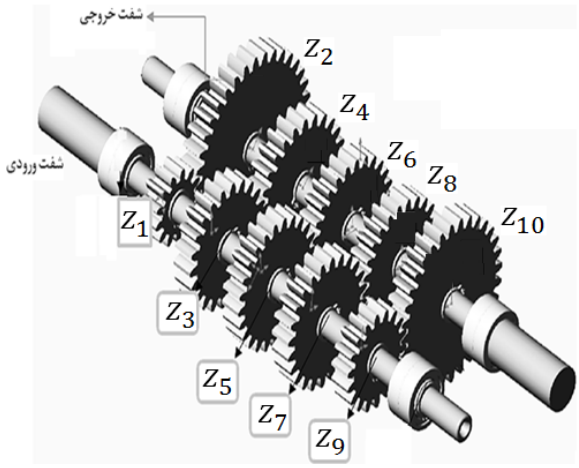
با توجه به حجم بالای محاسبات در تحقیق حاضر، به دلیل ممانعت از طولانی شدن بیش از حد مقاله از ذکر روابط مربوط به چرخ‌دنده‌های ساده صرف‌نظر می‌گردد. در جدول ۱ خلاصه مشخصات چرخ‌دنده‌های متقابل درگیر با هم در جعبه‌دنده انتقال نیروی موتورسیکلت براساس اندازه‌گیری‌ها و محاسبات اولیه صورت گرفته بر طبق استاندارد انجمن تولیدکنندگان چرخ‌دنده آمریکا، آگما[6]، ارائه شده‌است. لازم به توضیح است که نامگذاری چرخ‌دنده‌ها، براساس نام در نظر گرفته شده برای آنها بر طبق شکل ۲ می‌باشد.

جدول ۱: نتایج به دست آمده برای مشخصات هندسی چرخ‌دنده‌های z_1، z_2، z_3، z_4، z_5، z_6، z_7، z_8، z_9 و z_{10}.

پارامترها	چرخ‌دنده z_1	چرخ‌دنده z_2	چرخ‌دنده z_3	چرخ‌دنده z_4	چرخ‌دنده z_5	چرخ‌دنده z_6	چرخ‌دنده z_7	چرخ‌دنده z_8	چرخ‌دنده z_9	چرخ‌دنده z_{10}
تعداد دندانه	۱۳	۳۶	۲۲	۲۵	۲۵	۲۶	۲۴	۲۵	۱۸	۳۲
پهنای دندانه (mm)	۱۱	۱۱	۷	۷	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
مدول حقیقی	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۹۲	۱/۹۲	۱/۷۶	۱/۷۶	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸	۱/۸
قطر خارجی با مدول حقیقی (mm)	۲۷/۴۵	۶۹/۵	۴۶/۰۶	۵۱/۸۴	۴۷/۵۲	۴۹/۲۸	۴۷/۶	۴۹/۴	۳۶	۶۱/۲
مدول استاندارد	۱/۷۵	۱/۷۵	۲	۲	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۷۵
ضرایب اصلاح	۰/۳۲	۰/۸۳	−۰/۵	−۰/۵۶	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۵۸	۰/۶	۰/۲۸	۰/۵
قطر خارجی اصلاح‌شده با مدول استاندارد (mm)	۲۷/۴	۶۹/۴	۴۶	۵۱/۷۸	۴۷/۵۳	۴۹/۲۸	۴۷/۵۳	۴۹/۳۵	۳۵/۹۸	۶۱/۲۵
ارتفاع دندانه (mm)	۳/۹۳	۳/۹۳	۴/۵	۴/۵	۳/۹۳	۳/۹۳	۳/۹۳	۳/۹۳	۳/۹۳	۳/۹۳
قطر داخلی اصلاح‌شده (mm)	۱۹/۵	۶۱/۵۴	۳۷	۴۲/۷۸	۳۹/۷	۴۱/۴۲	۳۹/۶۷	۴۱/۵	۲۸/۱۵	۵۳/۴

۲.۲ طراحی چرخ‌دنده‌های ساده جعبه‌دنده در نرم‌افزار کامپیوتری

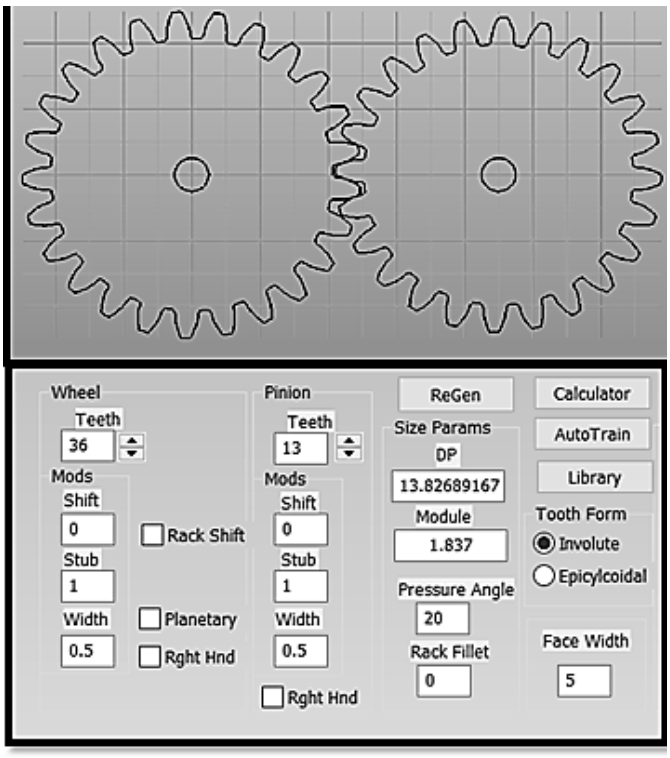
با توجه به اینکه فرامین موجود در نرم‌افزارهای طراحی مرسوم نظیر سالیدورکس[7] و کتیا، قادر به طراحی دقیق از پروفیل چرخ‌دنده‌های با گام دایروی نیست، همواره ترسیم این نوع از چرخ‌دنده‌ها در این نرم‌افزارها توأم با درصد بالایی از خطا خواهد بود. بنابراین در اجرای این تحقیق، فرآیند طراحی چرخ‌دنده‌های ساده در نرم‌افزار گیرأتیکس[8] که نرم‌افزاری تخصصی و ویژه برای طراحی انواع چرخ‌دنده‌ها است، انجام گرفت. برای طراحی مدل سه‌بعدی چرخ‌دنده‌های ساده در محیط نرم‌افزار گیرأتیکس، باید با استفاده از قسمت چرخ‌دنده‌های دایروی در نرم‌افزار، پارامترهای محاسبه‌شده در قسمت قبلی را به صورت عددی به آن وارد نمود. فرآیند طراحی پروفیل دندانه‌ها در این نرم‌افزار به صورت کاملاً اتوماتیک و با دقت بسیار بالایی انجام



شکل ۲: نحوه نامگذاری چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده موتورسیکلت و مونتاژ آنها در محیط نرم‌افزار سالیدورکس.

[6]AGMA [7]Solidworks [8]Gearotics

می‌گیرد. در شکل ۳، نمایی از محیط این نرم‌افزار و مدل دوبعدی اولیه از چرخ‌دنده‌های ساده طراحی‌شده شماره ، ارائه گردیده‌است. لازم به ذکر است که برای اجرای مونتاژ کامپیوتری چرخ‌دنده‌های ساده، ابتدا مدل سه‌بعدی چرخ‌دنده‌ها به نرم‌افزار سالیدورکس منتقل شده و سپس با استفاده از محیط مونتاژ و تعریف قیود هندسی، طبق شکل ۲، روی هم سوار گردید.



شکل ۳: مدل دوبعدی چرخ‌دنده‌های z_7 و z_8 طراحی‌شده در محیط نرم‌افزار گیرأتیکس.

۳.۲ تولید نمونه‌های فیزیکی با استفاده از روش پرینت سه‌بعدی با لایه‌گذاری رسوبی

برای تولید نمونه‌های فیزیکی چرخ‌دنده‌های ساده سه‌بعدی طراحی‌شده در کامپیوتر، ابتدا فایل تک‌تک چرخ‌دنده‌ها با پسوند stl که پسوند استاندارد برای انتقال داده مدل سه‌بعدی به دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع است، ذخیره و سپس به منظور پرینت سه‌بعدی، این فایل‌ها به دستگاه لایه‌گذاری رسوبی ارسال گردید. در دستگاه لایه‌گذاری رسوبی قطعات از جنس پلاستیک به صورت لایه‌لایه بر حسب نقشه دوبعدی آن مقطع قطعه در هر لایه تولید می‌شود. از این قطعات می‌توان برای بررسی، مونتاژ و کنترل ابعادی طراحی انجام‌شده استفاده کرد [۴]. برای تولید قطعه در دستگاه لایه‌گذاری رسوبی فیلمان‌های پلاستیکی از جنس موردنظر با استفاده از قرقره در پشت دستگاه بارگذاری شده و سپس در داخل کله‌گی نصب می‌گردد. با شروع به کار دستگاه از طریق دو غلتک موجود در کله‌گی، فیلمان به داخل کله‌گی کشیده و به تدریج از قرقره‌های پشت دستگاه باز می‌شود [۱۱]. با عبور فیلمان از کله‌گی، توسط نازل گرم موجود در آن که حرارت القایی ایجاد می‌نماید، فیلمان ذوب شده و به صورت پلاسما (شبه ذوب) بر روی سکوی ساخت قطعه در فضای خلأ ریخته می‌شود. زمانی که لایه اول تکمیل شد، سکوی ساخت به اندازه ضخامت لایه بعدی قطعه پایین رفته و ساخت لایه بعدی نیز مطابق روش قبل اجرا می گردد تا قطعه از پایین به بالا ساخته شود [۱۱]. از این رو زمان تولید قطعه در این روش تا حد زیادی به ضخامت لایه‌ها بستگی دارد.

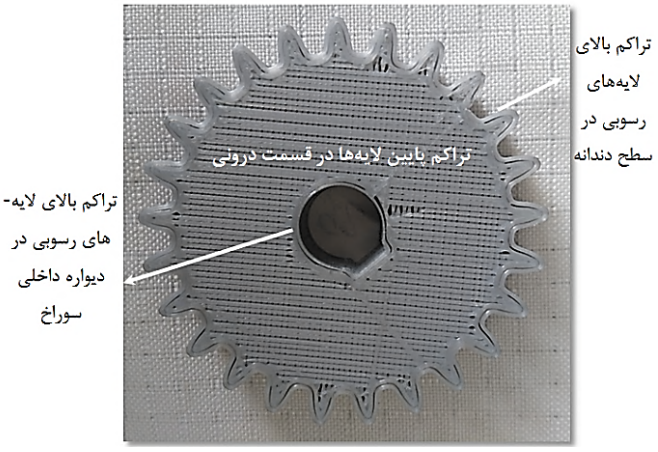
در این تحقیق، برای ساخت نمونه‌ها در دستگاه لایه‌گذاری رسوبی از پلیمر پلی‌لاکتیک اسید[9] که یک پلی‌استر گرمانرم می‌باشد، استفاده شده‌است. یکی از ویژگی‌های اصلی این پلیمر که نقطه ذوب آن ۱۵۳ درجه سانتیگراد است، استخراج آن به صورت صددرصدی از دکستروز حاصل از ذرت و یا چغندر قند می‌باشد و بنابراین تمام مواد ساخته شده با این پلیمر با قرارگرفتن در مجاورت خاک تجزیه شده و متلاشی می‌شود [۱۲]. امروزه از پلی لاکتیک اسید برای تولید سامانه‌های تصفیه، بخیه‌های پزشکی، وسایل شکسته‌بندی، ایمپلنت‌های دندان پزشکی، و ظروف نگهداری غذا استفاده می‌شود [۱۲]. برای ساخت نمونه‌های فیزیکی از دستگاه لایه‌گذاری رسوبی شرکت واگلر[10] مدل V821 با قطر نازل رسوب‌دهنده ۰/۴ میلی‌متر استفاده گردید که در شکل ۴ نمایی از این دستگاه ارائه شده‌است. همچنین ضخامت پلیمر رسوب داده‌شده در هر لایه برای ساخت مقطع موردنظر، در نرم‌افزار دستگاه، برابر با ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

شکل ۴: دستگاه واگلر مدل V821.

به منظور کاهش زمان ساخت نمونه‌ها و مصرف پلیمر کمتر، با توجه به اینکه هدف از نمونه‌سازی چرخ‌دنده‌های ساده اندازه‌گیری ابعادی و تست مونتاژپذیری به منظور تعیین صحت طراحی آنها بوده‌است، قسمت‌های مهم نمونه‌ها شامل دیواره داخلی سوراخ شفت و سطح پهلویی دو طرف دندانه‌های چرخ‌دنده به صورت متراکم و توپر تولیدشده و در عوض قسمت‌های با اهمیت کمتر که در این تحقیق شامل قسمت‌های درونی چرخ‌دنده‌ها است با مش‌بندی کمتر تولید گردید. در شکل ۵، نمایی از یکی از چرخ‌دنده‌های تولیدشده با روش نمونه‌سازی با لایه‌گذاری رسوبی نشان داده شده‌است.

بعد از تولید نمونه‌های فیزیکی جهت اطمینان از سختی مناسب قطعات تولیدشده برای تست مونتاژپذیری واقعی، سختی آنها با استفاده از دستگاه سختی‌سنج دورومتر[11] ساخت شرکت تکلاک[12] ژاپن سه بار برای هر نمونه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

[9] polylactic acid (PLA) [10] Vagler [11] Durometer [12] Teclock

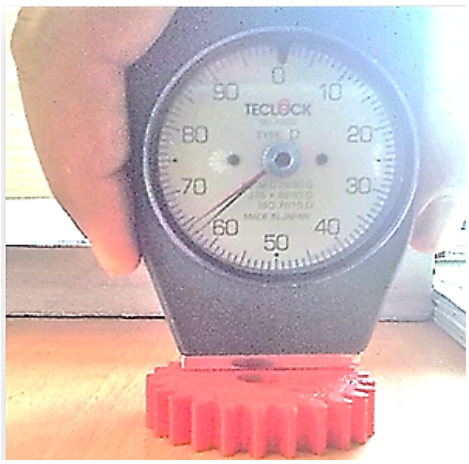


شکل ۵: نمایی از چرخ‌دنده ساده تولیدشده با دو استراتژی رسوب‌دهی متمایز.

۳ بحث و بررسی

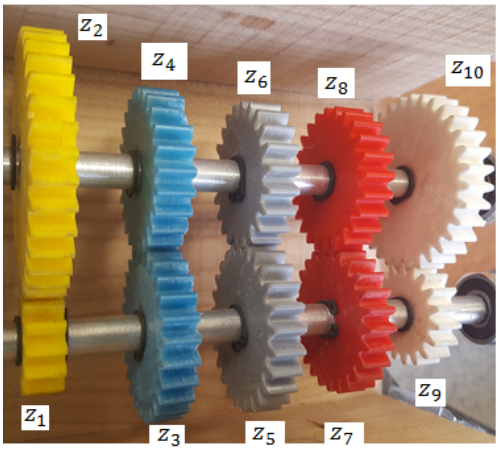
بعد از اتمام فرآیند نمونه‌سازی چرخ‌دنده‌های ساده در دستگاه لایه‌گذاری رسوبی، میزان سختی نمونه‌های تولیدشده مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که با توجه به تکرار سه‌باره اندازه‌گیری روی هر چرخ‌دنده، متوسط کل سختی در تمام نمونه‌ها ۶۵ شور– دی[۱۳] تعیین گردید. این میزان، سختی مناسبی برای یک پلیمر تولیدشده به روش نمونه‌سازی سریع به شمار می‌آید و چرخ‌دنده‌های نمونه‌سازی شده تحمل فشار و نیروی اعمالی در حین مونتاژ را دارا خواهند بود [۱۳].

شکل ۶، نمایی از اندازه‌گیری سختی را بر روی چرخ‌دنده نمونه z_8 نشان می‌دهد. در ادامه مطابق شکل ۷، تمام چرخ‌دنده‌ها با توجه به موقعیت آنها در چهارچوبی منطبق با اندازه جعبه‌دنده موتورسیکلت با هم مونتاژ گردید. برای سهولت تشخیص چرخ‌دنده‌ها از هم، هر جفت چرخ‌دنده درگیر با رنگ منحصر به فردی نمونه‌سازی شده‌است.

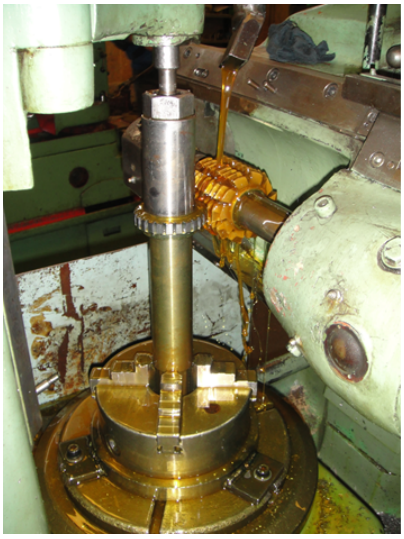


شکل ۶: اندازه‌گیری میزان سختی چرخ‌دنده نمونه‌سازی‌شده با روش لایه‌گذاری رسوبی.

با انجام مونتاژ، تست مونتاژپذیری نمونه‌های مقابل، نحوه حرکات چرخ‌دنده‌ها، نحوه تداخل دندانه‌های چرخ‌دنده‌های درگیر و عدم بروز زیربرش در تداخل دندانه‌ها با دقت بالا مورد بررسی قرار گرفته و با جعبه‌دنده واقعی مقایسه گردید. همچنین با توجه به دقت مناسب نمونه‌های پلیمری، از ابزارهای اندازه‌گیری برای مقایسه پارامترهای موردنیاز با نمونه فلزی چرخ‌دنده‌ها استفاده شد. نتایج بررسی‌ها دقت بالای طراحی در چرخه مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های ساده را با درجه بالایی از اطمینان تأیید نمود. از این رو تمام پارامترهای هندسی استخراج‌شده برای تک‌تک چرخ‌دنده‌ها در اختیار واحد ماشین‌کاری قرار گرفت تا تولید انبوه آنها با پارامترهای جدید محاسبه‌شده بر مبنای جدول ۱ با استفاده از روش هاب‌زنی چرخ‌دنده روی مواد با جنس اصلی انجام گیرد. در شکل ۸، نمایی از نحوه تولید چرخ‌دنده شماره z_2 در دستگاه هاب از جنس اصلی و به صورت فلزی نشان داده شده‌است.



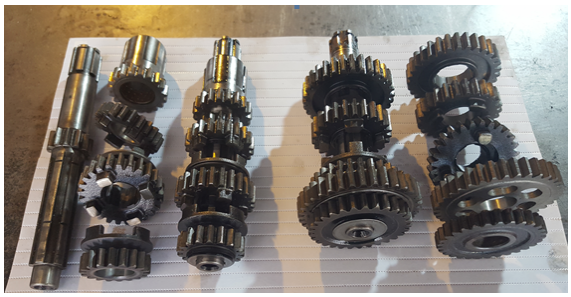
شکل ۷: چرخ‌دنده‌های ساده مونتاژ شده جعبه‌دنده موتورسیکلت بعد از نمونه‌سازی به روش لایه‌گذاری رسوبی.



شکل ۸: تولید چرخ‌دنده شماره z_2 با استفاده از دستگاه هاب.

با انجام تولید انبوه چرخ‌دنده‌های ساده از جنس اصلی، میزان تأثیر کاربرد فرآیند مجازی در پایداری تولید انبوه و کاهش هزینه‌ها تا مونتاژ نهایی قبل و بعد از اجرای فرآیند مجازی در پروسه تولید جعبه‌دنده موتورسیکلت مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۹، نمایی از تمام چرخ‌دنده‌های تولیدشده با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری به روش هاب‌زنی را بعد از اجرای عملیات حرارتی در دو حالت مونتاژ و دمونتاژ نشان می‌دهد.

[13] Shore D



شکل ۹: چرخ‌دنده‌های تولیدشده گیربکس موتورسیکلت با جنس اصلی در دوحالت مونتاژ و دمونتاژ شده.

براساس تحقیقات ارائه‌شده در بخش مقدمه، کاربرد فرآیند مجازی می‌بایست از طریق افزایش ضریب اطمینان در تولید محصول، سبب پایین آمدن هزینه‌های مازاد در خط تولید گردد. به این منظور برای تعیین مقادیر کاهش هزینه‌های مازاد محصول و پایش هزینه‌ها، بررسی بازخورد آنها از بخش تولید و فنی–مهندسی، مونتاژ و کنترل کیفیت در طول مدت تولید، پنج‌ماه، ادامه داشته‌است. جدول ۲، مقادیر تأثیر فرآیند مجازی در پایین آوردن هزینه‌ها که ناشی از حذف یا کاهش استفاده از روش آزمون و خطا در فرآیند مهندسی معکوس جعبه‌دنده موتورسیکلت است را نشان می‌دهد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر کاربرد فرآیند مجازی در کاهش میزان خطای ایجادشده در تولید چرخ‌دنده‌ها ناشی از انتخاب نادرست ابعاد قطعه در مرحله طراحی و به میزان ٪۱۰۰ بوده‌است. این مقدار مستقیماً بر روی کاهش هزینه ضایعات نیز مؤثر بوده و آن را به میزان ٪۷۱ کاهش داده‌است. باید توجه داشت در محاسبه هزینه ضایعات عواملی نظیر رد شدن قطعه به واسطه عملیات حرارتی نامناسب ثانویه، اعوجاج قطعه، نداشتن سختی کافی نمونه فلزی، ترک برداشتن در حین عملیات حرارتی و کیفیت نامناسب جنس چرخ‌دنده یا شرایط غیربهینه ماشین‌کاری آن به دلیل استهلاک ماشین ابزار، ابزار هاب و ارتعاشات نیز دخیل می‌باشد اما، میزان ٪۷۱ مستقیماً مربوط به کاربرد فرآیند مجازی در کاهش میزان این هزینه بوده‌است. به عبارت دیگر فرآیند مجازی از طریق افزایش ضریب اطمینان در شناسایی ایرادات طراحی و پیشگیری از وقوع آنها در مرحله تولید، سبب کاهش چشمگیری در مقادیر هزینه‌های ناشی از وقوع عیب در فرآیند تولید و مونتاژ شده‌است.

جدول ۲: میزان تأثیر فرآیند مجازی بر کاهش هزینه‌های مهندسی معکوس جعبه‌دنده موتورسیکلت هوندا CB125R.

پارامترهای مورد بررسی	علت وقوع	تأثیر فرآیند مجازی	میزان کاهش هزینه
خطای ابعاد در تولید هر چرخ‌دنده	انتخاب نادرست پارامترها در مرحله طراحی اولیه چرخ‌دنده	حذف	٪۱۰۰
ایراد مونتاژ پذیری چرخ‌دنده	انتخاب نادرست پارامترها در مرحله طراحی اولیه و هندسه معیوب قطعه	کاهش	٪۵۵
هزینه ضایعات ناشی از رد شدن قطعه در کنترل کیفیت نهایی	ابعاد نادرست چرخ‌دنده در مرحله طراحی اولیه	کاهش	٪۷۱

در رفع ایرادات مرتبط با مونتاژپذیری چرخ‌دنده‌های فلزی ماشین‌کاری‌شده مطابق با ابعاد تعیین‌شده در فرآیند مجازی کاهش ۵۵ درصدی هزینه‌های مونتاژ به‌دست آمد. این کاهش هزینه‌ها از طریق صرفه‌جویی در زمان رفع نقص مونتاژ مربوط به چرخ‌دنده‌ها و تسهیل مونتاژ، کاهش خستگی اپراتور مونتاژ، افزایش سرعت مونتاژ و افزایش تیراژ تولید به نسبت میزان برق مصرفی در دوره هشت ساعته شیفت کاری به‌دست آمده‌است. با توجه به اینکه فرآیند مجازی در مورد تولید شفت جعبه‌دنده، ماهک‌ها و پوسته جعبه‌دنده موتورسیکلت اجرا نشده، کاهش ۵۵ درصدی هزینه‌ها رقمی قابل توجه برای بخش مونتاژ می‌باشد. بر طبق نتایج حاصله از جدول ۲ و پایش خط تولید، استفاده از فرآیند مجازی باعث صرفه‌جویی در کل هزینه‌های تولیدی جعبه‌دنده موتورسیکلت به میزان ٪۳۶ شده‌است.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر فرآیند مجازی شامل طراحی به کمک کامپیوتر و استفاده از روش نمونه‌سازی سریع بر کاهش کل هزینه‌های تولیدی در روند مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده انتقال نیرو در موتورسیکلت مدل CB125R مورد بررسی قرار گرفت. چرخ‌دنده‌های گیربکس بعد از طراحی اولیه به کمک روش لایه‌گذاری رسوبی تولید و پس از تأیید طراحی به روش هاب‌زنی نمونه‌های با جنس اصلی ساخته شد. نتایج حاصل از میزان صرفه‌جویی اقتصادی بکارگیری فرآیند مجازی در مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌ها در بازه پنج‌ماهه بعد از تولید انبوه نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر کاربرد فرآیند مجازی در کاهش میزان خطای ایجادشده در تولید چرخ‌دنده‌ها ناشی از انتخاب نادرست ابعاد قطعه در مرحله طراحی و به میزان ٪۱۰۰ می‌باشد. این مقدار مستقیماً بر روی کاهش هزینه ضایعات نیز مؤثر بوده و آن را به میزان ٪۷۱ کاهش داده‌است. همچنین در رفع ایرادات مرتبط با مونتاژپذیری کاهش ۵۵ درصدی هزینه‌های مونتاژ به دست آمد. این کاهش هزینه‌ها از طریق صرفه‌جویی در زمان رفع نقص مونتاژ مربوط به چرخ‌دنده‌ها و تسهیل مونتاژ، کاهش خستگی اپراتور مونتاژ، افزایش سرعت مونتاژ و افزایش تیراژ تولید میسر گردید. نتایج نهایی تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فرآیند مجازی باعث صرفه‌جویی در کل هزینه‌های تولیدی جعبه‌دنده موتورسیکلت به میزان ٪۳۶ شده‌است.

مراجع

[1] Magrab, Edward B, Gupta, Satyandra K, McCluskey, F Patrick, and Sandborn, Peter. *Integrated product and process design and development: the product realization process*. CRC Press, 2009.

[2] Mujber, Tariq S, Szecsi, Tamas, and Hashmi, Mohammed SJ. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of materials processing technology*, 155:1834–1838, 2004.

[3] Tanchev, Ljubomir. *Virtual and rapid manufacturing: advanced research in virtual and rapid prototyping*. CRC Press, 2007.

[4] Kamrani, Ali K and Nasr, Emad Abouel. *Rapid prototyping: theory and practice*, vol. 6. Springer Science & Business Media, 2006.

[5] Gibson, I, Cobb, S, and Eastgate, R. Virtual reality and rapid prototyping: Conflicting or complimentary? in *1993 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1993.

[6] Fadel, GM, Crane, Darren, Dooley, Larry, and Geist, Robert. Support structure visualization in a virtual reality environment. in *Proceedings of the 6th International Conference on RP, Dayton, USA*. Citeseer, 1995.

[7] Yang, Dong-Yol, Ahn, DG, Lee, CH, Park, CH, and Kim, TJ. Integration of cad/cam/cae/rp for the development of metal forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 125:26–34, 2002.

[8] Pohit, Goutam. Application of virtual manufacturing in generation of gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(1-2):85–91, 2006.

[9] Pohit, G and Kumar, K. Virtual manufacturing of various types of gears and validation of the technique using rapid prototype: A method to simulate gear manufacturing process with chip formation and a method to validate the simulation by using rapid prototyping techniques are presented in this paper. *Virtual and Physical Prototyping*, 7(2):153–171, 2012.

[10] Pu, TP and TANG, JY. Virtual machining process research of spur-gear based on catia v5. *Journal of System Simulation*, 20(16):4339–4343, 2008.

[11] Chua, Chee Kai, Leong, Kah Fai, and Lim, Chu Sing. *Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company, 2010.

[12] Sin, Lee Tin. *Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications*. William Andrew, 2012.

[13] The database of plastics and elastomers. https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/hardness-shore-d.