

طراحی، تحلیل و ساخت افزایشی یک جفت چرخدنده غیردایروی کاهنده به کمک کامپیوتر

چکیده: در این مقاله به طراحی و ساخت یک جفت چرخدنده غیردایره‌ای کاهنده دور، متشکل از یک چرخدنده مثلثی محرک و یک چرخدنده پنج‌پر متحرک پرداخته شده است. با تعیین پارامترهای طراحی، مدل دو بعدی و سه بعدی هر دو چرخدنده با استفاده از نرم افزار ترسیم گردید. سپس نحوه حرکت چرخدنده ها در نرم افزار شبیه سازی و تحلیل شده و با تأیید نتایج نمودارهای سرعت و شتاب زاویه ای، هر دو چرخدنده توسط روش ساخت افزایشی تولید شد. نتایج نشان می دهد که روش طراحی ارائه شده در این مقاله صحت و دقت عملکردی چرخدنده های غیردایروی را تضمین می نماید. مونتاژ چرخدنده ها به درستی انجام شده و حرکت آنها از دقت مناسبی برخوردار می باشد. همچنین تولید چرخدنده ها توسط روش ساخت افزایشی با انتخاب پارامترهای ورودی دقیق منجر به دستیابی به محدوده تoleransi معادل ± 0.02 میلیمتر شده و اثری از پله ای شدن در امتداد ضخامتی در نمونه های فیزیکی رؤیت نگردید.

واژه های راهنما: چرخدنده، غیردایروی، طراحی، شبیه سازی حرکتی، ساخت افزایشی

سامان
خلیل پورآذری*

استادیار، دانشکده انرژی‌های
تجدیدپذیر، گروه مهندسی
ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی
ارومیه، ارومیه

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

**Saman
Khalilpourazary***
Assistant Professor,
Department of
Renewable Energy,
Faculty of Mechanical
Engineering, Urmia
University of
Technology, Urmia

Computer aided design, engineering and additive manufacturing of a pair of non-circular gear reducers

Abstract: In this paper, a pair of non-circular gear reducers consisting of a triangular driver gear and a pentangle driving gear was designed and fabricated. By determining the design parameters, two-dimensional and three-dimensional models of both gears were drawn using the software. Then, the movement of the gears was simulated and analyzed in the software. With the confirmation of the angular velocity and angular acceleration results, both gears were manufactured by the additive manufacturing process. The results revealed that the design method presented in this paper guarantees the functional accuracy of non-circular gears. The gears were assembled correctly and their movement was correct. Moreover, by selecting precise input parameters the production of non-circular gears using the additive manufacturing process has led to the achievement of a tolerance range ± 0.02 mm and has prevented them from stepping along the thickness.

Keywords: Gear, Non-circular, Design, Motion study, Additive manufacturing

۱- مقدمه

نوری و مکانیزم‌های عمده برای ایجاد سرعت‌های متغیر در ماشین‌آلات ریسندگی و بسته‌بندی به شدت توسعه یافته است.

دوج و همکاران در سال ۲۰۰۱، استفاده از چرخنده‌های غیردایروی را برای مکانیزم‌های انتقال نیرو و تولید گشتاور حرکتی متغیر و پیوسته در جعبه‌دنده‌های نوع سی-وی-تی . همچنین کاربرد این نوع از چرخنده‌ها به [۳] پیشنهاد دادند . منظور کاهش نوسانات سرعت و گشتاور در محورهای مولد . ژو و همکاران نیز تحقیقات [۴] حرکت توصیه شده است مشابهی را جهت بررسی میزان تأثیر فاصله محوری و نوع شکل چرخنده‌های غیردایروی بر روی مقادیر خروجی نظیر گشتاور، توان خروجی به انجام رسانیدند. آنها توانستند از طریق بهینه‌سازی فرم دندانه‌های چرخنده‌ها به مقادیر مطلوب‌تری از . تحقیقات مشابهی نیز در [۵] پارامترهای خروجی دست یابند رابطه با استفاده از جعبه‌دنده‌های با چرخنده‌های غیردایره‌ای برای انتقال گشتاور موتور به سیستم حرکتی به انجام رسیده . ولکنر نیز کاربرد چرخنده‌های غیردایره‌ای را در [۶] است ساخت تجهیزات شکل‌دهی نظیر پرس‌ها بررسی نموده و نتایج . آگادا [۸] حاصل از آن را با پرس‌های مرسوم مقایسه نموده است و تاکیدا از چرخنده‌های غیردایروی برای طراحی یک ربات جهنده بازویی استفاده نموده و نشان دادند که طراحی با این نوع چرخنده‌ها سبب ایجاد تعادل و هماهنگی بیشتری در طراحی ربات شده و از نظر اندازه محصول، تأثیر فراوانی در کاهش ابعاد . لین و همکاران نیز از چرخنده‌های [۹] نهایی داشته است غیردایروی برای طراحی مکانیزم جدید قفل‌کننده در میکروپمپ‌ها استفاده نمودند. نتایج تحلیل نرم‌افزاری و شبیه‌سازی حرکتی مکانیزم طراحی شده نشان داد که مقادیر خطای طراحی بسیار پایین بوده و در مقابل قابلیت عملکردی چرخنده‌های غیردایروی نسبت به مکانیزم مرسوم بادامکی در این نوع از . ژو و همکاران نیز روشی [۱۰] پمپ‌ها به مراتب بالاتر می‌باشد ابتکاری را برای محاسبه فرم هندسی شکل دندانه با در نظر گرفتن اندازه سر دندانه در چرخنده‌های غیردایروی ارائه نمودند که نتایج نشان داد این روش در ضمن سادگی و کارآمد بودن می‌تواند با دقت بالایی شعاع و زاویه پروفیل شکل دندانه چرخنده را در مختصات قطبی حتی در شرایطی که نیاز به . البته طراحی [۱۱] اصلاح سر دندانه باشد، محاسبه نماید چرخنده‌های غیردایره‌ای دارای مشکلات زیادی به خاطر پیچیدگی فرم دندانه‌ها می‌باشد که لزوم استفاده از محاسبات پیچیده ریاضی را برای طراحی آنها ضروری نموده است. از طرف دیگر بسیاری از نرم‌افزارهای طراحی نیز روش مناسبی برای رسم این‌گونه از چرخنده‌ها ارائه نکرده‌اند. در چرخنده‌های دایره‌ای

در علم مکانیک چرخنده وسیله‌ای برای انتقال توان دورانی از یک محور به محور دیگر است که با استفاده از آن می‌توان مقدار گشتاور، سرعت چرخش، جهت و تعداد چرخش را بین دو یا چندین محور به دلخواه تغییر داد. با توجه به دسته‌بندی زیاد در طراحی چرخنده‌ها با اشکال مختلف، امروزه چرخنده‌هایی را که دارای منحنی گام با شکل غیردایره‌ای هستند، چرخنده‌های غیردایره‌ای می‌نامند که از جمله انواع آنها می‌توان به چرخنده‌های بیضوی، مثلثی و مربعی شکل اشاره نمود [۱]. امروزه این نوع از چرخنده‌ها در دو جنس فلزی و پلاستیکی برای کاربردهای مختلفی طراحی و تولید می‌شوند. روش‌هایی نظیر ماشین‌کاری با ماشین‌های چرخنده‌تراشی خاص، برش سیمی، برش‌کاری با واترجت، ماشین‌کاری تخلیه‌الکتریکی و ریخته‌گری برای ساخت چرخنده‌های غیردایروی فلزی و تکنیک‌هایی مانند تزریق در قالب پلاستیکی، برش با لیزر از تسمه‌های پلاستیکی و ساخت افزایشی برای تولید این نوع چرخنده‌ها از جنس پلاستیکی استفاده می‌گردد. چرخنده‌های غیردایروی به واسطه داشتن شکل‌های نامنظم و آزادی عمل طراح در تغییر دادن مکان محور دورانی آنها، برای انتقال حرکت پیوسته با سرعت متغیر به کار گرفته می‌شود. به عبارت دیگر نوع سرعت‌های موردنیاز و نیز محدودیت‌های طراحی ابعادی در سیستم حرکتی، دو عامل مهم برای توجه و تمرکز بر استفاده از این نوع چرخنده‌ها می‌باشد. از طرف دیگر چرخنده‌های غیردایروی را می‌توان به واسطه شکل هندسی ویژه آنها برای ایجاد حرکات غیرثابت، انتقال حرکت‌های دقیق و طراحی‌های فشرده برای ساخت جعبه‌دنده‌های مسطح و با قابلیت اشغال فضای کمتر مورد استفاده قرار داد. باید توجه داشت در طراحی‌های مشابه و قدیمی‌تر برای ایجاد سرعت متغیر از بادامک‌ها و سیستم‌های اهرم‌بندی خاص نیز استفاده شده که در مقام مقایسه، کاربرد چرخنده‌های غیردایروی نسبت به این نوع از اجزاء مکانیکی به مراتب ساده‌تر و دقیق‌تر بوده و فضای کمتری را اشغال می‌نماید. از لئوناردو داوینچی طراح، مهندس و نقاش ایتالیایی به عنوان اولین کسی که ایده کاربرد چرخنده‌های غیردایروی را مطرح نموده، نام برده می‌شود [۲]. از انتهای قرن هیجدهم میلادی به واسطه توسعه صنعت و پیدایش روش‌های تولیدی جدید، استفاده از چرخنده‌های غیردایروی در فضانوردی و امور نظامی، ماشین‌های اتوماتیک و ربات‌ها، دی-سنج‌ها، مکانیزم‌های برگشت سریع، پمپ‌ها، وسایل اندازه‌گیری

خروجی آنها تأثیرگذار می‌باشد. در این تحقیق به صورت خاص بر روی دو نوع چرخنده مثلثی و پنج‌پر تمرکز شده است. ۳- با توجه به مقالات بین‌المللی ارائه شده در این موضوع درک صحیح از روش طراحی این نوع چرخنده‌ها مستلزم آگاهی زیاد به روابط ریاضی و نحوه حل آنها دارد که شاید این امر یکی از علل عدم اقبال به این نوع طراحی در کشور است. با توجه به رسالت مقاله سعی شده مطالب در این مبحث به صورت کامل و قابل فهم برای صنعتگران ارائه گردد.

۴- در این تحقیق نرم‌افزاری کاربردی و ناآشنا در ایران به نام گیرآتیکس موشن معرفی گردیده که سبب سهولت بسیار در طراحی فرم دندانه‌های پیچیده و غیرهمسان در چرخنده‌های غیردایروی می‌گردد که بدون آن کاربر به مانند بسیاری از مقالات بین‌المللی نیازمند حل معادلات پیچیده برای طراحی این نوع چرخنده‌ها است.

۵- به موضوع ساخت چرخنده‌های غیردایروی نیز توجه شده است. با توجه به پیچیدگی و هزینه بالای استفاده از فرآیند تزریق پلاستیک برای طراحی قالب جهت ساخت نمونه چرخنده‌های غیردایروی پلاستیکی با اندازه بزرگ، پهنای زیاد و ضخامت کم در این مقاله برای حل این موضوع از روشی پیشگام به نام ساخت افزایشی استفاده گردید.

۶- نویسنده برای شبیه‌سازی نرم‌افزاری چرخنده‌ها و دستیابی به نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای به جای نرم‌افزارهای با پایه ریاضی نظیر متلب از نرم‌افزار سالیدورکس که به صورت وسیع در ایران به کار گرفته می‌شود استفاده نموده است.

۷- نوآوری دیگر این مقاله ترکیب تکنیک طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر توسط نرم‌افزارهای تخصصی مکانیک در حیطه مباحث مرتبط با طراحی و ساخت چرخنده‌های غیردایروی است که تاکنون این موضوع در اندک مقالات بین‌المللی بررسی شده و در آنها بیشتر برای این منظور از نرم‌افزارهای ریاضی به جای نرم‌افزارهای مکانیکی استفاده شده است.

۲- طراحی چرخنده‌های غیردایروی

به دلیل اینکه مبنای طراحی چرخنده‌های غیردایروی مورد بررسی در این مقاله برگرفته از طراحی و محاسبات چرخنده‌های بیضوی شکل است، در این بخش نحوه محاسبه و فرمول‌بندی موردنیاز برای دستیابی به پارامترهای طراحی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر بررسی گردیده است. در بسیاری از

ثابت بودن شعاع چرخنده امکان انجام محاسبات چرخنده را براساس دایره مبنا برای یافتن فرم پروفیل اینولوت دندانه مهیا کرده است، در حالی که در چرخنده‌های غیردایره‌ای به دلیل تغییر شعاع چرخنده در مکان‌های مختلف، نمی‌توان از منحنی [۱۲] مبنا جهت انجام محاسبات پروفیل دندانه استفاده کرد. فنی در زمینه دانش کمبود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که غیردایره‌ای سبب شده تا تکنیک چرخنده‌های طراحی انواع طراحی و روش ساخت این نوع از چرخنده‌ها در بسیاری از کشورها ناشناخته و یا بسیار نوپا باشد. از این رو نوآوری مقاله حاضر را می‌توان در پرداختن به این موضوع و ارائه روشی مناسب برای طراحی چرخنده‌های غیردایروی به خصوص در صنایع داخلی دانست که تاکنون به این موضوع در مقالات علمی ایران پرداخته نشده است. همچنین در این مقاله قابلیت روش ساخت افزایشی برای تولید چرخنده‌های غیردایروی به عنوان روشی نوین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

به این منظور در این تحقیق، یک جفت چرخنده غیردایره‌ای کاهنده دور متشکل از یک چرخنده مثلثی محرک و یک چرخنده پنج‌پر متحرک طراحی شده و با تعیین پارامترهای آنها، مدل دوبعدی و سه‌بعدی آنها با استفاده از نرم‌افزار ترسیم گردید. سپس نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای براساس تغییرات زاویه‌ای چرخنده محرک در محیط نرم‌افزار تحلیل شده و با تأیید نتایج به دست آمده، هر دو چرخنده توسط روش لایه‌گذاری رسوبی^۱ تولید شد. روش لایه‌گذاری رسوبی یکی از روش‌های ساخت افزایشی برای تولید مدل‌های پلاستیکی به صورت لایه‌لایه است که دقت مناسبی را برای ساخت مدل‌های چرخنده‌ای دارا می‌باشد. در انتها به منظور اطمینان از صحت طراحی، چرخنده‌های سه‌بعدی ساخته شده با هم مونتاژ شده و وضعیت آنها از نظر تداخل و روان بودن حرکات و صحت تولید مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری مقاله را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

۱- با توجه به کاربرد گسترده این نوع چرخنده‌ها در صنایعی نظیر نساجی، نظامی و ابزارهای اندازه‌گیری، مطالعه و تحقیق در مبحث چرخنده‌های غیردایروی از سال‌ها قبل در کشورهای صنعتی آغاز شده ولی در کشور ایران تحقیقات بسیار محدودی بر روی این موضوع انجام شده است.

۲- اقتضای طراحی هر نوع چرخنده غیردایروی استفاده از روشی مستقل است که عیناً بر کیفیت چرخنده‌ها و نمودارهای

¹ Fused deposition modelling (FDM)

$$r_{\theta} = H \times \frac{\frac{d\phi}{d\theta}}{\left(\frac{d\phi}{d\theta} + 1\right)} \quad (6)$$

$$r_{\phi} = \frac{H}{\left(\frac{d\phi}{d\theta} + 1\right)} \quad (7)$$

همچنین مدول چرخنده بیضوی محرک به شکل رابطه (۸)، قابل ارائه است.

$$Z_{\theta} = \frac{H \int_0^{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} \left[\left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2 + \frac{\left(\frac{d^2\phi}{d\theta^2}\right)^2}{\left(1 + \frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} \right]} d\theta}{\pi m} \quad (8)$$

علاوه بر روابط ذکر شده می‌توان چرخنده‌های بیضوی را به شکل راحت‌تری با کمک مختصات قطبی و به کمک مجموعه روابط (۹) طراحی نمود [۱۳].

$$r_{\theta} = \frac{C}{1 + \varepsilon \times \cos(N\theta)}$$

$$C = (1 - \varepsilon^2) \times K$$

$$\varepsilon = \frac{A}{K}$$

$$K = \sqrt{A^2 + \left(N \times \frac{p}{2\pi}\right)^2} \quad (9)$$

جدول ۱، نشان می‌دهد که شکل چرخنده غیردایره‌ای تا حد زیادی تابع پارامتر شماره لوب می‌باشد به نحوی که با تغییر آن، شکل چرخنده غیردایره‌ای به نحو محسوسی از حالت بیضوی به اشکال دیگر تغییر می‌نماید. لازم به ذکر است شماره لوب از عدد سه به بعد، بیانگر تعداد گوشه‌های چرخنده غیردایره‌ای طراحی شده است.

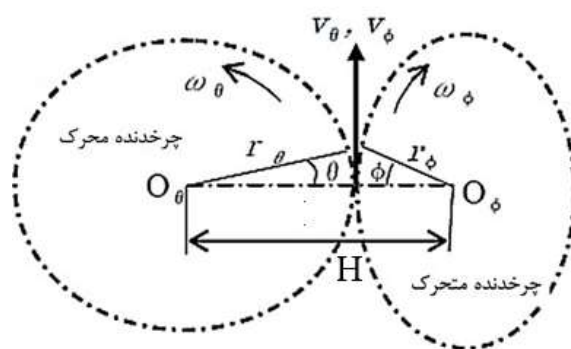
۳- مواد و روشها

۳-۱- طراحی پارامترهای چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر

در این تحقیق چرخنده‌های غیردایره‌ای از نوع مثلثی و پنج‌پر انتخاب شده است. از این رو با توجه به روابط ارائه شده در بخش قبلی پارامترهای موردنیاز برای هر چرخنده طبق جدول ۲، تعیین گردید.

با تعیین مشخصات اولیه، فرآیند ترسیم چرخنده‌های غیردایره‌ای و حصول به مدل سه‌بعدی آنها جهت انجام تحلیل در

چرخنده‌های بیضوی، محور شفت چرخنده‌ها منطبق بر مرکز بیضی گام بوده و با وجود ثابت بودن سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک، سرعت زاویه‌ای چرخنده متحرک در فواصل یک چهارم دور چرخنده محرک به صورت نوسانی افزایش و کاهش می‌یابد. شکل ۱، یک جفت چرخنده بیضوی شکل درگیر با هم و پارامترهای مورد استفاده در طراحی آنها را نشان می‌دهد که در آن، فاصله بین محورهای جفت چرخنده درگیر در حالتی که چرخنده محرک و متحرک به اندازه θ و ϕ دوران نموده‌اند، برابر H فرض شده است. در این حالت نسبت سرعت‌های چرخشی را می‌توان با استفاده از دیفرانسیل $\frac{d\phi}{d\theta}$ به دست آورد [۱۳].



شکل ۱ پارامترهای مؤثر در چرخنده‌های درگیر بیضوی شکل [۱۳]

شعاع گام چرخنده‌های محرک و متحرک را می‌توان به صورت $r_{\theta} = r(\theta)$ و $r_{\phi} = r(\phi)$ فرض کرده و توسط روابط (۱) تا (۴) به دست آورد:

$$r_{\theta} + r_{\phi} = H \quad (1)$$

$$r_{\theta} = \frac{v_{\theta}}{w_{\theta}} = \frac{v_{\theta}}{\frac{d\theta}{dt}} \quad (2)$$

$$r_{\phi} = \frac{v_{\phi}}{w_{\phi}} = \frac{v_{\phi}}{\frac{d\phi}{dt}} \quad (3)$$

$$v_{\theta} = v_{\phi} \quad (4)$$

از روابط (۲) تا (۴) به آسانی می‌توان نسبت سرعت‌های چرخشی را توسط رابطه (۵) محاسبه نمود [۱۳].

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{r_{\theta}}{r_{\phi}} \quad (5)$$

با جاگذاری رابطه (۵)، در رابطه (۱)، می‌توان مقادیر شعاع گام چرخنده‌های محرک و متحرک را به صورت روابط (۶) و (۷) تخمین زد.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای ورودی در طراحی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر

پارامترهای طراحی	چرخنده پنج‌پر	چرخنده مثلثی
شماره لوب	۵	۳
ضخامت چرخنده (میلیمتر)	۱۰	۱۰
زاویه فشار (درجه)	۲۰	۲۰
تعداد دندان	۱۰۰	۶۰
شعاع بزرگ چرخنده (میلیمتر)	۵۲/۶	۳۴/۳
شعاع کوچک چرخنده (میلیمتر)	۴۸/۲	۲۳/۶
مدول نرمال	۳	۳
فاصله مراکز محورهای دو چرخنده (میلیمتر)	۸۰/۲	
ضریب اصلاح	۰	۰
قطر سوراخ مرکزی (میلیمتر)	۱۰	۱۰
ارتفاع کل دندان (میلیمتر)	۲/۳	۲/۳

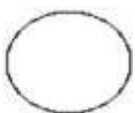


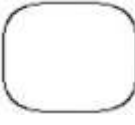

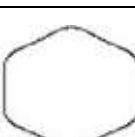
با ورود پارامترها به نرم‌افزار، فرم دندانه‌های چرخنده‌های غیردایروی به صورت اتوماتیک رسم شده و سپس طراح می‌تواند شکل مقطع دوبعدی چرخنده رسم شده را در قالب پسوند دی-اکس-اف^۲ ذخیره و به نرم‌افزار دیگری منتقل نماید. با اتمام مرحله ترسیم مقاطع دوبعدی چرخنده‌ها، مدل‌های دوبعدی به نرم‌افزار طراحی سالی‌دورکس^۳ منتقل شده و در آنجا این مدل‌ها به صورت تک به تک به مدل‌های سه‌بعدی با ضخامت ده میلی‌متر تبدیل شد تا شکل سه‌بعدی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر مورد بررسی در این مقاله حاصل گردد.

۳-۲- تحلیل چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر

بعد از تولید مدل سه‌بعدی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر در نرم‌افزار سالی‌دورکس، این چرخنده‌ها به محیط مونتاژ همین نرم‌افزار منتقل شده و با رعایت قیدهای هندسی موردنیاز با هم مونتاژ شدند. در شکل ۲، نمایی از مدل سه‌بعدی مونتاژ شده از چرخنده‌های غیردایروی مثلثی و پنج‌پر در محیط نرم‌افزار سالی‌دورکس ارائه شده است.

نرم‌افزار ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه ابزارهای تسهیل‌کننده طراحی چرخنده‌های غیردایروی در هیچ‌یک از نرم‌افزارهای مرسوم طراحی وجود ندارد، برای طراحی مدل سه‌بعدی این چرخنده‌ها، ابتدا شکل مقطع کلی آنها در قالب مدل دوبعدی با استفاده از یک نرم‌افزار طراحی چرخنده با نام گیرآتیک موشین^۱ به دست آمد. نرم‌افزار گیرآتیک موشین دارای توانمندی بالایی در رسم اتوماتیک شکل پروفیل دندانه‌های چرخنده‌های غیردایروی بوده و فرآیند طراحی را از نظر زمانی به میزان زیادی کاهش می‌دهد.

جدول ۱ وابستگی شکل چرخنده غیردایره‌ای به شماره لوب در طراحی چرخنده‌های غیردایروی

شماره لوب	فرم چرخنده غیردایروی
۱	
۲	
۳	
۴	
۵	
۶	

برای دستیابی به مدل دوبعدی در محیط نرم‌افزار گیرآتیک موشین، ابتدا در قسمت طراحی چرخنده‌های غیردایروی، پارامترهای محاسبه شده در جدول ۲، به صورت عددی به نرم‌افزار وارد گردید.

² Dxf

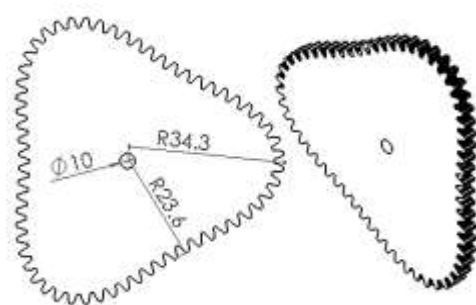
³ Solid works

¹ Gearotic Motion

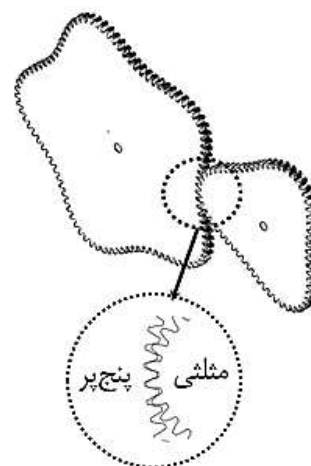
چرخنده در ارتفاع ده میلیمتر انجام شد. به این منظور فیلمان جنس موردنظر به صورت قرقره در پشت دستگاه بارگذاری شده و سپس در داخل کله‌گی دستگاه و در مسیر موردنظر نصب گردید. با شروع به کار دستگاه، از طریق دو غلتک موجود در کله‌گی، فیلمان به داخل کله‌گی دستگاه تغذیه و در حین عبور فیلمان از کله‌گی به واسطه وجود سیستم حرارت القایی در آن، فیلمان تا دمای ۲۱۵ درجه سانتیگراد که دمای مناسب برای پلی لاکتیک است تحت حرارت‌دهی قرار گرفت. سپس پلی لاکتیک نرم شده بر روی سکوی ساخت قطعه به اندازه ضخامت هر لایه اکستروود یا لایه‌گذاری گردید. با تکمیل لایه اول، سکوی ساخت به اندازه ضخامت لایه بعدی پایین رفته و ساخت لایه بعدی نیز مطابق روش قبل اجرا شد تا قطعه از پایین به بالا ساخته شود. یکی از ویژگی‌های اصلی پلی لاکتیک شفاف که به دلیل استخراج آن از مواد طبیعی نظیر نیشکر و ذرت دارای اهمیت است، زیست تخریب بودن و تجزیه این پلیمر با قرار گرفتن در مجاورت خاک است. نمونه‌های قطعات تولید شده با پلی لاکتیک اسید بسیار سخت بوده و در عین حال چسبندگی لایه‌ها به همدیگر در هنگام استفاده از آن در ساخت افزایشی به شدت بالا می‌رود.

۴- بحث و بررسی

شکل ۳، نمایی از چرخنده‌های غیردایروی پنج‌پر و مثلثی شکل را بعد از طراحی به همراه ابعاد چرخنده‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که با توجه به فرآیند ترسیم چرخنده‌های غیردایروی و شرط درگیری مناسب بین آنها باید نسبت تعداد دندانه‌های هر چرخنده به شماره لوب آن چرخنده با هم برابر باشد که در این مورد، این نسبت برای هر دو چرخنده برابر با عدد بیست است.



الف



شکل ۲ مدل سه‌بعدی مونتاژ شده از چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر

سپس ویژگی چرخنده‌های طراحی شده از نظر تداخل بین دندانه‌ها در این محیط گرافیکی بررسی شده و تحلیل حرکتی آنها توسط مازول مربوطه در نرم‌افزار سالیدورکس انجام گرفت. با اتمام فرآیند مطالعه حرکتی و تحلیل چرخنده‌ها در نهایت نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای استخراج گردید. با تأیید نتایج به دست آمده، بلافاصله مرحله ساخت نمونه‌های فیزیکی هر دو چرخنده به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش ساخت افزایشی آغاز شد.

۳-۲- ساخت افزایشی چرخنده‌ها

جهت ساخت نمونه‌های فیزیکی از چرخنده‌ها، ابتدا فایل سه بعدی تک‌تک چرخنده‌ها با پسوند استاندارد اس-تی-ال^۱ ذخیره شده و سپس جهت ساخت افزایشی، این فایل‌ها به دستگاه لایه‌گذاری رسوبی ارسال گردید. لایه‌گذاری رسوبی برای ساخت نمونه‌های فیزیکی با چاپگر سه‌بعدی صنعتی مدل S5050 تولیدی شرکت سمین تری‌دی^۲ ایران، با نازلی رسوب-دهنده به قطر ۰/۴ میلیمتر، درصد تراکم ۱۰۰٪ و سرعت چاپ سه میلیمتر بر ثانیه انجام گرفت. ضخامت هر لایه رسوب داده شده برای ساخت مقطع موردنظر دوبعدی در هر لایه، در نرم‌افزار دستگاه، برابر با ۰/۰۶ میلیمتر در نظر گرفته شد تا عدم پله‌ای شدن نمونه‌ها در امتداد ارتفاعی تضمین گردد. تولید نمونه‌ها به صورت سه‌بعدی در دستگاه لایه‌گذاری رسوبی، توسط فیلمان پلی لاکتیک شفاف طبیعی^۳ که یک ترموپلاستیک است به روش لایه‌لایه نشانی مواد بر روی هم برحسب نقشه دوبعدی هر مقطع

³ Poly Lactic Acid (PLA)

¹ *.Stl

² Samin 3D

باید توجه داشت که در طراحی چرخنده‌های غیردایروی همواره تعداد دامنه نوسانات سیکلی برابر با شماره لوب چرخنده محرک می‌باشد که در این تحقیق چرخنده مثلثی به عنوان محرک دارای شماره لوب برابر با سه است. از این رو در نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای تعداد سیکل چرخنده محرک در هر دور کامل برابر با سه دامنه نوسانی بوده است. با توجه به رابطه (۱۰) مشخص است که به ازاء یک دور کامل چرخنده مثلثی که معادل ۳۶۰ درجه است، چرخنده متحرک پنج‌پر به اندازه ۲۱۶ درجه دوران می‌نماید.

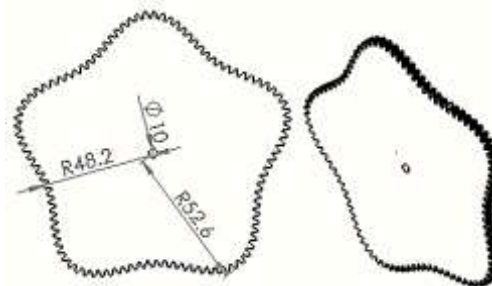
$$360 \times \frac{Z_{\text{مثلثی}}}{Z_{\text{پنج‌پر}}} = 360 \times \frac{N_{\text{مثلثی}}}{N_{\text{پنج‌پر}}} = 216^\circ \quad (10)$$

بر طبق شکل‌های ارائه شده دامنه تغییرات سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای در محدوده مناسبی قرار دارد. لازم به ذکر است که در بسیاری از منابع علمی به وقوع ارتعاشات در چرخنده‌های غیردایره‌ای درگیر با هم، همزمان با تغییرات سرعت و شتاب زاویه‌ای در چرخنده محرک اشاره شده که پدیده‌ای شایع در طراحی چرخنده‌های غیردایروی به دلیل طراحی نادرست است. البته بروز ارتعاشات گفته شده تغییرات معناداری را در روند سیکل چرخنده محرک که نمودار آن در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده اعمال می‌نماید که در این تحقیق این مشکل رؤیت نگردید. در شکل ۶ نمونه‌های فیزیکی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر تولید شده با روش ساخت افزایشی ارائه گردیده است.



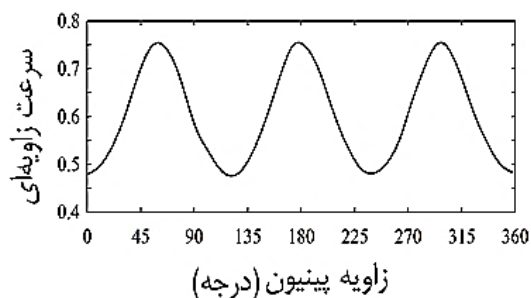
شکل ۶ چرخنده‌های غیردایروی مثلثی و پنج‌پر تولید شده به روش ساخت افزایشی

بررسی مدل‌ها نشان می‌دهد که چرخنده‌ها از نظر کیفیت تولید در حد قابل قبولی بوده و حالت پله‌ای شدن در راستای ضخامت چرخنده‌ها که احتمال ایجاد آن به دلیل ساخت لایه-لایه مدل‌ها وجود داشت، ایجاد نشده است. دلیل این امر کم بودن ضخامت انتخاب شده برای لایه‌های ایجاد شده در هر مرحله از فرآیند لایه‌گذاری رسوبی می‌باشد. همچنین بررسی ابعادی نمونه‌های فیزیکی با استفاده از کولیس و میکرومتر نشان می‌دهد

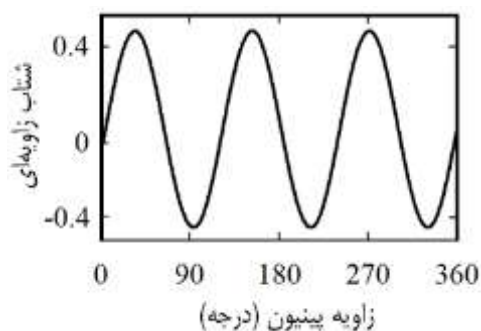


شکل ۳ ابعاد چرخنده‌های غیردایروی طراحی شده: الف- مثلثی و ب- پنج‌پر

برای تعیین مقادیر سرعت و شتاب زاویه‌ای در چرخنده محرک نیاز به تجهیزات دقیق و حساس و نیز بهره‌مندی از ابزارهای نگه‌دارنده مخصوص می‌باشد. از این رو در این تحقیق با توجه به اینکه نمونه‌های فیزیکی چرخنده‌های مثلثی و پنج‌پر دقیقاً از روی مدل‌های سه‌بعدی طراحی شده در محیط نرم‌افزار سالیدورکس تولید گردیده، برای سنجش مقادیر سرعت و شتاب زاویه‌ای به جای مدل‌های واقعی از مدل‌های کامپیوتری استفاده شده است. فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از ماژول سالیدورکس موشن انجام گرفت. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودار تغییرات سرعت و شتاب زاویه‌ای در چرخنده محرک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، سینوسی بودن نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای کاملاً مشهود می‌باشد.



شکل ۴ نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای در برابر زاویه چرخنده محرک



شکل ۵ نمودار تغییرات شتاب زاویه‌ای به ازاء زاویه چرخنده محرک

۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند طراحی، تحلیل و ساخت یک جفت چرخنده مثلثی و پنج پر کاهنده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد، چرخنده‌های تولید شده از دقت مونتاژی مناسبی برخوردار است که به طور مستقیم صحت و دقت اجرای روش تحقیق مورد نظر در این مقاله را به اثبات رسانده و از آن می‌توان برای طراحی نمونه‌های مشابه از چرخنده‌های غیردایروی نیز بهره برد.

اندازه‌گیری ابعاد چرخنده‌های تولید شده، نشانگر دستیابی به محدوده تoleransi بسته توسط روش لایه‌گذاری رسوبی به عنوان یک روش ساخت افزایشی است که ضمن تضمین دقت ابعادی، این امر سبب شده تا پدیده پله‌ای شدن در امتداد ارتفاع چرخنده‌ها به طور کلی حذف گردد. با اطمینان می‌توان گفت از آنجا که نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای با شماره لوب چرخنده محرک در این تحقیق (درجه سوم) تطابق دارد، در واقعیت و با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق نیز این نمودارها تغییر قابل توجهی نخواهد داشت.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

r_0	شعاع گام چرخنده متحرک (m)
R_0	شعاع گام چرخنده محرک (m)
v_0	سرعت مماسی چرخنده متحرک در نقطه تماس (m/s)
v_0	سرعت مماسی چرخنده محرک در نقطه تماس (m/s)
w_0	سرعت زاویه‌ای چرخنده متحرک (rad/s)
w_0	سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک (rad/s)
m	مدول چرخنده بیضوی محرک (mm)
Z_0	تعداد دندانه‌های چرخنده محرک
N	شماره لوب چرخنده
A	تفاوت بین بلند و کوتاه‌ترین شعاع‌های چرخنده (mm)
K	ضریب (mm)
ϵ	میزان خارج از مرکزی چرخنده (mm)
C	فاصله بین مراکز دو چرخنده درگیر (mm)
p	قطر گام چرخنده غیردایروی (mm)

۷- مراجع

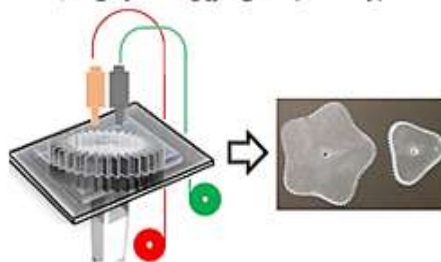
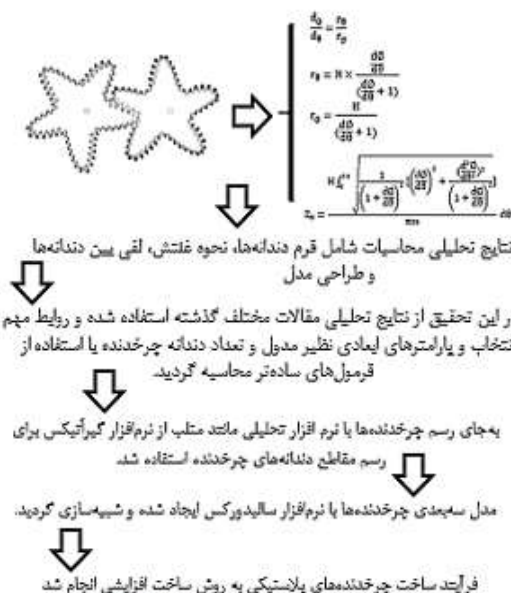
- [1] Vullo, V., "Gears", New York: Springer International Publishing, pp.181-185, (2020).
- [2] Radzevich, S.P., "Recent Advances in Gearing: Scientific Theory and Applications", pp. 236-237, Springer, (2021).

که تolerانس تولید نمونه‌ها بر روی تمام ابعاد، حداکثر معادل ± 0.02 میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۷ چرخنده‌های غیردایروی به صورت مونتاژ شده نشان داده شده است. چرخنده‌ها به صورت دقیق با توجه به فاصله محوری انتخابی مونتاژ شده و حرکت روان و با لقی مناسبی را در طی دوران از خود نشان می‌دهد. عملکرد صحیح چرخنده‌های مونتاژی در این تحقیق که با بروز مسائلی نظیر گیر کردن، لقی دورانی و یا امکان عدم مونتاژ به دلیل ابعاد نادرست همراه نبوده، بیانگر صحت طراحی انجام شده و انتخاب درست پارامترهای طراحی و ساخت چرخنده‌ها می‌باشد.



شکل ۷ چرخنده‌های غیردایروی مثلثی و پنج پر درگیر با هم پس از مونتاژ

شکل ۸ ترتیب مراحل اجرای این تحقیق و نتایج به دست آمده را به توجه به منابع علمی بررسی شده در این زمینه ارائه نموده است.



شکل ۸ مراحل طی شده برای تولید چرخنده‌های غیردایروی در این تحقیق

- Materials Processing Technology*, Vol. 106, No. 1-3, pp. 236-242, (2000).
- [9] Okada, M., Takeda, Y., “Optimal design of nonlinear profile of gear ratio using non-circular gear for jumping robot”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia: *Taylor & Francis*, pp. 1958-1963, (2012).
- [10] Lin C., Hu Y., Wei Y., Cai Z., “Characteristics analysis of supporting and locking mechanism based on the non-circular gear compound transmission”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, No.6, pp. 2561-71, (2020).
- [11] Zhou M., Yang Y., Wei M., Yin D., “Method for generating non-circular gear with addendum modification and its application in transplanting mechanism”, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 68-75., (2020).
- [12] Sałaciński T., Przesmycki A., Chmielewski T., “Technological aspects in manufacturing of non-circular gears”, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 10, pp. 3420, (2020).
- [13] Rackov, M., Mitrović, R., Čavić, M., “Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering”, pp.67-69, *Springer*, (2021).
- [3] Doege, E., Meinen, I., Neumaier, T., Schaprian, M., “Numerical design of a new forging press drive incorporating non-circular gears”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 215, No. 4, pp. 465-471, (2001).
- [4] Yao, Y.A., Yan, H.S., “A new method for torque balancing of planar linkages using non-circular gears”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 217, No. 5, pp. 503-512, (2003).
- [5] Xu, H., Fu, T., Song, P., Zhou, M., Fu, C.W., Mitra, N.J., “Computational Design and Optimization of Non-Circular Gears”, *In Computer Graphics Forum*, Vol. 39, No. 2, pp. 399-409, (2020).
- [6] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J., “Design and experimental research on seedling pick-up mechanism of planetary gear train with combined non-circular gear transmission”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 32, No.1, pp.1-3, (2019).
- [7] Li, G., Zhu, W., “Design and power loss evaluation of a noncircular gear pair for an infinitely variable transmission”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 156, p.104137, (2021).
- [8] Voelkner, W., “Present and future developments of metal forming: selected examples”, *Journal of*