سال ۲۹، شماره ۱۳۲، صفحات ۶۰-۶۵، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های بیضوی دبی‌سنج دنده‌ای با استفاده از تکنولوژی CAD/CAM

سامان خلیل‌پور آذری

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

s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

◄ چکیده

الزام به رقابت و نوآوری در طراحی و ساخت یک محصول، اهمیت استفاده از تکنولوژی‌های متکی بر کامپیوتر با هدف مونتاژ اولیه و اجرای تست‌های عملکردی مجازی قبل از تأیید نهایی طراحی را برجسته نموده است. در این مقاله مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های بیضوی مورد استفاده در دبی‌سنج جابجایی مثبت مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا نمونه‌های اصلی از روی دبی‌سنج دمونتاژ شده و بعد از اندازه‌گیری اولیه آنها با ابزارهای دقیق، فرآیند طراحی کامپیوتری هندسه چرخ‌دنده‌ها و مونتاژ آنها در محیط نرم‌افزاری انجام گرفت. سپس مدل‌های کامپیوتری در دستگاه وایرکات با جنس اصلی تولید گردید. در ادامه برای بررسی دقیق عملکرد چرخ‌دنده‌های شبیه‌سازی‌شده، نمودارهای شبیه‌سازی حرکتی آنها نیز مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین برای بررسی صحت هندسه مدل‌های شبیه‌سازی‌شده، یکی از چرخ‌دنده‌های اصلی دبی‌سنج اسکن شده و نتایج آن با مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار مقایسه گردید. نتایج ضمن تأیید عملکرد مناسب چرخ‌دنده‌های بیضوی مهندسی معکوس شده به کمک کامپیوتر، نشان داد که میزان اختلاف در خارج از بیضی بودن نمونه‌های اصلی و شبیه‌سازی‌شده حداکثر برابر با ۰/۰۲ میکرون است.

◄ واژگان کلیدی

مهندسی معکوس
چرخ‌دنده بیضوی
دبی‌سنج
گیرآتیکس
سالیدورکس

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۷/۱۷
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

۱ مقدمه

به طور کلی چرخ‌دنده‌های با منحنی‌های گام در اشکال مختلف غیر از دایره، مانند بیضی، مربع و ...، چرخ‌دنده‌های غیردایره‌ای نامیده می‌شود. امروزه با توجه به سادگی فرآیند ساخت و دقت مناسب قابل حصول در ساخت این نوع از چرخ‌دنده‌ها در مقایسه با مکانیزم‌های بادامکی، از آنها به صورت وسیعی برای ایجاد نسبت سرعت متغیر، سرعت ثابت مقطعی و حتی مکث حرکتی در سیکل‌های حرکتی پیوسته در مکانیزم‌های صنعتی استفاده می‌گردد [۱]. در این میان چرخ‌دنده‌های بیضی شکل[1] کاربردهای بیشتری را نسبت به سایر انواع چرخ‌دنده‌های غیر استوانه‌ای به خود اختصاص داده است و تحقیقات بیشتری بر روی شناخت پارامترهای مؤثر در طراحی آن متمرکز بوده است. از چرخ‌دنده‌های بیضی شکل به صورت گسترده در صنایع بسته‌بندی، دستگاههای فتوکپی، ماشین آلات نساجی و ساخت دبی‌سنج‌های[2] دقیق استفاده می‌گردد. با کاربرد چرخ‌دنده‌های بیضی می‌توان یک حرکت دورانی با سرعت ثابت را به یک حرکت دورانی با سرعت متغیر، در یک سیکل چرخشی تغییر داد. یکی از کاربردهای استراتژیک چرخ‌دنده‌های بیضی شکل استفاده از آنها در دبی‌سنج‌های چرخ‌دنده‌ای حجمی یا جابجایی مثبت[3] است. دبی‌سنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال داخل لوله استفاده می‌شود. در دبی‌سنج‌های جابجایی مثبت، نیروی مورد نیاز از انرژی جریان تأمین می‌شود. محاسبه دبی در این دبی‌سنج‌ها، با محصور کردن مقداری سیال در محفظه و سپس تخلیه سیال انجام می‌گیرد. حجم کل سیال عبوری از این وسیله در یک بازه زمانی، از حجم سیال نمونه‌گیری‌شده و تعداد نمونه‌گیری‌ها به دست می‌آید. این نوع دبی‌سنج‌ها به دلیل داشتن چرخ‌دنده‌های متحرک برای پساب‌ها مناسب نیست و بیشتر برای سیالات تمیز به کار می‌رود. از این رو عملکرد صحیح دبی‌سنج‌های جابجایی مثبت با چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل تا حد زیادی به طراحی صحیح چرخ‌دنده‌ها بستگی دارد. با توجه به قابلیت نصب آسان چرخ‌دنده‌های بیضوی، عمر مناسب، دقت و تکرارپذیری بالای آنها در اندازه‌گیری دبی سیالات، از دبی‌سنج‌های با چرخ‌دنده‌های بیضوی در خطوط انتقال مایعاتی نظیر الکل، انواع سوخت‌ها مانند بنزین، گلوکز، جوهر، شکر مایع، استیک اسید، روغن‌های معدنی و هیدرولیک، حلال‌ها و مواد شیمیایی استفاده می‌گردد. کوچفسکی تحقیقات جامعی را در رابطه با بررسی هندسه چرخ‌دنده‌های بیضی شکل و تأثیر پارامترهای طراحی بر روی پروفیل دندانه آن به انجام رسانید و از یک چرخ‌دنده ساده برای تقریب‌زنی محاسبات در چرخ‌دنده‌های بیضی شکل استفاده نمود [۲]. بِیر نیز استفاده از روشهای عددی را برای ساخت پروفیل دندانه چرخ‌دنده‌های بیضی شکل در دستگاه کله‌زنی چرخ‌دنده[4] مورد بررسی قرار داد [۳]. همچنین چِن و تِسای کاربرد مدل‌های ریاضی پیچیده را برای بررسی تداخل بین دندانه‌های چرخ‌دنده‌های بیضوی درگیر با توجه به تغییر در پارامترهای ورودی طراحی، مطرح نمود [۴]. لیتوین و همکاران نیز روشی نوین را در اتوماسیون فرآیند ساخت

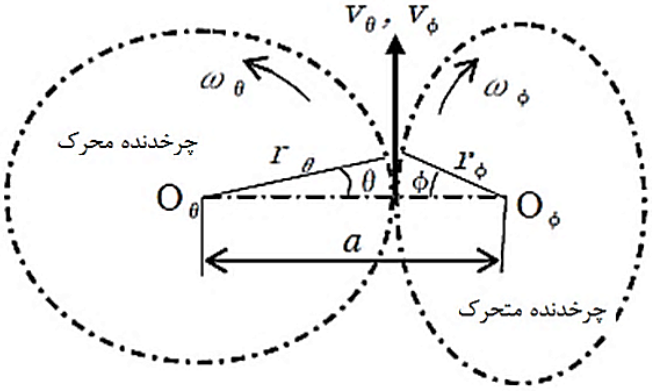
[1] elliptical gear [2] flowmeter [3] positive displacement (PD) [4] gear shaper machine

چرخ‌دنده‌های بیضی دندانه مستقیم و مارپیچی بر پایه استفاده از تئوری ماتریس‌ها در ریاضیات ارائه داده است [۵]. در بیشتر مقالات ارائه‌شده در این زمینه از محاسبات پیچیده و بغرنج ریاضی برای محاسبات دندانه و طراحی چرخ‌دنده بیضی شکل استفاده شده است که درک موضوع را برای بسیاری از صنعتگران و تولیدکنندگان دشوار می‌نماید. همین امر امکان انتقال تکنولوژی طراحی و ساخت چرخ‌دنده‌های بیضی شکل و بومی‌سازی آن را با مشکل مواجه نموده است. از طرف دیگر، امروزه نرم‌افزارهای تخصصی زیادی برای کاربرد در زمینه‌های صنعتی خاص به بازار ارائه شده که یادگیری و استفاده از آنها می‌تواند زمینه را برای نوآوری در ساخت محصولات با کارایی بیشتر، بهینه‌سازی و مهندسی معکوس آنها فراهم آورده و سبب خودکفایی کشور در تولید قطعات پیچیده صنعتی گردد. در این مقاله به صورت اختصاصی به فرآیند مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های بیضی شکل مورد استفاده در دبی‌سنج چرخ‌دنده بیضوی مدل Flowmec ساخت کشور هلند به عنوان اصلی‌ترین قطعات دبی‌سنج، با استفاده از تکنولوژی CAD/CAM پرداخته شده و ساخت مجموعه مونتاژی کلی دبی‌سنج موضوع بحث مقاله نیست. لازم به ذکر است که برای برآورده نمودن نیاز کشور، تمام دبی‌سنج‌های چرخ‌دنده بیضوی جابجایی مثبت از کشورهای پیشرفته نظیر هلند، آلمان، ایتالیا و آمریکا وارد می‌گردد.

برای اجرای این تحقیق بعد از دمونتاژ چرخ‌دنده‌های بیضی شکل از روی دبی‌سنج، اندازه‌گیری اولیه چرخ‌دنده‌ها و تعیین جنس آنها، طراحی هندسه چرخ‌دنده‌های بیضی شکل در نرم‌افزار گیرأتیکس[5] به عنوان یکی از بروزترین نرم‌افزارهای طراحی چرخ‌دنده، به انجام رسید. سپس بررسی حرکتی چرخ‌دنده‌ها با استفاده از ماژول سالیدورکس موشن[6] در نرم‌افزار سالیدورکس[7] اجرا شد تا از عملکرد دقیق چرخ‌دنده‌های طراحی‌شده اطمینان حاصل گردد. در نهایت بعد از تأیید طراحی با انتقال مدل دو بعدی چرخ‌دنده‌ها به دستگاه وایرکات نمونه‌های اولیه فلزی با دقت بالا تولید شد.

۲ چرخ‌دنده‌های بیضوی

چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل در دو نوع تک‌گوشه[8] و دوگوشه[9] طراحی و تولید می‌گردد [۶]. با توجه به اینکه در این مقاله چرخ‌دنده‌های بیضوی مورد بررسی از نوع دو گوشه هست در این بخش به معرفی پارامترهای طراحی در این نوع چرخ‌دنده‌های بیضوی پرداخته شده است. در چرخ‌دنده‌های بیضوی دوگوشه محور شفت چرخ‌دنده‌ها منطبق بر مرکز بیضی گام است. همچنین با وجود ثابت بودن سرعت زاویه‌ای چرخ‌دنده محرک، سرعت زاویه‌ای چرخ‌دنده متحرک در فواصل یک چهارم دور چرخ‌دنده محرک افزایش و کاهش می‌یابد. نمایی از این نوع از چرخ‌دنده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. بر طبق شکل ۱، فاصله بین محورهای جفت چرخ‌دنده درگیر در حالتی که چرخ‌دنده محرک و متحرک به اندازه θ و ϕ دارای دوران هستند، برابر a فرض شده است. در این حالت نسبت سرعت‌های چرخشی را می‌توان با استفاده از دیفرانسیل $\frac{d\phi}{d\theta}$ به دست آورد [۱].



شکل ۱: چرخ‌دنده‌های درگیر بیضی شکل از نوع دو گوشه [۱].

همچنین شعاع گام چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک را می‌توان به صورت $r_\theta = r(\theta)$ و $r_\phi = r(\phi)$ ارائه نمود که در نقطه تماس، می‌توان آنها را توسط روابط (۱)، (۲) و (۳) به دست آورد [۱]:

$$r_\theta + r_\phi = a \qquad (۱)$$

$$v_\theta = w_\theta r_\theta = w_\phi r_\phi = v_\phi \qquad (۲)$$

$$w_\theta = \frac{d\theta}{dt}\ ,\ w_\phi = \frac{d\phi}{dt} \qquad (۳)$$

که در این روابط، v_θ و v_ϕ سرعت‌های مماسی دو چرخ‌دنده در نقطه تماس و w_θ و w_ϕ سرعت‌های زاویه‌ای دو چرخ‌دنده محرک و متحرک است. از روابط (۲) و (۳) به آسانی می‌توان نتیجه گرفت که نسبت سرعت‌های چرخشی از رابطه (۴) قابل محاسبه هست [۱، ۵].

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{r_\theta}{r_\phi} \qquad (۴)$$

با جاگذاری رابطه (۴)، در رابطه (۱) می‌توان مقادیر شعاع گام چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک را به صورت روابط (۵) و (۶) به دست آورد [۵].

$$r_\theta = \frac{\frac{d\phi}{d\theta}}{\frac{d\phi}{d\theta}+1}a \qquad (۵)$$

$$r_\phi = \frac{1}{\frac{d\phi}{d\theta}+1}a \qquad (۶)$$

همچنین محیط دایره گام چرخ‌دنده محرک، L_θ، از رابطه (۷) قابل محاسبه است [۱].

$$L_\theta = a\int_0^{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\left(1+\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2}\left[\left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2+\frac{\left(\frac{d^2\phi}{d\theta^2}\right)^2}{\left(1+\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2}\right]} \qquad (۷)$$

و در نهایت مدول چرخ‌دنده بیضوی محرک m، بر حسب تعداد صحیح دندانه‌های چرخ‌دنده محرک، Z_θ به شکل رابطه (۸) قابل دسترسی است [۱، ۵]:

$$Z_\theta = \frac{L_\theta}{\pi m}d\theta \qquad (۸)$$

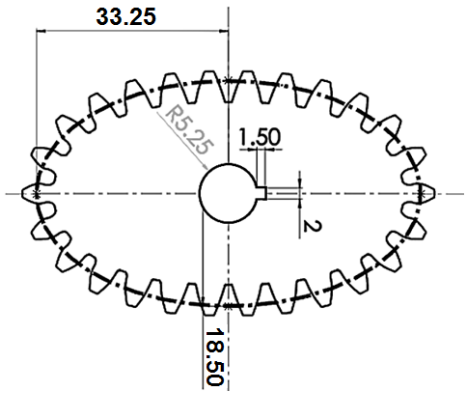
به همین ترتیب می‌توان مقادیر L_ϕ و Z_ϕ را برای چرخ‌دنده متحرک نیز محاسبه نمود.

[5] Gearotics [6] Solidworks motion [7] Solidworks [8] unilobe elliptical gears [9] bilobe elliptical gears

۳ مواد و روش‌ها

۱.۳ دمونتاژ چرخ‌دنده‌های دبی‌سنج، اندازه‌گیری ابعاد و تعیین جنس آن

دبی‌سنج بررسی‌شده در این تحقیق، دبی‌سنج مدل Flowmec ساخت کشور هلند با قابلیت دبی‌سنجی ۱۵ تا ۵۰ لیتر بر دقیقه است. برای دمونتاژ چرخ‌دنده‌های بیضوی ابتدا پیچ‌های درپوش دبی‌سنج باز شده و بعد از برداشتن درپوش، با بیرون کشیدن اورینگ دور محفظه استقرار چرخ‌دنده‌ها به‌آسانی می‌توان چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل را از داخل دبی‌سنج بیرون کشید. بعد از تمیزکاری چرخ‌دنده‌ها ابعاد قطر بزرگ و کوچک چرخ‌دنده‌های بیضوی و قطر سوراخ شفت روی آنها به ترتیب با استفاده از میکرومتر و کولیس دیجیتال اندازه‌گیری گردید. سپس با استفاده از روابط ارائه‌شده در بخش قبلی، ابعاد بیضی گام چرخ‌دنده‌ها تعیین شد. براساس محاسبات انجام شده مدول چرخ‌دنده‌های بیضی شکل در این نوع از دبی‌سنج برابر ۲/۲ میلیمتر تعیین گردید. در شکل ۲، ابعاد نهایی تعیین‌شده برای بیضی گام دو چرخ‌دنده مشابه بیضوی درگیر در این تحقیق، ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که ضخامت هر دو چرخ‌دنده بیضوی برابر چهل و پنج میلیمتر هست.



شکل ۲: ابعاد بیضی گام در چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل دبی‌سنج Flomec مورد بررسی در این تحقیق.

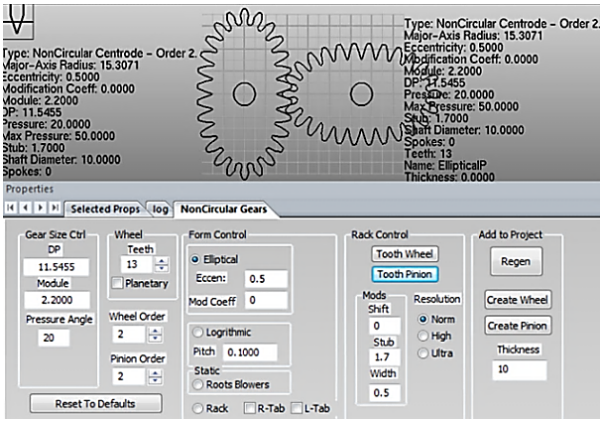
برای تعیین ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در ساخت چرخ‌دنده‌ها از دستگاه کوانتومتری[۱۰] مدل Foundry Master Pro استفاده گردید. جدول ۱، ترکیب شیمیایی عناصر اصلی به دست آمده برای این فولاد را که نزدیک به مقادیر فولاد AISI 6150 است، نشان می‌دهد. به واسطه عناصر آلیاژی، این فولاد یکی از پرکاربردترین فولادهای مورد استفاده در ساخت چرخ‌دنده‌ها و شفت‌ها است. سختی چرخ‌دنده‌ها نیز با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی فالکون ۴۰۰[۱۱] برابر ۲۲۱ ویکرز[۱۲] تعیین شد.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در ساخت چرخ‌دنده‌های بیضی شکل دبی‌سنج مورد بررسی.

عناصر	C	Si	Mn	V
٪ درصد	۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۹	۰/۱۵
عناصر	P	S	Cr	
٪ درصد	۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۱/۰۸	

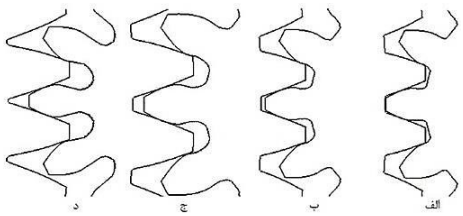
۲.۳ طراحی پروفیل و شکل هندسی چرخ‌دنده‌های بیضوی

با توجه به اینکه فرامین موجود در نرم‌افزارهای طراحی مرسوم نظیر سالیدورکس و کتیا، قادر به طراحی و نمونه‌سازی دقیق از چرخ‌دنده‌های با منحنی گام غیردایروی نیست، همواره ترسیم این نوع از چرخ‌دنده‌ها در این نرم‌افزارها توأم با خطا است. بنابراین در اجرای این تحقیق، فرآیند طراحی چرخ‌دنده‌های مشابه بیضوی در نرم‌افزار گیرأتیکس که نرم‌افزاری تخصصی و ویژه برای طراحی انواع چرخ‌دنده‌ها است، مورد استفاده قرار گرفت [۷]. متأسفانه این نرم‌افزار در کشور ایران شناخته‌شده نیست و همین امر طراحی چرخ‌دنده‌ها و تعیین پارامترهای آنها را در نرم‌افزارهای عمومی‌تر طراحی، با مشکلات زیادی همراه کرده است. برای طراحی مدل چرخ‌دنده‌ها در محیط نرم‌افزار گیرأتیکس باید با استفاده از قسمت چرخ‌دنده‌های غیردایروی پارامترهای محاسبه‌شده در قسمت قبلی را به صورت عددی به نرم‌افزار وارد کرد. فرآیند طراحی پروفیل دندانه‌ها در این نرم‌افزار به صورت کاملاً اتوماتیک و با دقت بسیار بالایی انجام می‌گیرد. در شکل ۳، نمایی از محیط این نرم‌افزار و مدل دوبعدی چرخ‌دنده‌های بیضوی طراحی‌شده، ارائه شده است.



شکل ۳: طراحی هندسه چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل در محیط نرم‌افزار گیرأتیکس.

با توجه به اهمیت شکل ریشه دندانه در چرخ‌دنده‌های مورد استفاده در ابزارهای دقیق مانند دبی‌سنج، در این نرم‌افزار دستوری به نام استاب[۱۳] در نظر گرفته شده که در آن اپراتور با تغییر مقادیر عددی می‌تواند انواع شکل ریشه دندانه را روی چرخ‌دنده‌ها ایجاد کند. در شکل ۴، اثر تغییر این پارامتر بر روی شکل ریشه دندانه در چرخ‌دنده‌های بیضوی این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۴: کنترلر شکل ریشه دندانه در چرخ‌دنده‌های بیضی شکل، (الف) ۰/۸، (ب) ۱، (ج) ۱/۲ و (د) ۱/۷ [۷].

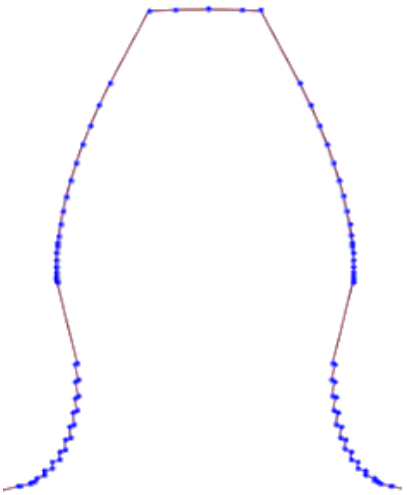
با توجه به شکل ۴، با افزایش عدد استاب میزان اندرکات[۱۴] یا فضای زیرین مجاور ریشه دندانه نیز افزایش می‌یابد که این امر مناسب برای طراحی

[10] spark light emission spectrometer [11] FALCON 400 hardness tester [12] Vickers hardness (HV) [13] stub [14] undercut

چرخ‌دنده‌های دبی‌سنج نیست. در حالت ۰/۸ نیز امکان اختلال در عملکرد چرخ‌دنده‌ها و سایش ریشه دندانه به واسطه شبیه‌سازی حرکتی نرم‌افزار تأیید گردید. از این رو در این تحقیق میزان استاب برابر یک فرض شده است.

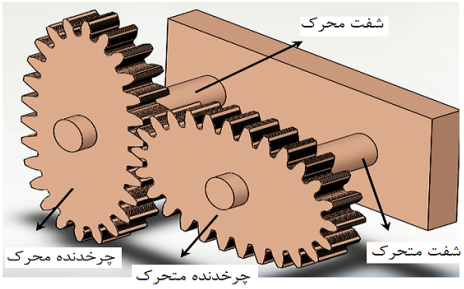
۳.۳ مونتاژ چرخ‌دنده‌های بیضوی و شبیه‌سازی حرکتی آنها

بعد از تأیید طراحی انجام شده برای چرخ‌دنده‌های بیضوی در محیط نرم‌افزار گیرأتیکس، مدل دو بعدی چرخ‌دنده‌های بیضی شکل با استفاده از فرمت dxf. به نرم‌افزار سالیدورکس منتقل و در آن با استفاده از دستور اکسترود[15] به حالت سه‌بعدی تبدیل شد [۸]. در شکل ۵، نقاط تعیین شده توسط نرم‌افزار گیرأتیکس بعد از انتقال به نرم‌افزار سالیدورکس، برای ترسیم پروفیل دندانه چرخ‌دنده بیضوی به طور نمونه بر روی یک دندانه نشان داده شده است.



شکل ۵: نقاط تعیین شده برای ترسیم پروفیل دندانه بر روی چرخ‌دنده‌های بیضوی در نرم‌افزار گیرأتیکس.

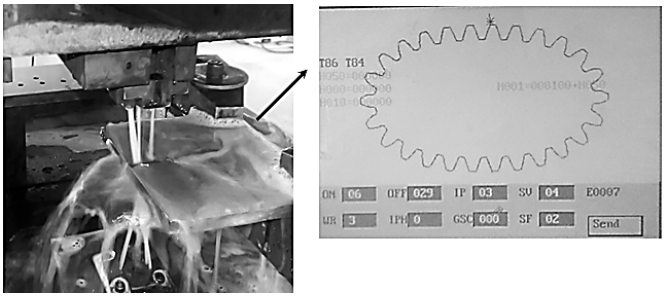
سپس دو چرخ‌دنده بیضی شکل سه‌بعدی، به محیط مونتاژ در نرم‌افزار سالیدورکس منتقل شد و با استفاده از قیود هندسی، مطابق با ابعاد و فاصله محوری بین شفت چرخ‌دنده‌ها در دبی‌سنج که برابر ۵۵/۲۶ میلیمتر بود، بر روی هم مونتاژ گردید. در شکل ۶، نمایی از چرخ‌دنده‌های سه‌بعدی مونتاژشده در محیط نرم‌افزار سالیدورکس ارائه شده است. برای شبیه‌سازی حرکتی چرخ‌دنده‌های بیضی شکل از ماژول سالیدورکس موشن در نرم‌افزار سالیدورکس استفاده گردید، تا به کمک آن بتوان نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای را در یک سیکل حرکتی چرخ‌دنده‌های بیضی شکل به دست آورد.



شکل ۶: مونتاژ چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل در نرم‌افزار سالیدورکس.

۴.۳ ساخت چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل

با توجه به اینکه برای تولید چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل نیاز به دستگاه هاب ویژه است و این تجهیزات در داخل کشور موجود نیست، لذا در این تحقیق برای تولید چرخ‌دنده‌های بیضی شکل از دستگاه وایرکات شارمیلز ۳۱۰[16] ساخت کشور سوئیس با ولتاژ ورودی ۱۰۰ ولت استفاده گردید. فرآیند وایرکات بر روی بلوک از جنس فولاد AISI 6150 به ضخامت ۴۵ میلیمتر و در داخل محلول دی الکتریک آب مقطر انجام گردید. برای برشکاری بلوک فولادی در دستگاه وایرکات از سیم مولیبدنی شماره Mo005120 با قطر ۰/۰۲۵ میلیمتر که دارای استحکام و نقطه ذوب بالاست، همراه با سرعت سیم ۱۶۰ متر بر دقیقه استفاده شده است. در شکل ۷ نمایی از نحوه اجرای فرایند برشکاری چرخ‌دنده بیضوی شکل در دستگاه وایرکات نشان داده شده است.



شکل ۷: تولید چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل در دستگاه وایرکات.

۵.۳ اسکن سه‌بعدی

برای مقایسه هر چه بهتر نتایج بین چرخ‌دنده‌های واقعی و چرخ‌دنده‌های شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار گیرأتیکس، چرخ‌دنده‌های اصلی مورد استفاده در دبی‌سنج با استفاده از اسکنر سه‌بعدی[17] MA3D V1.3 آلمانی با دقت سی میکرون اسکن گردید. سپس نمونه‌های سه‌بعدی اسکن شده از چرخ‌دنده‌های اصلی با نمونه‌های طراحی شده در نرم‌افزار گیرأتیکس از نظر اندازه مقایسه شد. برای اسکن چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل اصلی، از پاشش اسپری پایه پودری، ساخت شرکت مِگنافلوکس[18] بر روی چرخ‌دنده‌های بیضوی استفاده شده است.

۴ بحث و بررسی

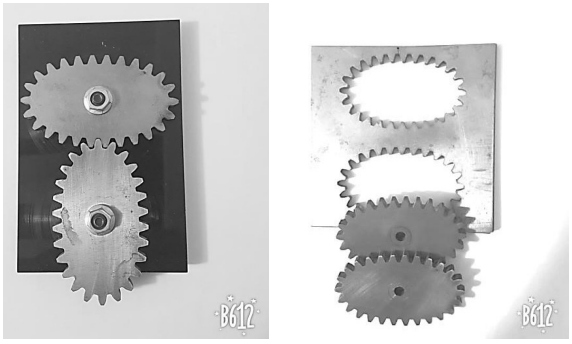
در شکل ۸، چرخ‌دنده‌های بیضوی تولیدشده در دستگاه وایرکات و مونتاژشده بعد از تولید نشان داده شده است. با توجه به شرایط مونتاژ، کیفیت درگیری دو چرخ‌دنده بسیار مناسب بوده و میزان بک‌لش[19] بین دندانه‌های دو چرخ‌دنده با توجه به طراحی آنها برای دبی‌سنج بسیار کم و با دقت بالا است.

با توجه به نیاز به تجهیزات دقیق و فیکسچرهای مخصوص برای سنجش دقیق سرعت و شتاب زاویه‌ای در چرخ‌دنده متحرک، از آنجایی که چرخ‌دنده‌های بیضوی فلزی کاملاً از روی مدل‌های سه‌بعدی طراحی‌شده در محیط نرم‌افزار سالیدورکس تولید گردیده، برای شبیه‌سازی به جای مدل‌های

[15]extrude [16]Charmilles robofil 310 wire EDM [17]3D scanner [18]Magnaflux [19]backlash

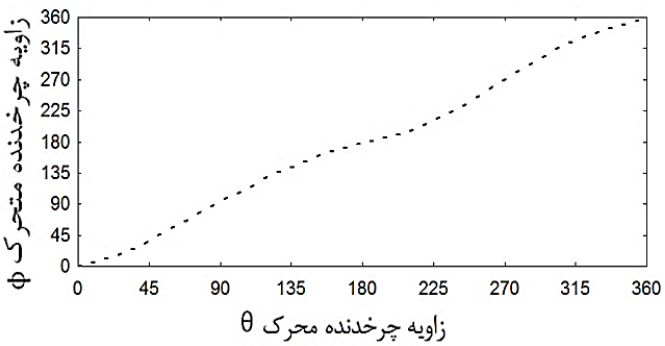
واقعی از مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است. فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از ماژول سالیدورکس موشن انجام گرفت. مطابق شکل ۱، رابطه بین زاویه چرخش در چرخ‌دنده محرک، با زاویه چرخش، سرعت و شتاب زاویه‌ای در چرخ‌دنده متحرک در شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۱، کاملاً مشهود است که نمودار تغییرات زاویه، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای چرخ‌دنده متحرک نسبت به زاویه دورانی چرخ‌دنده محرک به صورت سینوسی است. همچنین دامنه تغییرات زاویه چرخ‌دنده متحرک در شکل ۹، نسبت به دامنه تغییرات سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای در چرخ‌دنده متحرک (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) کوچک‌تر است. علت این امر را می‌توان چنین استنباط کرد که وقوع ارتعاشات در چرخ‌دنده‌های درگیر با هم، همزمان با تغییرات سرعت زاویه‌ای در چرخ‌دنده بیضی متحرک اتفاق می‌افتد که این امر پدیده‌ای شایع در طراحی چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل هست [۴]. با توجه به نوع سیستم طراحی‌شده می‌توان با اعمال فرآیندهای پرداخت فوق دقیق بر روی دندانه‌های چرخ‌دنده‌های بیضوی ساخته‌شده، دامنه این ارتعاشات را کاهش داد. همچنین چرخ‌دنده‌های بیضوی بررسی‌شده در این تحقیق از نوع درجه دوم هستند که با توجه به شکل ۱۰، دامنه نوسان سرعت زاویه‌ای در یک سیکل چرخشی کامل آن، نزدیک به عدد دو به دست آمده که بیانگر صحت نتیجه به دست آمده از شبیه‌سازی انجام گرفته است.

لازم به ذکر است که درجه یک چرخ‌دنده نوع طراحی ظاهری آن را مشخص می‌نماید، به طور مثال چرخ‌دنده‌های ساده دایروی دارای درجه یک و چرخ‌دنده‌های مثلثی دارای درجه سه است.

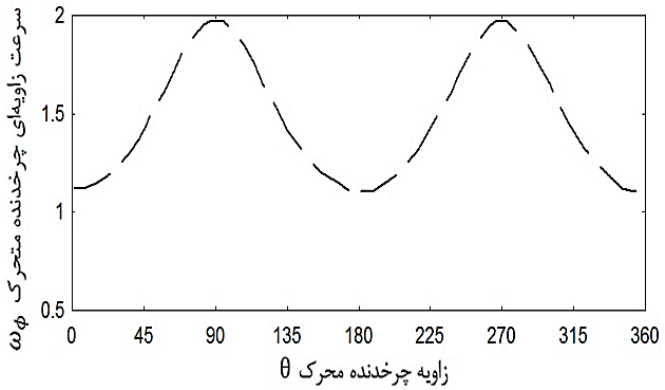


(ب) (الف)

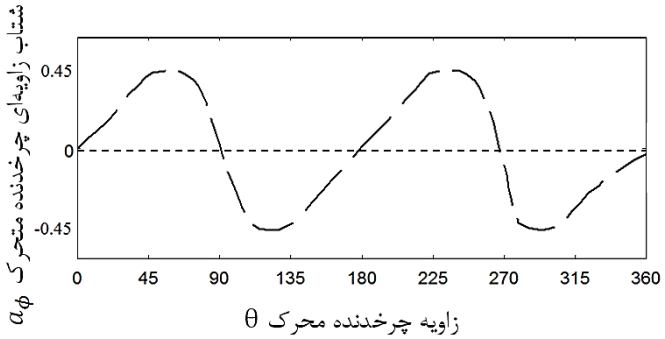
شکل ۸: چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل (الف) بعد از برشکاری در وایرکات، (ب) بعد از مونتاژ.



شکل ۹: نمودار تغییرات زاویه‌ای در چرخ‌دنده‌های بیضوی درگیر.

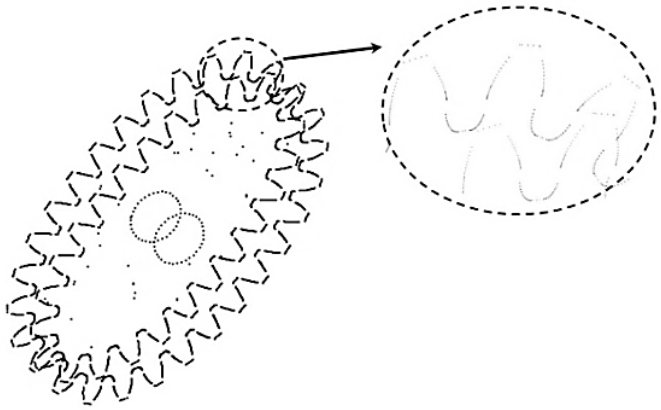


شکل ۱۰: نمودار تغییرات زاویه چرخ‌دنده محرک در برابر سرعت زاویه‌ای چرخ‌دنده متحرک.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات زاویه چرخ‌دنده محرک در برابر شتاب زاویه‌ای چرخ‌دنده متحرک.

همچنین با توجه به یکی بودن هر دو چرخ‌دنده بیضوی شکل در این تحقیق، یکی از چرخ‌دنده‌های اصلی دبی‌سنج با استفاده از اسکنر سه‌بعدی، اسکن شده و نتایج اسکن آن به صورت مجموعه‌ای از ابر نقاط[20] جهت تولید مدل سه‌بعدی مطابق شکل ۱۲، به نرم‌افزار جیومَجیک[21] انتقال داده شد.



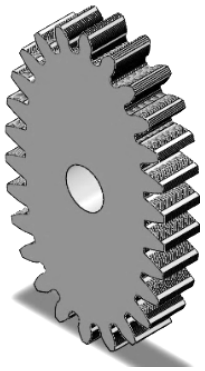
شکل ۱۲: ابر نقاط حاصل از اسکن یکی از چرخ‌دنده‌های بیضوی شکل.

سپس در نرم‌افزار جیومَجیک سطوحی مشخص، از ابر نقاط مربوط به مدل اسکن‌شده چرخ‌دنده بیضی شکل عبور داده شد و با اتصال آنها به هم، مدل توپر سه‌بعدی آن به دست آمد. شکل ۱۳، مدل سه‌بعدی توپر به دست آمده از چرخ‌دنده بیضی شکل سه‌بعدی در این نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

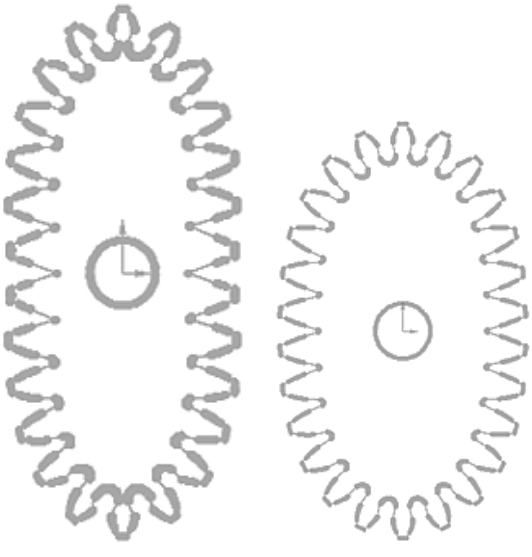
سپس هر دو مدل سه‌بعدی نهایی از مدل اصلی اسکن شد و مدل سه‌بعدی طراحی‌شده در نرم‌افزار گیرأتیکس جهت اطمینان هر چه بیشتر از طراحی

[20] point cloud [21] Geomagic studio 12

صحیح و انطباق مدل‌ها، در نرم‌افزار سالیدورکس مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مقادیر ابعادی و مشخصات هندسی دو قطعه و میزان خارج از بیضی بودن[۲۲] نمونه‌های سه‌بعدی با هم مقایسه گردید. میزان خارج از بیضی بودن، پارامتری مهم در ارزیابی کیفیت چرخ‌دنده‌های تولیدشده بوده و تغییر آن باعث خروج چرخ‌دنده از حالت بیضی کامل می‌گردد. در شکل ۱۴، تغییرات این پارامتر و تأثیر آن بر روی شکل چرخ‌دنده بیضی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حالت بیضی کامل در حالت، ۰/۵، بوده و با افزایش این عدد به تدریج طول قطر بزرگ بیضی بیشتر و قطر کوچک بیضی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش این عدد به میزان صفر، چرخ‌دنده به حالت دایروی کامل تبدیل می‌گردد.



شکل ۱۳: مدل سه‌بعدی توپر از چرخ‌دنده بیضوی شکل اسکن‌شده.



(ب) (الف)

شکل ۱۴: مقایسه چرخ‌دنده‌ها در دو حالت خروج از بیضوی شدن، (الف) ۰/۵ (در این تحقیق)، (ب) ۰/۸.

نتایج مقایسه دو نمونه چرخ‌دنده بیضی شکل در محیط سالیدورکس، بیانگر تفاوت معناداری بر روی قطر کوچک و بزرگ چرخ‌دنده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی نبود و میزان خروج از مرکزی در چرخ‌دنده شبیه‌سازی‌شده نسبت به چرخ‌دنده واقعی به میزان ۰/۰۲ میکرون روی قطر بزرگ و کوچک ارزیابی شد که عملاً تأثیری بر روی عملکرد چرخ‌دنده‌ها نخواهد داشت.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند مهندسی معکوس چرخ‌دنده‌های بیضی شکل مورد استفاده در دبی‌سنج از نوع جابجایی مثبت مدل Flowmec ساخت کشور هلند مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور نمونه‌های اصلی از روی دبی‌سنج دمونتاژ شد و بعد از اندازه‌گیری اولیه آنها با ابزارهای دقیق، فرآیند طراحی کامپیوتری هندسه چرخ‌دنده‌ها و مونتاژ آنها در محیط نرم افزاری انجام گرفت. سپس نمونه‌های تحلیل‌شده، در دستگاه وایرکات با جنس اصلی تولید گردید. در ادامه برای بررسی دقیق عملکرد چرخ‌دنده‌های شبیه‌سازی‌شده، نمودارهای شبیه‌سازی حرکتی آنها نیز تحلیل شد. همچنین برای حصول اطمینان از دقت مدل‌های شبیه‌سازی‌شده، یکی از چرخ‌دنده‌های بیضی شکل اصلی مورد استفاده در دبی‌سنج اسکن شد و نتایج آن با مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار سالیدورکس مقایسه گردید. نتایج بیانگر دقت مناسب روش مهندسی معکوس به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق بوده و نشان داد که میزان اختلاف در خارج از بیضی بودن نمونه‌های اصلی و شبیه‌سازی‌شده برابر با ۰/۰۲ میکرون است.

مراجع

[1] Maitra, Gitin M. *Handbook of gear design*. Tata McGraw-Hill Education, 1994.

[2] Kuczewski, M. Designing elliptical gears. *Mach. Des*, 60(7):116–118, 1988.

[3] Bair, Biing-Wen. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2-3):139–147, 2002.

[4] Chen, Chien-Fa and Tsay, Chung-Biau. Computerized tooth profile generation and analysis of characteristics of elliptical gears with circular-arc teeth. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2):226–234, 2004.

[5] Litvin, Faydor L, Gonzalez-Perez, Ignacio, Yukishima, Kenji, Fuentes, Alfonso, and Hayasaka, Kenichi. Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 196(41-44):4321–4336, 2007.

[6] Liu, Dawei, Ba, Yanbo, and Ren, Tingzhi. Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive. *Mechanism and Machine Theory*, 134:338–348, 2019.

[7] Träger, Mattias F, Krohmer, Erwin, Krieger, Yannick S, and Lüth, Tim C. Automatisierte konstruktion von zahnradgetrieben für die herstellung mittels rapid-prototyping-verfahren. in *11. Kolloquium Getriebetechnik*, pp. 235–254, 2015.

[8] Sam, Rosidah, Arrifin, Kamarul, and Buniyamin, Norlida. Simulation of pick and place robotics system using solidworks softmotion. in *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pp. 1–6. IEEE, 2012.

[22] eccentricity