

واژه‌های کلیدی:

چرخ‌دنده پلیمری،
عملکرد چرخ‌دنده،
واماندگی

مروری بر روش‌های بررسی و عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری

رسول محسن‌زاده^{*}، احسان نوزاد بناب^۱
تهران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گروه مهندسی مکانیک،

چکیده ...

چرخ‌دنده‌ها در مقایسه با سایر دستگاه‌های انتقال قدرت می‌توانند گشتاورهای متنوعی را با نسبت سرعت ثابت منتقل کنند. چرخ‌دنده‌های فلزی علی‌رغم استحکام بالا دارای معایبی مانند خوردگی شیمیایی، نیاز به روان‌کاری مستمر، هزینه راه‌اندازی و تعمیرات زیاد و ایجاد آلودگی صوتی و محیطی هستند. در سال‌های اخیر، پلیمرها به دلیل سبک بودن، مقاومت خوردگی بالا، تولید آسان و کار در شرایط خشک، در کاربردهای زیادی مانند تجهیزات اندازه‌گیری و دارویی، لوازم جانبی رایانه‌ها، چاپگرهای اداری و خودپردازها، جایگزین مواد فلزی شده‌اند. کمبود استانداردهای مربوط به عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری باعث شد تا محققان برای بررسی رفتار چرخ‌دنده‌ای پلیمرها از آزمون چرخ‌دنده استفاده کنند. در بین تحقیقات انجام گرفته، تمرکز محققان در بخش‌های متفاوت از جمله تعیین گشتاور بحرانی یا به تعریفی دیگر، ظرفیت تحمل بار، رفتار چرخ‌دنده در گشتاورهای پایین‌تر و بالاتر از گشتاور بحرانی، مقاومت خستگی چرخ‌دنده، رفتار سایشی چرخ‌دنده در مقیاس میکرو و ماکرو و همچنین مقاومت حرارتی چرخ‌دنده جلب شده است. علاوه بر این، اختلاف روش و ارائه روش‌های نوین برای بررسی عوامل اشاره شده به منظور بررسی عملکرد چرخ‌دنده در تحقیقات صورت گرفته، قابل مشاهده است. به طور کلی، جنس پلیمر، گشتاور و دور کاری از عوامل تأثیرگذار بر واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری تشخیص داده شده‌اند. در این پژوهش، روش و نتایج تحقیقات انجام شده بر روی انواع چرخ‌دنده‌های ساخته شده با مواد پلیمری پرکاربرد ارائه شده است. به گونه‌ای که تلاش شده با مقایسه عملکرد انواع چرخ‌دنده‌ها، بتوان به یک جمع‌بندی کلی در مورد کاربرد آن‌ها رسید.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir

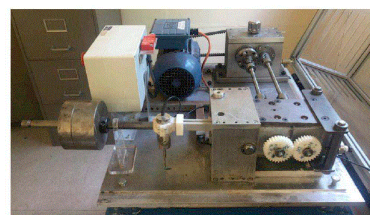
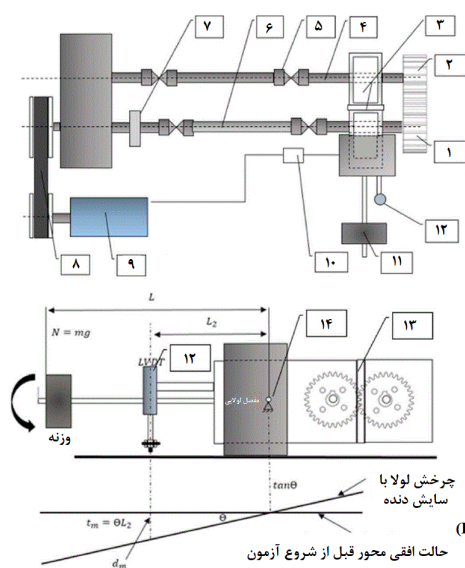
۱ مقدمه

شده برای بررسی عملکرد چرخ دنده‌های پلیمری و نتایج آنها به تفصیل پرداخته شده است.

۲ عملکرد چرخ دنده‌های پلیمری

ماو و همکاران [۸]، عملکرد چرخ دنده‌های پلیمری پلی استال و نایلون را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، از دستگاه آزمون چرخ دنده با قابلیت اندازه‌گیری پیوسته سایش دنده استفاده شد و دمای دنده‌ها با بکارگیری دوربین مادون قرمز ثبت شد. مشخصات دستگاه آزمون چرخ دنده استفاده شده در تحقیق مورد نظر در شکل ۱ مشاهده می‌شود. آزمون‌های اولیه روی سامانه‌های پلی استال-پلی استال و نایلون-نایلون تحت سرعت ثابت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و گشتاورهای، به ترتیب، ۷-۱۶/۱ و ۲۰-۵ نیوتن-متر انجام شد. برای پلی استال و در گشتاورهای بیشتر از ۹ نیوتن-متر، نرخ سایش افزایش زیادی یافت. با رسیدن مقدار سایش چرخ دنده پلی استال به بیشتر از ۴۰ درصد ضخامت دنده، دمای سطح دنده افزایش یافته و واماندگی به دلیل تغییر شکل دنده (در اثر نرم شدن) اتفاق افتاد و سازوکار واماندگی، سایش حرارتی عنوان شد. شکل ۲ نمایی از پروفیل سایش دنده پلی استال تحت گشتاورهای ۷ و ۱۰ نیوتن متر را نشان می‌دهد. در مقایسه با پلی استال، نرخ سایش در چرخ دنده‌های نایلون-نایلون کمتر بود و افزایش گشتاور تأثیر زیادی بر نرخ سایش نداشت. در گشتاورهای کمتر از ۱۰ نیوتن متر، واماندگی در چرخ دنده‌های نایلون-نایلون رخ نداد ولی در گشتاورهای بالای ۱۰ نیوتن متر، شکست در ناحیه گام و در چرخ دنده محرک مشاهده شد. دلیل شکست دنده از جنس

چرخ دنده‌ها یکی از تجهیزات کارآمد و پرکاربرد در زمینه انتقال قدرت محسوب می‌شوند. اهمیت انتقال قدرت توسط چرخ دنده‌ها در ماشین‌های دقیق و کاربردهایی که در آنها دقت درگیری چرخ دنده‌های محرک و متحرک اهمیت دارد، بسیار زیاد است [۱]. چرخ دنده‌ها در صنعت خودرو، حمل و نقل، صنایع دریایی، دستگاه‌های شکل دهی، لوازم برقی، دوچرخه، صنعت اسباب بازی و سایر صنایع به کار می‌روند [۲]. چرخ دنده‌های پلاستیکی به طور وسیع در کاربردهای زیادی مانند تجهیزات اندازه‌گیری و دارویی، لوازم جانبی رایانه‌ها، چاپگرهای اداری و خودپردازها، جایگزین مواد فلزی شده‌اند [۳]. مزایای این چرخ دنده‌ها شامل سبکی، خودروان‌کاری، ایجاد صدای کم، تولید آسان و هزینه پایین آنهاست [۴]. با این وجود، نرخ سایش زیاد، دمای کاری محدود و مقاومت مکانیکی پایین در چرخ دنده‌های پلیمری، در مقایسه با انواع فلزی، کاربرد آنها را محدود می‌سازد [۵]. از این رو، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عملکرد چرخ دنده‌های پلیمری به منظور شناسایی سازوکار واماندگی، انجام شده است. مطالعه عملکرد چرخ دنده‌های پلیمرها شامل بررسی دمای سطح، سازوکار سایش و واماندگی و نیز دوام آنها تحت آزمون چرخ دنده است. عواملی شامل استحکام مکانیکی، استحکام سایشی، رفتار شکست، رفتار ویسکوالاستیک و استحکام در دمای بالا بر عملکرد چرخ دنده‌ای مواد تأثیرگذار هستند [۶]. با استفاده از آزمون چرخ دنده می‌توان سایش دنده، طول عمر چرخ دنده، مقدار تغییر شکل و نیز افزایش دمای دنده را اندازه گرفت [۷]. در این پژوهش به انواع روش‌های استفاده



θ: زاویه چرخش لولا

t_m : سیگنال سایش

d_m : جابه‌جایی اندازه‌گیری شده با LVDT

l و l_2 : فاصله تکیه گاهی میان وزنه و حسگر

۱. چرخ دنده محرک

۲. چرخ دنده متحرک

۳. مجموعه بلوک‌های تکیه گاهی

۴. محور متحرک

۵. کوپلینگ پوینورسال

۶. محور محرک

۷. کلاچ مخروطی

۸. پولی

۹. موتور

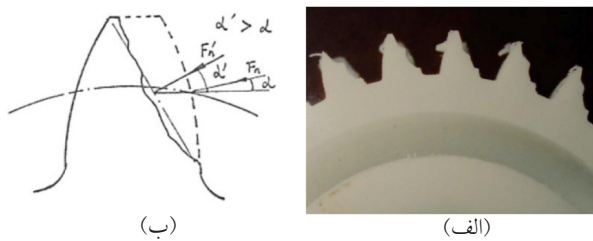
۱۰. کنترلر موتور

۱۱. وزنه

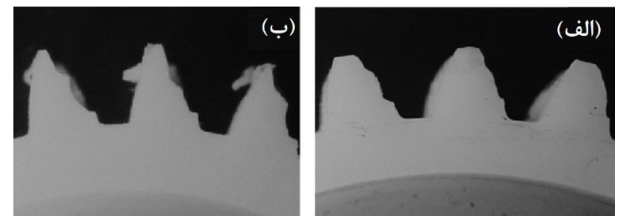
۱۲. حسگر جابه‌جایی خطی (LVDT)

۱۳. فاصله انداز محوری

شکل ۱ دستگاه آزمون چرخ دنده پلیمری با قابلیت اندازه‌گیری پیوسته سایش [۸].



شکل ۳ (الف) و اماندگی چرخ‌دنده پلی‌استال تحت سایش شدید و (ب) افزایش زاویه فشار با سایش دنده که منجر به تشدید نیروی اصطکاک و سایش دنده می‌شود [۹].



شکل ۲ فرم سایش دنده در چرخ‌دنده های پلی‌استال (الف) پس از 2×10^5 دور و تحت گشتاور ۷ نیوتن-متر و (ب) پس از $1/5 \times 10^5$ دور تحت گشتاور ۱۰ نیوتن-متر [۸].

پلی‌استال نقش چرخ‌دنده متحرک را داشت. ما و همکاران [۱۰] عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری ماشین‌کاری شده از جنس پلی‌استال را در سامانه درگیری پلی‌استال-پلی‌استال بررسی کرده، با انواع تزریق شده مقایسه کردند. آزمایش‌ها در محدوده گشتاور ۹-۶ نیوتن‌متر و با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شدند. از یک روش بارگذاری تدریجی یا پله‌ای برای تعیین گشتاور بحرانی استفاده شد. در این روش، تنها از یک جفت چرخ‌دنده استفاده شده و چرخ‌دنده‌ها تحت گشتاوری ثابت در مدت زمان ثابت و محدود قرار گرفتند و در مرحله بعد، گشتاور به اندازه یک واحد ($0/5$ نیوتن‌متر) افزایش یافته، در مدت مشابه اعمال شد و این فرآیند تا اماندگی چرخ‌دنده ادامه یافت. مزیت این روش تعیین گشتاور بحرانی با بکارگیری یک آزمون (و در مدت چند ساعت) به جای آزمون‌های متعدد تحت گشتاور ثابت (و به مدت چندین هفته) بود. نتایج آزمون نشان داد که سایش چرخ‌دنده پلی‌استال تحت گشتاور ۹ نیوتن‌متر افزایش ناگهانی یافته، پلیمر دچار اماندگی شد. نوع سایش تحت این گشتاور از نوع سایش چسبان ذکر شد که دلیل آن به بروز حرارت اصطکاک در سطح دنده نسبت داده شد. به دلیل حرارت اصطکاک بالا پس از گشتاور بحرانی، سایش حرارتی در سطح دنده غالب شده، باعث اماندگی دنده شد. نتیجه بر این شد که در گشتاورهای کمتر از مقدار بحرانی، نرخ سایش بسیار کمتر از حالتی بود که دنده تحت گشتاورهای بیشتر از مقدار بحرانی قرار داشت. دلیل این امر افزایش ناگهانی دمای دنده تحت گشتاور بحرانی و نزدیک شدن آن به دمای ذوب پلی‌استال عنوان شد. نتایج نشان داد که رفتار سایشی و سازوکار اماندگی در چرخ‌دنده‌های پلی‌استال ماشین‌کاری شده، مشابه چرخ‌دنده‌های تزریق شده در فرآیند قالب‌گیری تزریقی بود.

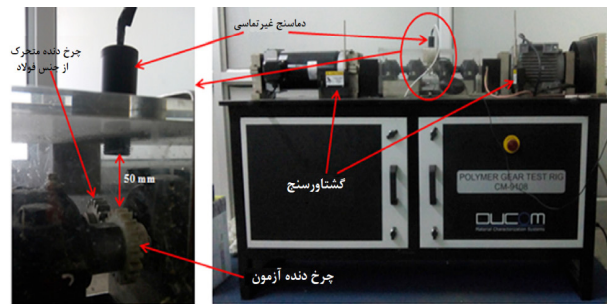
سینگ و همکاران [۱۱] سازوکار سایش و اماندگی در سه نوع پلیمر مختلف شامل اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)،

نایلون نزدیک ناحیه گام به افزایش دمای دنده در این ناحیه نسبت داده شد که باعث کاهش استحکام دنده در گام دنده و شکست آن شد. دلیل رخداد شکست در چرخ‌دنده‌های محرک به علت اصطکاک لغزشی و سایش در دنده‌ها نسبت داده شد که رو به بیرون از ناحیه گام بود و باعث ایجاد فرورفتگی در این منطقه شد (شکل ۲-الف). در نتیجه ایجاد فرورفتگی، استحکام دنده در ناحیه گام کاهش و تمرکز تنش افزایش یافت که این پدیده منجر به تسریع شکست در دنده محرک شد.

لی و همکاران [۹]، سازوکار سایش و اماندگی را در دو سامانه نایلون (محرک)- پلی‌استال (متحرک) و پلی‌استال (محرک)-نایلون (متحرک) بررسی کردند. با بکارگیری نایلون به عنوان چرخ‌دنده محرک، چرخ‌دنده پلی‌استال (متحرک) به دلیل نرخ سایش بالا دچار اماندگی شد. از سوی دیگر، در سامانه چرخ‌دنده‌ای پلی‌استال (محرک)-نایلون (متحرک)، عملکرد سایشی بسیار بهبود یافت که این روند نشان داد که نوع جفت درگیر (برحسب محرک یا متحرک بودن)، تأثیر زیادی بر عملکرد چرخ‌دنده‌ای دارد. با بکارگیری روش اجزای محدود مشخص شد که فشار تماسی حین شروع درگیری بین دو دنده (وضعیت هجوم)، بیشتر از همین فشار در پایان درگیری (وضعیت عقب‌نشینی) است. این رفتار باعث شد که ریشه دنده در چرخ‌دنده محرک و نوک دنده در چرخ‌دنده متحرک، سایش بیشتری نسبت به سایر مناطق داشته باشند. هنگامی که چرخ‌دنده پلی‌استال نقش متحرک را داشت، سایش زیاد نوک دنده باعث افزایش زاویه فشار و تسریع سایش نوک دنده شد (شکل ۳) و به دلیل مقاومت پایین‌تر پلی‌استال نسبت به سایش حرارتی و در مقایسه با نایلون، ترکیب نایلون-پلی‌استال عملکرد ضعیفی را از خود نشان داد. از سوی دیگر، ترکیب پلی‌استال-نایلون عملکرد بسیار بهتری داشت زیرا سایش در قسمت ریشه بسیار کمتر از نوک دنده بود و با توجه به مقاومت سایشی بیشتر نایلون، سایش نوک دنده در چرخ‌دنده متحرک بسیار کمتر از زمانی بود که

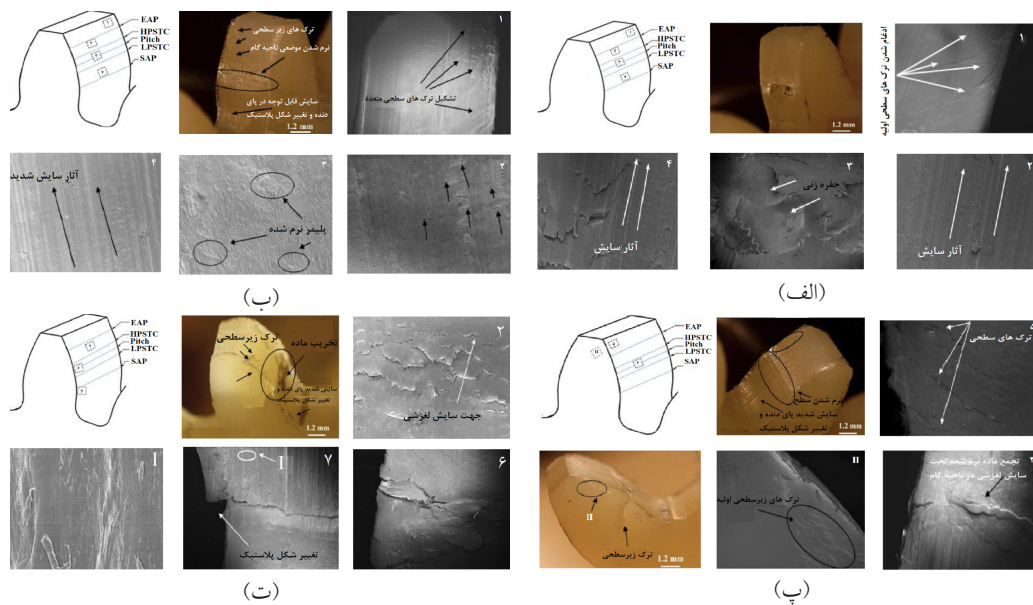
را با افزایش دما حفظ می‌کند. افزون بر این، مقاومت سایشی بالای پلی‌استال، نسبت به دو پلیمر دیگر، باعث کاهش بیشتر نرخ سایش برای این پلیمر شد. دوام چرخ‌دنده‌ها و سازوکار و اماندگی آن‌ها تحت گشتاور $1/4$ نیوتن-متر و سرعت 900 دور بر دقیقه، بررسی شد. مقایسه دوام چرخ‌دنده‌های پلیمری نشان داد که پلی‌استال بیشترین و ABS کمترین دوام را داشتند که این روند به مقاومت سایشی و حرارتی بالای پلی‌استال مرتبط دانسته شد. بررسی مودهای و اماندگی چرخ‌دنده‌ها نیز نشان داد که ABS تحت سایش شدید قرار گرفته و از ناحیه گام دنده دچار شکست شد. پلی‌اتیلن، که مقاومت سایشی بالاتری داشت، تحت ترک خستگی در ناحیه ریشه دچار شکست شد که این نوع شکست به سایش تدریجی پای دنده و نرم شدن آن در دمای بالا نسبت داده شد که خم شدن دنده حول ناحیه ریشه را رقم زد. با انحراف دنده حول ریشه، برخورد ضربه‌ای میان دو جفت چرخ‌دنده درگیر افزایش یافته و این پدیده باعث ایجاد ترک در ناحیه ریشه شد که این ترک‌ها در چرخه‌های بعدی گسترش یافته، شکست ریشه را ایجاد کردند. چرخ‌دنده‌های پلی‌استال تعداد دور حداکثر تعیین شده برای هر آزمون را طی کرده و به دلیل مقاومت سایشی بالا، دچار و اماندگی نشدند.

ساریتا و همکاران [۱۲]، سازوکار و اماندگی سطح دنده در سامانه چرخ‌دنده‌ای پلی‌آمید ۶۶- فولاد را تحت گشتاورهای $1/8$ ، $3/5$ ، 4 و $4/5$ نیوتن-متر بررسی کردند. افزایش گشتاور از $1/8$ به $4/5$ نیوتن-متر، دمای سطح دنده را حدود 32 درصد افزایش داد. مطابق شکل ۵-الف و تحت گشتاور $1/8$ نیوتن-متر، حفره‌زنی سطح در نزدیکی ناحیه گام و تحت شرایط خشک غالب بود. حضور ترک‌های زیرسطحی در نواحی گام و سردنده ناشی از اعمال بار خستگی در سطح تماس دنده عنوان شد. تشکیل حفره‌های بزرگ در ناحیه گام منجر به کاهش سطح تماس و اعمال بار اضافی به سطح سردنده شد ولی در ناحیه پای دنده، سایش خفیف بود. از سوی دیگر و تحت گشتاور $3/5$ نیوتن-متر، دمای سطح دنده بالا رفته، تشکیل ترک‌های زیرسطحی را تسریع کرد که دلیل آن کاهش استحکام پلیمر در دمای بالا عنوان شد (شکل ۵-ب). در ناحیه پای دنده، سایش بالای دنده و تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد که دلیل این امر به وقوع پدیده تأخیر دورانی نسبت داده شد. این پدیده در اثر اختلاف مدول الاستیک میان پلیمر و فولاد ایجاد می‌شود که در آن چرخش چرخ‌دنده فولادی به دلیل خم شدن دنده پلیمری با تأخیر مواجه می‌شود. دلیل خم شدن دنده، ضربه‌زدن دنده فولادی به دنده پلیمری حین درگیری است که باعث ایجاد ارتعاشات شده، تأخیر دورانی را باعث می‌شود. در نتیجه این



شکل ۴ دستگاه آزمون چرخ‌دنده و بکارگیری دماسنج غیر تماسی مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای کاری چرخ‌دنده‌ها [۱۱].

پلی‌اتیلن سنگین و پلی‌استال را حین درگیری با چرخ‌دنده فولادی و تحت گشتاور و دوره‌های مختلف بررسی کردند. از دستگاه آزمون چرخ‌دنده مجهز به حسگر غیر تماسی مادون قرمز استفاده شد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، از چرخ‌دنده فولادی به عنوان چرخ‌دنده متحرک استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری دما نشان داد که با افزایش گشتاور، دمای سطح دنده بالا رفته، بیشترین افزایش دما در چرخ‌دنده پلی‌استال و کمترین مقدار افزایش دما در چرخ‌دنده پلی‌اتیلن مشاهده شد که دلیل این امر ضریب اصطکاک بالاتر پلی‌استال، نسبت به دو پلیمر دیگر عنوان شد. عامل دیگر افزایش دمای بیشتر پلی‌استال به زبری سطح بالاتر آن، بر اساس نتایج زبری سنجی از سطح دنده‌ها، نسبت داده شد که منجر به تولید حرارت اصطکاکی بیشتری در سطح دنده شد. هم‌چنین بررسی رفتار چرخ‌دنده‌های پلیمری تحت دور و گشتاورهای مختلف نشان داد که افزایش دمای ناشی از افزایش گشتاور $8-7$ مرتبه بیشتر از افزایش دمای ناشی از بالا بردن سرعت آزمون بود. نتایج آزمون سایش نشان داد که افزایش دور آزمون باعث کاهش سایش دنده شد که دلیل این امر به کاهش زمان تماس میان دو دنده و در نتیجه افزایش نرخ کرنش دنده نسبت داده شد. با افزایش نرخ کرنش، سفتی و استحکام ماده بالا رفته، در نتیجه مقاومت آن به سایش افزایش خواهد یافت. با مقایسه نرخ سایش پلیمرهای مختلف مشخص شد که ABS بیشترین و پلی‌استال کمترین نرخ سایش را در تمامی گشتاورها داشتند. دلیل این روند به تردی و شکنندگی بالای ABS نسبت داده شد که بازبایی الاستیک ضعیفی در برابر تغییر شکل از خود نشان داد. هم‌چنین، استحکام ضربه کمتر ABS نسبت به دو پلیمر دیگر عاملی مؤثر برای افزایش نرخ سایش ذکر شد. علیرغم افزایش دمای بیشتر چرخ‌دنده پلی‌استال نسبت به سایر نمونه‌ها، نرخ سایش آن کمتر بود. این رفتار به استحکام بالای پلی‌استال (حتی در دماهای بالا) ارتباط داده شد که حالت الاستیک و سفتی خود



شکل ۵ سازوکار واماندگی در سامانه چرخ دنده ای پلی آمید ۶۶-فولاد تحت (الف) گشتاور ۱/۸ نیوتن-متر و دور ۱۰۵ × ۸/۶، (ب) گشتاور ۳/۵ نیوتن-متر و دور ۱۰۵ × ۲/۸، (پ) گشتاور ۴ نیوتن-متر و دور ۱۰۵ × ۱/۴، و (ت) گشتاور ۴/۵ نیوتن-متر و دور ۱۰۵ × ۰/۴ [۱۲].

ناحیه گام صورت پذیرفت (شکل ۵-د).

۳ نتیجه گیری

چرخ‌دنده‌ها از جمله اجزای پر کاربرد برای انتقال دور و قدرت در انواع سامانه استفاده می‌شود. چرخ‌دنده‌های پلیمری به دلیل هزینه‌های تولید کم، خودروانکاری، کارکرد کم صدا و همچنین وزن کم، مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. نایلون و پلی‌استال، دو پلیمر پرکاربرد برای ساخت چرخ‌دنده‌های پلیمری هستند. با این حال، تحقیقات بر روی مواد دیگری از جمله پلی اتیلن و اکریلونیتریل بوتادین استایرن صورت گرفته است. با توجه به تحقیقات اشاره شده در بخش ۲، می‌توان نتیجه گرفت که نایلون به دلیل مقاومت حرارتی بالاتر از دیگر مواد، ظرفیت تحمل بار بالاتر دارد. با این وجود، این پلیمر به دلیل داشتن ماهیت آب‌دوستی، در محیط‌های مرطوب جذب آب کرده، منجر به افت خواص مکانیکی این پلیمر می‌شود. بنابراین، کاربرد این نوع جنس چرخ‌دنده در محیط مرطوب توصیه نمی‌شود. پلی‌استال نیز با این که مقاومت حرارتی کمتر از نایلون دارد، ولی، به دلیل بالاتر بودن مقاومت سایشی این پلیمر نسبت به نایلون در گشتاورهای پایین‌تر، عمر بیشتری از نایلون دارد.

پدیده و به دلیل تغییر شکل زیاد دنده پلیمری، تماس زودرس و چند باره در ناحیه پای دنده رخ داده، این روند باعث افزایش براده‌برداری از سطح پای دنده توسط نوک سخت دنده فولادی در شروع تماس میان دو دنده می‌شود. در شکل ۵-ب هم چنین می‌توان نرم‌شدن موضعی سطح تماس در ناحیه گام را مشاهده کرد که به تماس تک دنده و تغییر جهت سایش لغزشی در گام دنده ارتباط داده شد. هم چنین، ترک‌های زیرسطحی نیز در ناحیه سردنده مشاهده شد که این ترک‌ها به تدریج ادغام شده، تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر را دادند. در ناحیه پای دنده نیز آثار سایشی عمیق مشخص بود. سازوکار واماندگی تحت گشتاور ۴ نیوتن-متر مشابه با گشتاور ۳/۵ نیوتن-متر بوده، تنها تفاوت در شدت بیشتر واماندگی در ۴ نیوتن-متر بود. مطابق شکل ۵-ج، سایش شدید و تغییر شکل پلاستیک در پای دنده مشاهده شد و نرم شدن موضعی براده‌های سایشی و تجمع آن‌ها در ناحیه گام واضح بود. هم چنین، ترک‌های سطحی در گام دنده و ترک‌های زیرسطحی در لبه سر دنده و با عمق بیشتر از حالت قبل، مشاهده شد. تحت گشتاور ۴/۵ نیوتن-متر، واماندگی حرارتی پلیمر در گام دنده و سایش حرارتی در پای دنده واضح بود و تحت دمای بالای دنده، که فراتر از دمای شیشه‌ای پلیمر بود، تخریب ماده در

مراجع

1. Juvinall R.C. and Marshek K.M., Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley & Sons, New York, **2006**.
2. Davis J.R., Gear Materials, Properties, and Manufacture. ASM International, **2005**.
3. Kirupasankar S., Gurunathan C., and Gnanamoorthy R., Transmission Efficiency of Polyamide Nanocomposite Spur Gears, *Materials & Design*, 39, 338-343, **2012**.
4. Mohsenzadeh R., Soudmand B., and Shelesh-Nezhad K., Failure Analysis of POM Ternary Nanocomposites for Gear Applications: Experimental and Finite Element Study, *Engineering Failure Analysis*, 140, 106606, **2022**.
5. Mohsenzadeh R., Soudmand B., and Shelesh-Nezhad K., A Combined Experimental-numerical Approach for Life Analysis and Modeling of Polymer-based Ternary Nanocomposite Gears, *Tribology International*, 107654, **2022**.
6. Kim C.H., Durability Improvement Method for Plastic Spur Gears, *Tribology International*, 39, 11, 1454-1461, **2006**.
7. Pogačnik A. and Tavčar J., An Accelerated Multilevel Test and Design Procedure for Polymer Gears, *Materials & Design*, 65, 961-973, **2015**.
8. Zhang Y., A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears, *Tribology International*, 141, 105953, **2020**.
9. Li W., An Investigation on the Wear Behaviour of Dissimilar Polymer Gear Engagements, *Wear*, 271, 9-10, 2176-2183, **2011**.
10. Mao K., The Wear and Thermal Mechanical Contact Behaviour of Machine Cut Polymer Gears, *Wear*, 332, 822-826, **2015**.
11. Singh P.K. and A.K. Singh, An Investigation on the Thermal and Wear Behavior of Polymer Based Spur Gears, *Tribology International*, 118, 264-272, **2018**.
12. Sarita B. and Senthilvelan S., Effects of Lubricant on the Surface Durability of an Injection Molded Polyamide 66 Spur Gear Paired with a Steel Gear, *Tribology International*, 137, 193-211, **2019**.