

## رهیافتی بر طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه و ساخت به روش برشکاری لیزری

سامان  
خلیل پور آذری\*

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

**چکیده:** امروزه از چرخدنده های غیردایروی در مقاصد مختلفی که بارزترین آن ایجاد تغییرات سیکلی در میزان سرعت و گشتاور در یک دور کامل است، برای طراحی و ساخت دستگاه های مختلف در صنایع رباتیک، نساجی و بسته بندی استفاده می شود. در این مقاله به بررسی روش طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه از جنس پلاستیک پرداخته شده است. طراحی پروفیل دندانه های چرخدنده با توجه به محاسبات ریاضی انجام و ترسیم شکل سه بعدی چرخدنده ها براساس این محاسبات آغاز گردید. سپس مدل سه بعدی چرخدنده ها در نرم افزار مونتاژ و حرکت آنها شبیه سازی شد. برای تولید چرخدنده های مربعی از فرآیند برشکاری لیزری استفاده گردید. بررسی نتایج و عدم بروز موانعی نظیر گیر کردن چرخدنده ها در هنگام چرخش، لقی دورانی نامناسب و یا عدم امکان مونتاژ پذیری به دلیل طراحی ابعاد نادرست، بیانگر صحت طراحی انجام شده می باشد. تطبیق نمودار سرعت زاویه ای چرخدنده محرک با شماره لوب نیز بیانگر صحت اجرای فرآیند شبیه سازی چرخدنده های مربعی می باشد.

**واژه های راهنما:** چرخدنده مربعی، طراحی، تولید، مونتاژ، برشکاری لیزری

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

## An approach to design a pair of similar square gears and manufacture by laser cutting process

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

**Abstract:** Non-circular gears for their ability to create cyclic changes in the velocity and torque of the gears in each revolution employed for various purposes such as robotics, textile, and packaging industries. In this paper, the design methodology of a similar pair of plastic square gears is investigated. The design of gear profiles was performed according to complex mathematical calculations and the three-dimensional model of the gears was designed. Then the assembly of the gears was performed in CAD software and their motion was simulated. The laser cutting process was utilized to manufacture square gears. Examination of the results and the absence of special errors such as the gear's inappropriate meshing during rotation, improper backlash, or the impossibility of assembly due to incorrect dimensions design, indicate the accuracy of the design methodology. Moreover, the use of thin plastic sheets as raw material in the laser cutting process has prevented the laser beam from diverging and technical faults of gear samples. Comparing the angular speed of the driver gear with the lobe number also shows the accuracy of the square gear simulation process.

**Keywords:** Square gear, Design, Manufacturing, Assembly, Laser cutting process

## ۱- مقدمه

طراحی و تولید نمود. ساندی و همکاران در طی تحقیقات کاربردی انجام شده بر روی چرخنده‌های بیضوی علاوه بر معرفی دقیق‌تر مکانیزم حرکتی آنها، چرخنده‌های فوق را از نظر رابطه بین شکل چرخنده و سرعت حرکتی بررسی نمودند [۳]. آنها توانستند روشی خلاقانه و بهینه‌تر را برای تعیین شکل دندانه‌ها و منحنی گام چرخنده بیضوی ارائه دهند. همچنین آنها از طریق پیاده‌سازی سیستم طراحی و ساخت یکپارچه به کمک کامپیوتر موفق به تولید این نوع از چرخنده‌های غیردایروی به صورت کنترل اتوماتیک بر روی ماشین سی-ان-سی پنج محوره گردیدند [۳].

با توجه به موضوع مقاله حاضر و تمرکز خاص بر روی چرخنده‌های مربعی لازم به توضیح است که مقالات علمی در این زمینه به دلیل جدید بودن بحث، بسیار محدود بوده و تحقیق مستقلی با اشاره خاص در زمینه طراحی و ساخت چرخنده‌های مربعی وجود ندارد و در بیشتر مقالات به صورت جمعی به تمام چرخنده‌های غیر دایروی به صورت بسیار مختصر پرداخته شده است. از طرف دیگر اقتضای طراحی هر نوع چرخنده غیردایروی استفاده از روشی مستقل و کارآ است که مستقیماً بر کیفیت چرخنده‌ها و عملکرد آنها تأثیرگذار می‌باشد. بنابراین با توجه به گسترش روزافزون کاربرد این نوع چرخنده‌ها در صنایع مختلف و نبود تحقیقات مشابه در ایران، نوآوری اصلی این مقاله را می‌توان ارائه روشی منظم و دقیق برای طراحی و شبیه‌سازی حرکتی چرخنده‌های مربعی دانست که قبلاً در هیچ مقاله‌ای به آن به صورت موضوعی مستقل پرداخته نشده است. همچنین به دلیل پیچیدگی و هزینه بالای ساخت قالب در فرآیند تزریق پلاستیک و مشکلات این روش در ساخت قطعات با اندازه و پهنای زیاد و ضخامت کم مانند چرخنده‌های غیردایروی، در این مقاله روش برشکاری لیزری برای اولین بار جهت ساخت چرخنده‌های مربعی نوع پلاستیکی پیشنهاد گردیده است. در ادامه نویسنده جهت تبیین هر چه بیشتر عملکرد چرخنده‌های مربعی به دو مقاله کاربردی جدید اشاره نموده است.

انتقال گشتاور در ربات‌های با اندازه‌های مختلف، یکی از کاربردهای چرخنده مربعی می‌باشد. در یکی از تحقیقات ارائه شده، از چرخنده مربعی برای انتقال حرکت قابل کنترل در ربات رفع گرفتگی لوله‌های فاضلاب استفاده شده است. در این ربات با شناسایی مانع، روتور محرک شروع به حرکت کرده و گشتاور بالا را از طریق چرخنده‌های مربع شکل به چرخ‌های ربات منتقل می‌کند. تحقیقات نشان داد که استفاده از چرخنده‌های مربعی به عنوان گیربکس انتقال نیرو در این ربات سبب پایداری در انتقال نیرو شده و در موارد موردنیاز می‌توان حتی قدرت‌های

چرخنده‌های غیردایروی ابتکاری مهندسی و خلاقانه برای جایگزینی همزمان خواص بادامک‌ها و چرخنده‌های مرسوم با دایره گام دایروی در طراحی و ساخت تجهیزات مهندسی می‌باشد [۱]. همانند تمام چرخنده‌های رایج در دنیای ساخت و تولید، چرخنده‌های غیردایروی نیز برای انتقال حرکت دورانی بین محورها مورد استفاده قرار می‌گیرد با این تفاوت که در آنها برخلاف سایر انواع چرخنده‌ها، انتقال حرکت دورانی با تغییرات ممتد در نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای همراه می‌باشد. به عبارت دیگر تبدیل سرعت ورودی ثابت به سرعت خروجی متغیر و ایجاد حرکات نوسانی به شکل حرکت- سکون در هر سیکل چرخشی از مزایای مهم استفاده از چرخنده‌های غیردایروی است [۱]. این ویژگی زمینه را برای استفاده از این نوع چرخنده‌ها در مکانیزم‌های نیازمند سرعت‌های متغیر در طول سیکل حرکتی مشخص مانند دستگاه‌های نساجی، بسته‌بندی و نیز صنایع رباتیک فراهم آورده است [۲]. باید توجه داشت که آزادی عمل تولیدکننده برای طراحی و ساخت یک چرخنده غیردایروی بسیار بالا بوده و می‌تواند آنها را در اشکال متفاوتی مانند شکل‌های بیضوی و چندگوشه طراحی نماید که با استفاده از هر شکل خاص چرخنده، می‌توان حرکت خروجی متفاوتی را از مکانیزم ساخته شده، انتظار داشت. تفاوت دیگر چرخنده‌های غیردایروی با چرخنده‌های مرسوم دایروی را می‌توان مسطح بودن هندسه کلی این نوع چرخنده‌ها دانست که استفاده از آنها را به منظور بهینه‌سازی فضای مورد استفاده در ماشین‌های محرک و داشتن طراحی فشرده و کم‌حجم، تسهیل می‌نماید. از این رو در طی روند تاریخی توسعه چرخنده‌های غیردایروی همواره تلاش بر به کارگرفتن آنها در طراحی ماشین‌های اتوماتیک و ابزارهای اندازه‌گیری خاص بوده است. اولین تلاش‌ها در زمینه کاربرد عملی چرخنده‌های غیردایروی را می‌توان در تحقیقات کاربردی بورمستر در ساخت مکانیزم‌های حرکتی با سرعت متغیر در سال ۱۸۸۸ جستجو نمود [۲]. البته باید توجه داشت که تا سال‌های متمادی، فقدان روش ساخت مناسب برای چرخنده‌های غیردایروی، عاملی محدودکننده در کاربرد آنها بود. امروزه تمام محاسبات موردنیاز برای طراحی و ساخت چرخنده‌های غیردایروی براساس این تحقیقات و بر پایه طراحی چرخنده‌های بیضوی استوار است [۲]. به عبارت دیگر برای ورود به این حیطه از طراحی لزوم آشنایی با روند طراحی چرخنده‌های بیضوی ضروری است تا از طریق بسط، ترکیب و افزودن پارامترهای دیگر بتوان سایر انواع چرخنده‌های غیردایروی را

در درگیری چرخنده‌های غیردایروی، پروفیل دندانه‌ها باید به درستی با استفاده از یک چرخنده شانه‌ای مرجع مش بندی شود [۶]. این شرط زمانی محقق خواهد شد که خط مرجع چرخنده شانه‌ای به درستی بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی حرکت نماید. خط غلتش چرخنده غیردایروی ( $L$ )، در شکل ۱ و در مختصات قطبی به صورت  $L = r(\rho)$  توصیف شده است. همچنین خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع ( $S$ ) با فرم مشخص بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی حرکت می‌نماید. در اینصورت مختصات نقطه تماس  $P$  در درگیری دو چرخنده به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۶]:

$$P[X, Y] = [r(\rho) \cos(\rho), r(\rho) \sin(\rho)] \quad (1)$$

در اینصورت زاویه بین خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع و خط غلتش چرخنده غیردایروی به شکل رابطه (۲) است [۶]:

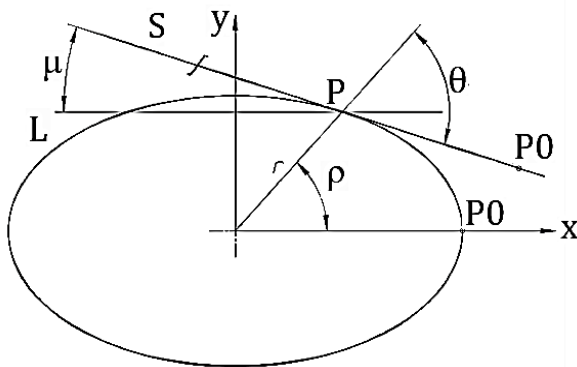
$$\theta = \arctg\left(\frac{r(\rho)}{\frac{dr}{d\rho}}\right) \quad (2)$$

بنابراین:

$$\mu = \rho - \theta \quad (3)$$

باید توجه داشت غلتش دو چرخنده در حالت  $\rho = 0$  اتفاق می‌افتد و در این حالت خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی غلتیده و نقطه  $P_0$  به نقطه  $P$  می‌رسد. بنابراین طول بین  $P_0$  و  $P$  از خط  $L$  برابر با طول  $P_0P$  و  $P$  روی خط  $S$  می‌باشد. اگر  $L$  از  $i$  بخش  $l_i$  تشکیل شده باشد، نقطه تحلیل شده  $P$  مربوط به طول بخش‌های  $l_1$  و  $l_2$  از رابطه (۴) به دست می‌آید [۶]:

$$|w| = \sum_{n=1}^j l_n \quad (4)$$



شکل ۱ نحوه غلتش خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع ( $S$ ) بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی ( $L$ ) [۶]

بیشتری را نیز از طریق گیربکس مربعی به چرخ‌ها منتقل نمود [۴]. در طرح تحقیقاتی دیگری برای طراحی سیستم انتقال قدرت در وسایل حمل و نقل اتوماتیک با کاربرد در سیستم‌های ذخیره‌سازی و انبارداری از چرخنده‌های مربعی استفاده شده است. برای کنترل تغییرات قدرت منتقل شده به چرخ‌ها در این سیستم‌های اتوماتیک از یک موتور جریان مستقیم استفاده شد که قابلیت انتقال گشتاور در محدوده سی کیلوگرم-سانتیمتر و میزان چرخش تا بازه ۵۰۰ دور را دارا بود. کاربرد این نوع چرخنده‌ها در این سیستم‌های محرک کارآیی مناسب آنها را برای انتقال و پایداری سیستم تأیید نموده است [۵].

در تحقیق حاضر، یک جفت چرخنده غیردایره‌ای مربعی شکل مشابه از جنس پلاستیک با تعیین پارامترهای هندسی طراحی شده و سپس مدل‌های کامپیوتری از آنها در نرم‌افزار تهیه شد. بعد از مونتاژ چرخنده‌ها و اجرای تحلیل بر روی نحوه حرکت و درگیری چرخنده‌ها و با تأیید نتایج به دست آمده، هر دو چرخنده با استفاده از فرآیند برشکاری لیزری تولید شد. روش برشکاری لیزری روشی مؤثر و دقیق برای تولید اینولوت خاص ایجاد شده در چرخنده‌های غیردایروی با دقت‌های بالا بوده و امروزه از آن می‌توان به عنوان یکی از روش‌های ماشینکاری مدرن به صورت وسیعی در تولید چرخنده‌های غیردایروی استفاده نمود.

## ۲- معرفی اصول طراحی چرخنده‌های غیردایروی

طراحی چرخنده‌های غیردایره‌ای دارای مشکلات زیادی به خاطر پیچیدگی فرم خاص دندانه‌ها می‌باشد که شامل محاسبات پیچیده ریاضی بوده و در اکثر نرم‌افزارهای طراحی مرسوم روش مناسبی برای طراحی این گونه از چرخنده‌ها ارائه نشده است. در این بخش ابتدا به روش محاسباتی برای طراحی فرم چرخنده‌های غیردایره‌ای اشاره می‌گردد. در چرخنده‌های غیردایره‌ای، هر سطح پهلویی هر دندانه متفاوت از دندانه مجاور است تا بتواند غلتش صحیح دو چرخنده را در طی دوران کامل و در زوایای متنوع تأمین نماید. البته در موارد بسیار نادر خصوصاً زمانی که بخشی از چرخنده غیردایروی دارای حالت مدور یا دایره‌ای باشد، می‌توان از اشکال یکسان برای طراحی دندانه‌ها فقط در آن قسمت چرخنده استفاده نمود [۱]. همین تفاوت فرم دندانه‌های مستقر بر روی محیط بیرونی چرخنده غیردایروی، کنترل کیفیت این نوع چرخنده‌ها را به امری بسیار حساس و دقیق بدل نموده و برای این کار به ناچار باید از دستگاه‌های خاصی استفاده نمود. به منظور جلوگیری از مشکلات احتمالی

چرخنده‌های بیضوی شکل، این مقدار برابر با عدد یک و در چرخنده‌های مثلثی و مربعی شکل، شماره لوب به ترتیب برابر با عدد سه و چهار می‌باشد که با افزایش شماره لوب تعداد گوشه‌های چرخنده غیردایروی افزایش یافته و شکل هندسی چرخنده تغییر می‌نماید.

### ۳- مواد و روشها

#### ۳-۱- حصول به پارامترهای طراحی در چرخنده مربعی

در این تحقیق چرخنده‌های غیردایروی، مشابه و از نوع مربعی است، از این رو با توجه به روابط ارائه شده در قسمت قبل می‌توان پارامترهای اساسی برای طراحی چرخنده مربعی با شماره لوب چهار را تعیین نمود. برای این کار نویسنده تعداد دندان‌های چرخنده مربعی را سی و دو عدد فرض کرده و براساس آن مقدار مدول چرخنده را با استفاده از روابط ارائه شده در بخش قبلی محاسبه نموده است. مقادیر زاویه فشار و ضریب اصلاح چرخنده‌ها نیز به صورت پیش‌فرض به ترتیب برابر با بیست درجه و عدد صفر در نظر گرفته شد. سپس این مقادیر به عنوان مقادیر ورودی برای حصول به مقطع دوبعدی چرخنده مربعی به نرم‌افزار گیرآتیس موشن منتقل گردید. به عبارت دیگر با توجه به اینکه ابزارهای تسهیل‌کننده طراحی چرخنده‌های غیردایروی در نرم‌افزارهای مرسوم طراحی و نقشه‌کشی صنعتی نظیر کتیا و سالیدورکس وجود ندارد، برای طراحی مدل سه‌بعدی این چرخنده‌ها، ابتدا شکل مقطع کلی آنها در قالب مدل دوبعدی توسط نرم‌افزار خاص طراحی چرخنده با نام گیرآتیس موشن به دست آمد. این نرم‌افزار دارای ابزارهای دقیق و توانمندی برای رسم مقاطع دوبعدی شکل پروفیل دندان‌های چرخنده‌های غیردایروی بر حسب پارامترهای ورودی به آن می‌باشد. بدیهی است اجرای اتوماتیک ترسیم مدل‌های دوبعدی مقاطع چرخنده‌ها، فرآیند طراحی را از نظر زمانی به میزان زیادی کاهش داده و راندمان را افزایش می‌دهد. بنابراین برای حصول به مدل دوبعدی چرخنده‌های غیردایروی در نرم‌افزار گیرآتیک موشن، ابتدا پارامترهای پیش‌فرض و محاسبه شده تعداد دندان، زاویه فشار، ضریب اصلاح، شماره لوب و مقدار مدول چرخنده طبق شکل ۲، به صورت عددی به نرم‌افزار وارد گردید. با اعمال این پارامترها فرآیند ترسیم مقاطع چرخنده‌ها به صورت اتوماتیک انجام گرفته و مقادیر خروجی با توجه به پارامترهای

بنابراین اگر خط غلتش چرخنده غیردایروی به  $Z$  بخش که برابر با تعداد دندان‌های چرخنده غیردایروی است تقسیم گردد، می‌توان مدول ( $m$ ) چرخنده را از رابطه (۵) به دست آورد [۶].

$$m = \frac{|L|}{\pi Z} = \frac{\sum_{n=1}^j l_n}{\pi Z} \quad (5)$$

می‌توان شعاع گام چرخنده‌های محرک و متحرک و مقادیر سرعت زاویه‌ای را نیز به صورت  $S = r(\theta)$  و  $L = r(\rho)$  فرض کرده و توسط روابط (۶) تا (۸) به دست آورد [۶]:

$$S = \frac{v_\theta}{w_\theta} = \frac{v_\theta}{\frac{d\theta}{dt}} \quad (6)$$

$$L = \frac{v_\rho}{w_\rho} = \frac{v_\rho}{\frac{d\rho}{dt}} \quad (7)$$

$$v_\theta = v_\rho \quad (8)$$

از روابط (۶) تا (۸) به آسانی می‌توان نسبت سرعت‌های چرخشی را توسط رابطه (۹) محاسبه نمود [۶].

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \frac{S}{L} \quad (9)$$

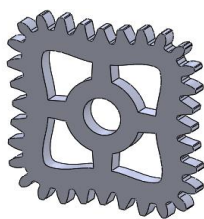
در نهایت تابع نسبت چرخنده باید در یک سیکل چرخشی  $T$  تابعی از سیکل چرخنده‌های محرک ( $T_1$ ) و متحرک ( $T_2$ ) باشد [۶، ۱]:

$$T = \frac{T_1}{n_2} = \frac{T_2}{n_1} \quad (10)$$

که در آن  $n$  شماره لوب<sup>۱</sup> چرخنده است. شماره لوب چرخنده عددی بدون دیمانسیون بوده و نشانگر تعداد گوشه‌های چرخنده غیردایروی طراحی شده می‌باشد. اثر این عدد در نسبت سیکل چرخشی بین چرخنده‌های غیردایروی درگیر با هم می‌باشد که تأثیر مستقیمی بر روی دامنه سیکل نوسانی سرعت و شتاب زاویه‌ای چرخنده محرک در یک دور کامل خواهد داشت. با افزایش شماره لوب تعداد سیکل نوسانی سرعت و شتاب زاویه‌ای چرخنده محرک در یک دور کامل افزایش می‌یابد. بنابراین طراح می‌تواند بر حسب نیاز طراحی خود شماره لوب را برای کنترل نوسانات سیکلی در چرخنده‌های غیردایروی تغییر دهد. بدیهی است که تغییر در شماره لوب سبب تغییر در فرم هندسی چرخنده‌های غیردایروی می‌گردد به طور مثال در

<sup>1</sup> Lobe number

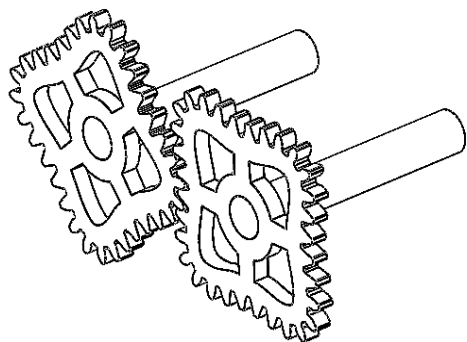
جنس پلاستیکی که باید چرخنده‌ها از آن تولید می‌شد انتخاب گردید. لازم به ذکر است که تغییرات موردنیاز از نظر قطر سوراخ مرکزی چرخنده‌ها و اشکال توخالی شده فرم‌دار در چرخنده‌های مربعی بعد از ساخت مدل سه‌بعدی آنها در نرم‌افزار سالی‌دورکس روی چرخنده‌ها اعمال گردیده است. در شکل ۳ نمایی از چرخنده مربعی سه‌بعدی طراحی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکس ارائه گردیده است.



شکل ۳ مدل سه‌بعدی چرخنده مربعی طراحی شده

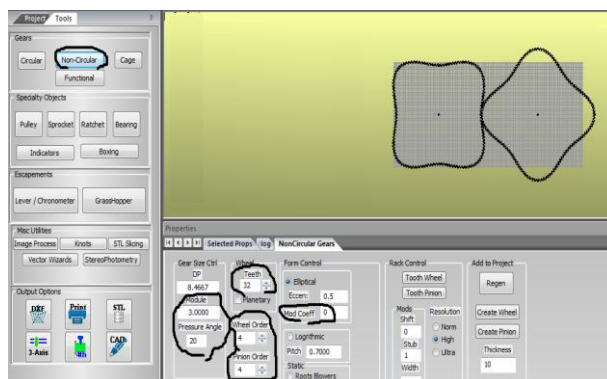
### ۳-۲- تحلیل حرکتی چرخنده‌های مربعی

با ساخت مدل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی در نرم‌افزار سالی‌دورکس، این چرخنده‌ها در محیط مونتاژ توسط قیدهای هندسی موردنیاز بر روی دو شفت مجزا مونتاژ گردید. در شکل ۴، نمایی از مدل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی مونتاژ شده در نرم‌افزار سالی‌دورکس ارائه شده است. سپس تداخل بین دندانه‌های دو چرخنده در یک سیکل کامل چرخشی در این محیط بررسی شده و تحلیل سینماتیک آنها در نرم‌افزار سالی‌دورکس انجام گرفت. خروجی تحلیل سینماتیک در این نرم‌افزار دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای است که می‌توان از آن برای بررسی تعداد پیک‌ها در نمودار سیکل چرخشی و تطابق آن با نمودارهای مرسوم این نوع چرخنده جهت اطمینان از طراحی استفاده نمود.



شکل ۴ چرخنده‌های مربعی درگیر در حالت سه‌بعدی

وارد شده به نرم‌افزار به صورت گزارش از آن دریافت شد. در جدول ۱ مجموعه پارامترهای ورودی و پارامترهای استخراج شده از نرم‌افزار شامل شعاع‌های کوچک و بزرگ چرخنده مربعی شکل، ارتفاع دندانه و فاصله مرکز محورهای دو شفت چرخنده‌ها ارائه گردیده است.



شکل ۲ اعمال پارامترهای ورودی به نرم‌افزار و حصول به شکل دوبعدی چرخنده‌های مربعی شکل

جدول ۱ پارامترهای طراحی و ساخت چرخنده‌های مربعی

پارامتر	چرخنده مربعی
شماره لوب	۴
زاویه فشار (درجه)	۲۰
تعداد دندانه	۳۲
شعاع بزرگ چرخنده (میلیمتر)	۶۱/۶
شعاع کوچک چرخنده (میلیمتر)	۴۷/۲۵
مدول نرمال	۳
ضریب اصلاح	۰
قطر سوراخ مرکزی (میلیمتر)	۲۰
ارتفاع کل دندانه (میلیمتر)	۷/۴
فاصله مراکز محورهای دو شفت چرخنده (میلیمتر)	۱۰۳

با تعیین این پارامترها، فرآیند ترسیم مدل دوبعدی چرخنده‌های مربعی و تبدیل آن به مدل سه‌بعدی آغاز می‌گردد. با ایجاد شکل مقطع دوبعدی چرخنده‌های مربعی در نرم‌افزار گیرآنتیک موشن می‌توان آنها را در قالب پسوند دی-اکس-اف<sup>۱</sup> که یک پسوند دوبعدی ساز است ذخیره و به نرم‌افزار دیگری برای تبدیل به مدل سه‌بعدی منتقل نمود. کار بعدی به مقاطع دوبعدی در این مقاله با نرم‌افزار سالی‌دورکس<sup>۲</sup> انجام شده و در آنجا این مدل‌ها به صورت تک به تک با استفاده از دستور اکستروود به مدل‌های سه‌بعدی با ضخامت معادل با هشت میلیمتر تبدیل گردید تا شکل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی ایجاد شود. میزان ضخامت چرخنده‌های مربعی به توصیه شرکت برشکار لیزر و با توجه به

<sup>۱</sup> \*.Dxf

<sup>۲</sup> Solid works

### ۳-۳- ساخت چرخنده مربعی به روش برشکاری لیزری

جهت تولید نمونه‌های واقعی چرخنده در این تحقیق از فرآیند برشکاری لیزری استفاده شده است. فایل دوبعدی چرخنده مربعی در قالب پسوند دی-اِکس-اِف به دستگاه برشکاری لیزری منتقل و فرآیند برشکاری بر روی ورق پلاستیکی به ضخامت هشت میلیمتر از جنس پلی لاکتیک شفاف طبیعی که یک ترموپلاستیک است انجام گرفت. از ویژگی‌های اصلی پلی لاکتیک شفاف می‌توان به سختی بالای آن اشاره نمود. همچنین این ترموپلاستیک به دلیل استحصال از مواد طبیعی مانند ذرت دارای قابلیت زیست تخریبی بوده و به مرور زمان در مجاورت خاک تجزیه می‌گردد.

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق دستگاه برش لیزر مدل ۱۸۱۳ باکس است که در آن از یک لیزر CO<sub>2</sub> با توان یکصد و بیست وات و سرعت روبشی حداکثر ششصد میلیمتر بر ثانیه استفاده شده است. این دستگاه قابلیت حکاکی و برش بر روی تمام غیرفلزات را دارا بوده و ابعاد میز کارگیر آن نیز ۱۲۰ در ۹۰ سانتیمتر می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از این دستگاه ارائه شده است.



شکل ۵ دستگاه برش با لیزر مدل ۱۸۱۳ باکس

### ۳- بحث و بررسی

شکل ۶، نمایی از ابعاد مهم بر روی چرخنده غیردایروی نوع مربعی را که در این تحقیق طراحی شده است، نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که برای درگیری مناسب بین دو چرخنده غیردایروی علاوه بر برابری مقادیر مدول چرخنده‌ها، باید نسبت شماره لوب هر چرخنده به تعداد دندانه‌های آن با

برای اجرای فرآیند شبیه‌سازی حرکتی هر دو چرخنده مربعی طراحی شده را به محیط مونتاژ نرم‌افزار سالدورکس منتقل کرده و متناسب با سوراخ مرکزی دو چرخنده مربعی، دو شفت با طول دلخواه برای استقرار چرخنده‌ها بر روی آنها نیز به صورت سه‌بعدی طراحی و آن دو شفت نیز به محیط مونتاژ منتقل می‌شود. سپس سوراخ مرکزی هر دو چرخنده با شفت مربوط به خود با استفاده از ابزار قیود هندسی در محیط مونتاژ نرم‌افزار به صورت هم‌مرکز قیدگذاری گردید. برای اینکه هر دو چرخنده مربعی در یک امتداد نسبت به هم قرار گیرند، باید رویه جلویی هر دو چرخنده طبق شکل ۴ به صورت هم‌سطح باشد که برای این کار قید کوین‌سیدنت<sup>۱</sup> به کار گرفته شد. استفاده از همین قید طبق شکل ۴ برای ایجاد هم‌سطحی بین رویه مسطح جلویی استوانه شفت با رویه جلویی چرخنده مربوط به آن نیز انجام گرفت. در انتهای این مرحله از قیدگذاری بین شفت‌ها و چرخنده‌ها، هر چرخنده مربعی می‌تواند به صورت مستقل روی شفتی که با آن قیدگذاری شده دارای دوران آزاد باشد. سپس دو چرخنده از نظر تداخل بین دندانه‌ها با استفاده از موس در موقعیت صحیحی قرار گرفته و برای شبیه‌سازی حرکتی آنها از ماژول موثین استادی<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. ابتدا با استفاده از قید تماس<sup>۳</sup> در این ماژول هر دو چرخنده را انتخاب و میان آنها این قید ایجاد گردید. بعد از انجام این کار برای شناساندن عناصر مونتاژ به صورت قطعات فیزیکی به نرم‌افزار از آیکون محاسبه انیمیشن<sup>۴</sup> در این ماژول استفاده می‌شود. برای دوران دادن به چرخنده‌ها از آیکون موتور استفاده شده و روی یکی از چرخنده‌ها که باید چرخنده محرک باشد موتور دورانی با تعداد مشخص دور تعبیه می‌گردد. با آغاز شبیه‌سازی، هر دو چرخنده مربعی به صورت درگیر با هم شروع به حرکت می‌نمایند. مرحله مونتاژ و شبیه‌سازی در طراحی چرخنده‌های غیردایروی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و باید با دقت و ترتیب ارائه شده انجام گیرد. برای دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای به ازاء زاویه حرکت چرخنده محرک بعد از اطمینان از صحت مونتاژ و حرکت صحیح چرخنده‌ها، با استفاده از آیکون ایجاد دیگرام<sup>۵</sup> این نمودار به راحتی در نرم‌افزار الیدورکس قابل دسترسی خواهد بود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی حرکتی تنها پارامتر ورودی به نرم‌افزار به غیر از قیود هندسی میزان دوران موتور برای چرخش چرخنده محرک بوده و تنها خروجی مدنظر هم نمودار سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک می‌باشد.

<sup>4</sup> Animation calculator

<sup>5</sup> Create motion plot

<sup>1</sup> Coincident

<sup>2</sup> Motion study

<sup>3</sup> Contact

با چهار می‌باشد. از این رو در شکل ۷، تعداد سیکل تغییرات دامنه سرعت زاویه‌ای در چرخنده محرک در هر دور کامل برابر با چهار دامنه نوسانی است. شکل ۷، دارای نموداری روان و بدون تغییرات و نویز معنادار است که عدم وقوع پدیده ارتعاشات جزئی را در حین دوران دو چرخنده در یک سیکل کامل تضمین می‌نماید. بروز ارتعاشات جزئی در چرخنده‌های غیردایره‌ای درگیر با هم، پدیده‌ای شایع در طراحی چرخنده‌های غیردایره‌ای است که بیشتر به دلیل تعیین اشتباه پارامترهای طراحی اولیه، کیفیت سطح نامناسب قطعات تولیدی به دلیل انتخاب نادرست روش تولید و یا انتخاب نادرست میزان خلاصی بین دندانه‌های دو چرخنده سبب عدم پایداری در سیکل حرکتی چرخنده محرک می‌گردد [۷]. این ناپایداری حرکتی، ارتعاشات در سیستم انتقال قدرت چرخنده‌ای را افزایش داده و سبب بروز عواملی نظیر خستگی و شکست زود هنگام در دندانه‌های چرخنده می‌گردد [۷]. شکل ۸ چرخنده‌های غیردایره‌ای فیزیکی تولید شده را در حالت مونتاژ نشان می‌دهد.

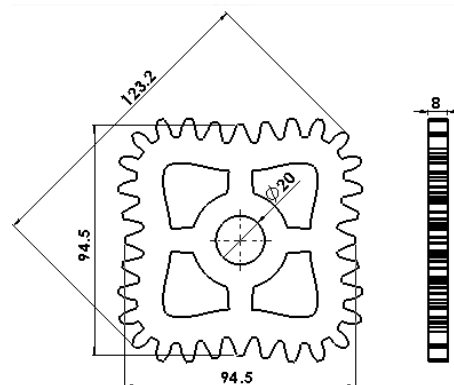


شکل ۸ مونتاژ چرخنده‌های غیردایره‌ای مربعی و بررسی نحوه درگیری آن‌ها

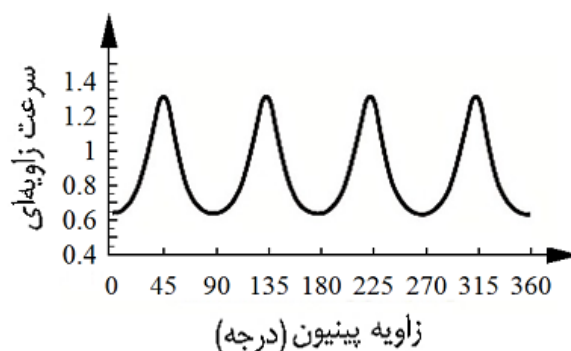
بازرسی ابعادی نمونه‌های فیزیکی فوق با استفاده از کولیس و میکرومتر برای سنجش ابعاد اشاره شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که تolerانس تولید نمونه‌ها بر روی تمام ابعاد، حداکثر معادل  $\pm 0.1$  میلی‌متر می‌باشد که بیانگر کیفیت مناسب تولید چرخنده‌ها است.

چرخنده دیگر نیز مساوی باشد که با توجه به مشابهت دو چرخنده مورد بررسی در این تحقیق، شرط درگیری مناسب رعایت شده است [۱].

از آنجا که برای تعیین مقادیر سرعت زاویه‌ای در چرخنده‌های غیردایره‌ای نیاز به استفاده از تجهیزات و سنسورهای خاص گران قیمت و با دقت بالا می‌باشد، بنابراین در این تحقیق به دلیل انطباق هندسی نمونه‌های فیزیکی چرخنده مربعی با مدل سه بعدی، برای تعیین مقادیر سرعت زاویه‌ای به جای آزمایش‌های واقعی از شبیه‌سازی مدل‌های کامپیوتری چرخنده‌های مونتاژ شده در نرم‌افزار سالیدورکس، استفاده گردیده است. شکل ۷ نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای در چرخنده محرک مربعی شکل را نشان می‌دهد. سینوسی بودن نمودار سرعت زاویه‌ای در چرخنده‌های غیردایره‌ای امری مرسوم است که در شکل ۷ به وضوح قابل رؤیت می‌باشد.



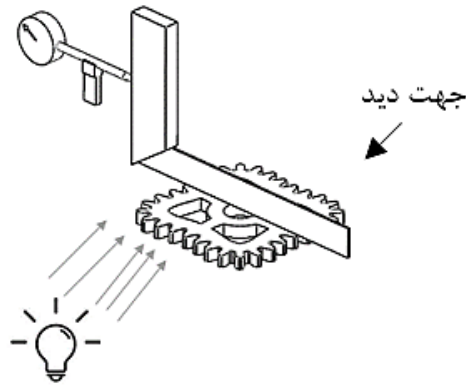
شکل ۶ نمایش ابعاد مهم بر روی چرخنده مربعی طراحی شده



شکل ۷ نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای چرخنده مربعی در برابر زاویه چرخنده محرک

بررسی نمودار شکل ۷ و شبیه‌سازی حرکتی چرخنده‌ها در نرم‌افزار نشان می‌دهد که دامنه تغییرات سرعت زاویه‌ای در محدوده مناسبی قرار داشته و تعداد دامنه نوسانات سیکلی در یک سیکل کامل با شماره لوب چرخنده محرک غیردایره‌ای برابر است که در این تحقیق چرخنده مربعی دارای شماره لوب برابر





شکل ۱۰ نحوه اجرای آزمایش عبور نور برای تعیین اعوجاج روی سطح مسطح چرخدنده مربعی

البته دلیل عدم واگرایی اشعه لیزر را می‌توان کم بودن ضخامت ورق خام پلاستیکی انتخاب شده در فرآیند برشکاری دانست [۸]. بازرسی حرکتی چرخدنده‌های فیزیکی در حالت مونتاژ شده نیز بیانگر حرکت نرم و انتخاب میزان خلاصی مناسب بین دندانه‌های دو چرخدنده در طی دوران است که این امر به واسطه انتخاب و محاسبه دقیق پارامترهای ورودی چرخدنده نظیر فاصله محوری بین دو چرخدنده مونتاژ شده است.

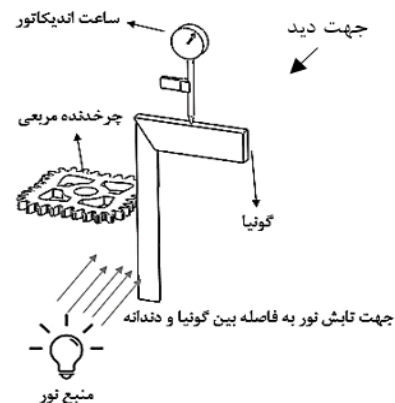
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه و تولید آنها با فرآیند برشکاری لیزری پیشنهاد گردید. تعیین پارامترهای طراحی چرخدنده مربعی بر پایه محاسبات ریاضی ارائه شده در مقاله انجام و براساس آن، فرآیند ترسیم مدل مقطع دندانه‌های چرخدنده و مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار طراحی انجام گرفت. شبیه‌سازی حرکتی نمونه‌های مونتاژ شده در نرم‌افزار ضمن تضمین صحت طراحی منجر به دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای براساس تغییرات زاویه در چرخدنده محرک شد. نتایج به دست آمده در تحقیق را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی نمود:

- ۱- سینوسی بودن و سیکل تکرار دامنه نوسانات در نمودار سرعت زاویه‌ای با شماره لوب چرخدنده محرک که در این تحقیق از نوع مربعی با درجه چهار است، مطابقت دارد که تأییدی بر دقت اجرای فرآیند شبیه‌سازی حرکتی می‌باشد.
- ۲- بررسی چرخدنده‌های تولید شده نشان می‌دهد که چرخدنده‌ها از نظر کیفیت تولیدی در حد قابل قبولی بوده و پدیده مخروطی شدن چرخدنده‌ها در امتداد پهنای دندانه‌های چرخدنده در اثر واگرایی اشعه لیزر و نیز اعوجاج در سطح مسطح

برای سنجش پدیده عدم عمودیت (شیب‌دار شدن) دندانه‌های چرخدنده‌ها در امتداد پهنای ضخامتی چرخدنده از ابزاری به نام گونیای دقیق فلزی استفاده شده است. با این کار امتداد دندانه‌های چرخدنده در راستای ضخامت چرخدنده با استفاده از آزمایش گونیا و تست عبور نور متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. برای تنظیم دقیق گونیای فلزی از یک ساعت اندیکاتور استفاده گردید که برای صفر کردن بازوی افقی گونیا به کار گرفته شد. کار سنجش احتمال عدم عمودیت دندانه‌های چرخدنده برای هر دندانه از دندانه‌های چرخدنده‌های مربعی در قالب کنترل صد در صدی به صورت مجزا انجام گرفت. در این آزمایش هرگونه عبور نور متمرکز از فاصله بین گونیا و دندانه تنظیم شده از چرخدنده مربعی به روشی ساده و ارزان، بیانگر وجود شیب در راستای عمودی آن دندانه می‌باشد. شکل ۹ نمایی از نحوه اجرای این آزمایش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این آزمایش گاهی فقط با استفاده از یک ساعت اندیکاتور انجام می‌گیرد و از طریق جابجایی آن در راستای ضخامتی دندانه (راستای عمودی) با توجه به تغییرات عقربه ساعت میزان عمودیت آن راستا بررسی می‌شود. در این مقاله به دلیل احتمال وقوع لرزش در حین جابجایی ساعت از ترکیب گونیا و نور با ساعت اندازه‌گیری استفاده شده تا دقت اندازه‌گیری‌ها تضمین گردد.

همچنین سطح مسطح دو طرف هر چرخدنده مربعی نیز برای بررسی اعوجاج احتمالی نمونه‌ها در اثر حرارت برشی پرتو لیزر با استفاده از گونیا و تست عبور نور طبق شکل ۱۰، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای تولیدی انتخاب شده، ساخت بدون عیب نمونه‌های چرخدنده‌ای شکل را تأمین نموده و پدیده عدم عمودیت دندانه‌های چرخدنده در امتداد پهنای ضخامتی در اثر واگرایی اشعه لیزر و نیز اعوجاج در سطح مسطح نمونه‌های چرخدنده‌ای به دلیل حرارت ناشی از برش لیزر در نمونه‌های فیزیکی تولید شده رخ نداده است.



شکل ۹ نحوه اجرای آزمایش عبور نور برای تعیین عمودیت دندانه‌ها در راستای ضخامتی چرخدنده مربعی



[2] Addomine, M., Figliolini, G., Pennestrì, E., A landmark in the history of non-circular gears design: The mechanical masterpiece of Dondi's astrarium, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 122, No. 1, pp. 219-32, (2018).

[3] Sande, G., Takuto, S., Kazuya, O., Xiaochu, T., Xue, C., Jing, L., 3D-CAD and 5 axis CAM of non-circular gears, *Proceedings of the 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century (LEM21)*, Nagoya, Japan, pp. 325-330, (2005).

[4] Pon Vignesh Pappu, S., Ajin, M., Satheesh Kumar, G., Development of prototype variable geometry in-pipe robot for reconfigurable applications, In advances in simulation, product design and development, pp. 675-683, Singapore: *Springer*, (2020).

[5] Nair, P.S., Nair, S., Sarkar, S., Arockia Doss, A.S., Dinakaran, D., Design and analysis of ASRS using AGV for rapid inventory storage system, trends in manufacturing and engineering management, Singapore: *Springer*, (2021).

[6] Radzevich, S.P., Foundations of advanced gear systems, In Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, pp. 7-29, London: *CRC Press*, (2021).

[7] Vullo, V., Gears: Volume 3: A Concise History, pp. 181-182, London: *Springer Nature*, (2020).

[8] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Advanced Noncontact Cutting and Joining Technologies, pp. 50-54, London: *Springer*, (2018).

نمونه‌های چرخنده‌ای به دلیل حرارت ناشی از برش لیزر در آنها ایجاد نشده است.

۳- بررسی ابعادی چرخنده‌های مربعی برشکاری شده توسط کولیس و میکرومتر بیانگر این موضوع است که تolerانس ابعادی بر روی تمام جهات، حداکثر معادل  $\pm 0.1$  میلی‌متر می‌باشد.

۴- عدم مونتاژپذیری به دلیل طراحی ابعاد نادرست، گیرکردن چرخنده‌ها در هنگام چرخش و لقی دورانی نامناسب در طی مونتاژ فیزیکی چرخنده‌ها رؤیت نگردید که این امر دلیل دیگری بر صحت روش طراحی و ساخت انتخاب شده در این تحلیل است.

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$v_{\theta}$	سرعت مماسی چرخنده متحرک در نقطه تماس ( $m/s$ )
$v_{\theta}$	سرعت مماسی چرخنده محرک در نقطه تماس ( $m/s$ )
$w_{\theta}$	سرعت زاویه‌ای چرخنده متحرک ( $rad/s$ )
$w_{\theta}$	سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک ( $rad/s$ )
$m$	مدول چرخنده محرک ( $mm$ )
$Z$	تعداد دندانه‌های چرخنده محرک
$L$	شعاع گام چرخنده متحرک ( $m$ )
$S$	شعاع گام چرخنده محرک ( $m$ )

## ۶- مراجع

[1] Rackov, M., Mitrović, R., Čavić, M., Machine and industrial design in mechanical engineering, London: *Cambridge University Press*, pp. 67-69, (2021).