



Multiscale Study of Polymer Gear Failure Under Variable Torque Conditions

Rasool Mohsenzadeh^{1*}, Karim Shelesh-Nezhad²

¹ Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

² Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: The failure of polymer gears is strongly affected by applied torque and surface temperature. Higher torque increases contact stress and temperature, accelerating gear degradation. This study investigates failure mechanisms through multiscale analysis under five torque levels (6, 8, 10, 12, and 14 N•m) using polyoxymethylene (POM), a common polymer for plastic gears. Gear surface temperature was monitored online during tests. Failure mechanisms were examined on both macroscopic and microscopic scales. Macroscopically, surface characteristics were analyzed, while scanning electron microscopy (SEM) provided insights into microscopic wear patterns. Results revealed that increasing torque from 6 to 14 N•m raised surface temperature by up to 98%, attributed to combined mechanical and thermal effects. At lower torque levels (6–10 N•m), pitch-line cracks, plastic deformation, and wear were observed. However, at torques above 10 N•m, material flow and adhesive wear became dominant, with severe microscopic material movement linked to POM's low thermal conductivity.

Review History:

Received: Mar. 08, 2025

Revised: May, 19, 2025

Accepted: Jun. 01, 2025

Available Online: Jun. 03, 2025

Keywords:

Polyacetal

Gear

Failure Mechanisms

Wear

Morphology

1- Introduction

Gears play a critical role in transmitting power and motion across various applications. They are categorized into metallic and non-metallic types based on their load-bearing capabilities. Recently, the demand for lightweight components has increased due to factors like cost reduction, higher production rates, and noise reduction [1]. Plastic gears have gained popularity due to their benefits, including low noise levels, cost-effectiveness, and lightweight. However, they experience various wear mechanisms, such as abrasion, cracks at the tooth root, and thermal deformation. Since polymers have lower thermal resistance than metals and ceramics, thermal wear is particularly common in the gear's tooth area. Different polymers, such as polyacetal, polyamide, and PEEK, have been studied for gear applications, with polyacetal being favored for its low friction, elastic properties, and dimensional stability. However, it has limitations, including poor thermal resistance and susceptibility to cracks. Studies have shown that wear and temperature increase significantly once the applied torque exceeds a critical threshold. This study aims to investigate the wear mechanisms of polyacetal gears under different torques, using both macroscopic and microscopic analysis techniques, including digital microscopes and scanning electron microscopy (SEM), to assess thermal stress and wear behaviors in greater detail.

2- Experimental

In this experimental study, pure polyacetal (F20-03) was chosen as the polymer material for gear manufacturing. The granules were dried at 80°C for 4 hours before injection molding. Gears were produced using an injection molding machine, with mold and melt temperatures set at 60°C and 80°C, respectively. The geometric specifications of the gears are provided in Table 1.

Table 1. Gear geometric (all dimensions are in mm)

Module (m)	2
Center distance (a)	72
Number of teeth (no unit)	36
Pressure angle ($^\circ$) (α_p)	20
face width (b)	14
Tip radius (r_a)	38
Pitch of base circle (p_b)	36
Base circle radius (r_b)	33.83

*Corresponding author's email: r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir



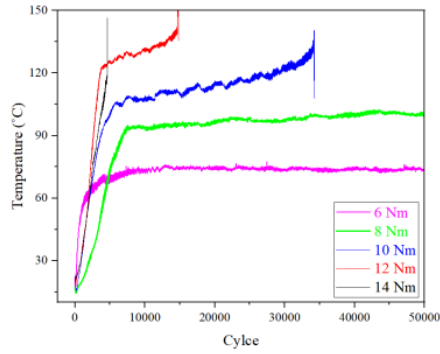


Fig. 1. The surface temperature of the gear teeth under varying torques

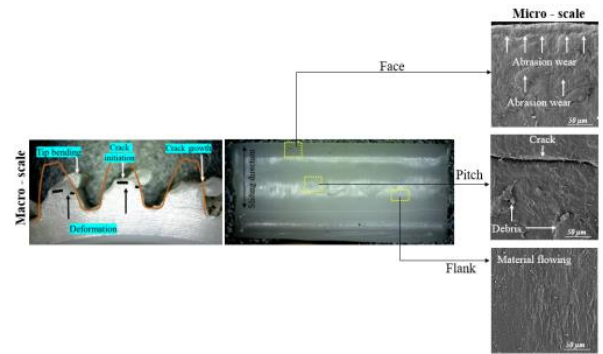


Fig. 3. Different scales of failure mechanisms at the moment of failure under a load of 8 Nm

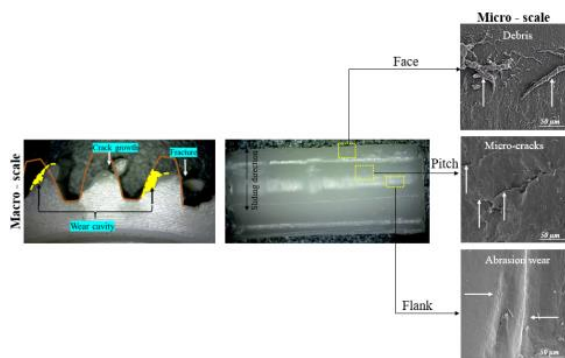


Fig. 2. Different scales of failure mechanisms at the moment of failure under a load of 6 Nm

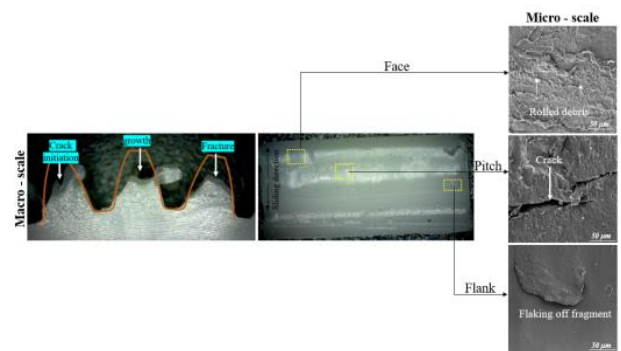


Fig. 4. Different scales of failure mechanisms at the moment of failure under a load of 10 Nm

Gear tests were conducted using a custom-built gear testing apparatus. Detailed specifications of the apparatus are available in other references [2]. The tests were performed at 1500 RPM, matching the nominal speed of the AC motor and the gear pump used. The driven gear was directly connected to a hydraulic unit through a coupling to generate the desired torque. The torque was adjusted by setting the pressure relief valve between the pump and the storage reservoir inlet. The testing followed a fixed loading strategy, applying five loads, and continued until failure occurred. To capture precise images, a digital microscope was positioned in front of the driving gears during imaging. The surface temperature of the gears was measured online using a non-contact infrared temperature sensor (GY-MCU90615), installed near the top of the driving gear.

3- Results and Discussion

Figure 1 shows that at torques of 6 and 8 Nm, the gear temperature remains stable after an initial increase. However, when the torque exceeds these values, the temperature rises continuously until failure occurs.

Figures 2 to 6 show different wear mechanisms in polyacetal gears under various torque levels. In Figure 2 (6 Nm torque), cracks formed along the pressure line near the

tooth root due to high contact stresses reversed slipping, and heat buildup.

Figure 3 shows the wear mechanisms in polyacetal gears under 8 Nm torque. After wear and thinning of the tooth tip, plastic deformation and fatigue failure appeared. Excessive heat from friction causes bending of the tooth tip, making it more prone to deformation. With increased torque, more wear marks appeared, and surface cracks grew due to higher temperature and contact stress.

Figure 4 shows polyacetal gear failure under 10 Nm torque. At the macro scale, ductile failure is linked to tooth bending and softening from heat. At the micro-scale, material flow and debris compression occur due to rolling forces, with surface cracks near the tooth pitch caused by cyclic fatigue.

At 12 Nm torque, significant tooth damage and material flow occurred (Figure 5). Increased contact stress and temperature weakened the material, causing wear and deformation. No cracks appeared in the pitch area due to higher temperatures, while a multi-layer structure formed at the tooth's bottom from plastic deformation.

At 14 Nm torque, material flow, softening, and adhesive wear occurred due to high stress and temperature, causing severe tooth deflection and plastic deformation (Figure 6). Chips accumulated at the tooth base due to restricted movement.

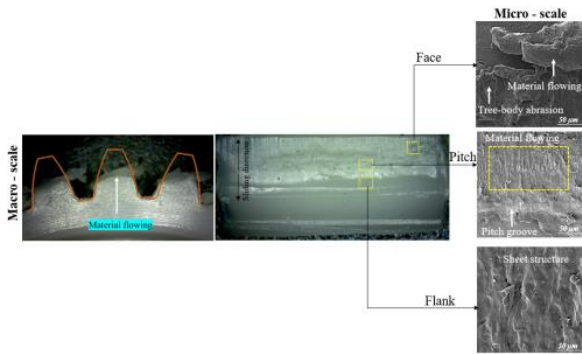


Fig. 5. Different scales of failure mechanisms at the moment of failure under a load of 12 Nm

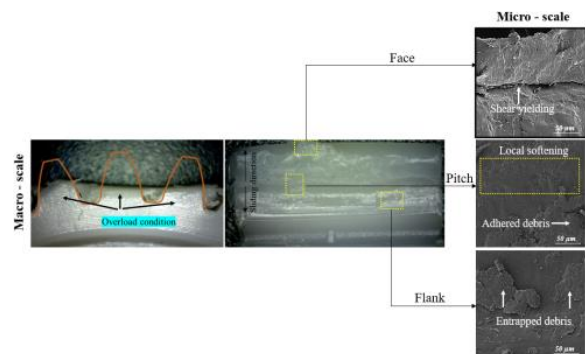


Fig. 6. Different scales of failure mechanisms at the moment of failure under a load of 14 Nm

4- Conclusion

This study examined the failure modes of polymeric POM gears under different torques. The gears were tested at torques of 6, 8, 10, 12, and 14 Nm at 1500 rpm. Microscopic analysis showed tooth cracking, wear, and thinning, especially in the tooth root area, with increased torque leading to more severe wear and plastic deformation. Higher torque resulted in significant plastic flow, adhesive wear, and chip accumulation. The results underscore the importance of material selection and design in handling mechanical and thermal loads in gears.

References

- [1] R. Mohsenzadeh, Experimental Studies on The Tribology Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Zelite Nanocomposite, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(10) (2021) 5159-5168.
- [2] R. Mohsenzadeh, B. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad, Load-bearing analysis of polymer nanocomposite gears using a temperature-based step loading technique: Experimental and numerical study, Wear, 514 (2023) 204595.



مطالعه چندمقیاسی تخریب چرخ‌دنده‌های پلیمری در شرایط گشتاور متغیر

رسول محسن‌زاده^{۱*}، کریم شلش‌نژاد^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

کلمات کلیدی:

پلی‌استال

چرخ‌دنده

مکانیزم‌های تخریب

سایش

مورفولوژی

خلاصه: مکانیزم‌های تخریب چرخ‌دنده‌های پلیمری به شدت تحت تأثیر گشتاورهای اعمال شده و دمای سطحی ناشی از آن قرار دارند. افزایش گشتاور می‌تواند منجر به افزایش تنش تماسی و دمای سطحی شود که این عوامل به‌طور مستقیم در تسریع تخریب نقش دارند. استفاده از آزمون‌های چرخ‌دنده در گشتاورهای مختلف و تحلیل چندمقیاسی این امکان را فراهم می‌کند تا مکانیزم‌های اصلی تخریب شناسایی و رابطه میان بارهای مکانیکی و رفتار حرارتی مواد بررسی شود. در پژوهش حاضر، پلی‌استال، پلیمر پرکاربرد در ساخت چرخ‌دنده‌های پلاستیکی، بعنوان ماده اولیه برای ساخت چرخ‌دنده‌ها انتخاب شد. آزمون چرخ‌دنده با استفاده از پنج سطح گشتاور مختلف (۶ N.m، ۸ N.m، ۱۰ N.m، ۱۲ N.m و ۱۴ N.m) انجام شد. دمای سطحی دنده‌ها به‌طور آنلاین در طول آزمون اندازه‌گیری گردید. برای تحلیل مکانیزم‌های تخریب، از دو مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش گشتاور از ۶ N.m به ۱۴ N.m منجر به افزایش دمای سطحی دنده‌ها، تا ۹۸ درصد شد. افزایش دمای دنده‌ها در گشتاورهای بالا به نتیجه مستقیم ترکیبی از عوامل مکانیکی و حرارتی نسبت داده شد. در سطوح گشتاور ۸ N.m و ۱۰ N.m، خرابی‌هایی مانند ترک در ناحیه گام، تغییر شکل پلاستیکی و سایش دنده مشاهده شد. اما در گشتاورهای بالاتر از ۱۰ N.m، جریان مواد در مقیاس ماکروسکوپی و سایش چسبان، همراه با جریان شدید مواد در مقیاس میکروسکوپی، رخ داد که به ضعف هدایت حرارتی پلی‌استال نسبت داده شد.

۱- مقدمه

چرخ‌دنده‌ها نقشی حیاتی در انتقال توان و حرکت در کاربردهای مختلف ایفا می‌کنند [۱]. چرخ‌دنده‌ها بر اساس قابلیت‌های انتقال بار به دو دسته فلزی و غیرفلزی تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر، تقاضا برای قطعات سبک‌وزن به دلیل عواملی همچون کاهش هزینه‌های تولید، افزایش نرخ تولید و کاهش آلودگی صوتی، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است [۲]. چرخ‌دنده‌های پلاستیکی به دلیل مزایای متعددی از جمله سطوح پایین نویز، مقرون به صرفه بودن و وزن کم، محبوبیت گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۳]. با این حال، شرایط کاری که چرخ‌دنده‌های پلیمری تجربه می‌کنند، منجر به مکانیزم‌های تخریب متنوعی می‌شود. انواع رایج تخریب چرخ‌دنده شامل سایش، ترک در نواحی گام و ریشه، تغییر شکل حرارتی دنده‌ها و یا ترکیبی از این عوامل است [۴]. از آنجایی که پلیمرها در مقایسه با فلزات و سرامیک‌ها مقاومت حرارتی کمتری دارند، تخریب‌های ناشی از دما در چرخ‌دنده‌های

پلاستیکی به‌ویژه در ناحیه گام که بارهای حرارتی غالب هستند، بسیار شایع است [۵]. در مواد ویسکوالاستیک مانند پلیمرها، به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک و اثرات هیستریزس، بخشی از انرژی ذخیره‌شده به گرما تبدیل می‌شود [۶، ۷]. طی فرآیند بارگذاری و در نتیجه بارگذاری متناوب، چرخ‌دنده‌های پلیمری رفتار هیستریزسی از خود نشان می‌دهند که منجر به تولید گرما بر روی سطح درگیر دنده‌ها می‌شود. گرمای انباشت شده در سطح دنده‌ها، می‌تواند اثرات حرارتی را تشدید کرده و دوام چرخ‌دنده‌های پلیمری را کاهش دهد.

در زمینه مواد چرخ‌دنده، پلیمرهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل پلی‌استال، پلی‌آمید، پلی‌بوتیلن ترفتالات^۱، پلی‌اتر اتر کتون^۲ و موارد دیگر می‌شوند. انتخاب پلیمر مناسب برای کاربرد چرخ‌دنده به توانایی آن‌ها در تأمین الزامات خاصی مانند مقاومت در برابر سایش و حرارت،

1. Polyamide
2. Polybutylene Terephthalate
3. Polyether Ether Ketone

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir



مقاومت خمشی و خاصیت الاستیک بستگی دارد. پلی‌استال، به‌عنوان یک ترموپلاستیک مهندسی، به‌دلیل ویژگی‌های مطلوب خود مانند ضریب اصطکاک نسبتاً پایین، خاصیت الاستیک و پایداری ابعادی بالا، به‌عنوان ماده‌ای پرکاربرد برای ساخت چرخ‌دنده‌های پلیمری شناخته می‌شود. در یک مطالعه توسط سینگ و همکاران [۸]، کارایی چرخ‌دنده‌های ساخته‌شده از پلی‌استال، اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۱ و پلی‌اتیلن با چگالی بالا^۲ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که چرخ‌دنده‌های پلی‌استال دوام بیشتری نسبت به دو پلیمر دیگر برخوردار هستند. با این حال، پلی‌استال محدودیت‌هایی نیز دارد که شامل مقاومت شکست پایین، حساسیت به وجود شکاف و مقاومت حرارتی ضعیف است [۹].

بررسی عملکرد چرخ‌دنده‌های پلی‌استال در مطالعات پیشین به‌طور گسترده مورد تحلیل قرار گرفته و نشان داده شده است که سایش دنده و دمای سطحی دنده پس از عبور از یک آستانه گشتاور بحرانی به‌شدت افزایش می‌یابد [۱۰]. به‌طور خاص، در چرخ‌دنده‌های پلی‌استال، زمانی که گشتاور اعمالی، از یک نقطه بحرانی فراتر می‌رود، تغییر قابل‌توجهی در نرخ سایش مشاهده می‌شود [۱۹]. انتقال از نرخ سایش کمتر به نرخ سایش بالاتر در گشتاور بحرانی، احتمالاً، مرتبط با دمای سطحی دنده می‌باشد که در این گشتاور به نقطه ذوب نزدیک می‌شود. مطالعات پیشین، افزایش چشمگیر دما و نرخ سایش در چرخ‌دنده‌های پلی‌استال، پس از عبور از یک گشتاور بحرانی را نشان داده‌اند [۱۰، ۱۱]. به دلیل ارتباط مستقیم دمای سطحی دنده‌های چرخ‌دنده با نرخ سایش، این امکان فراهم می‌شود که گشتاور بحرانی را از طریق پایش پیوسته دمای دنده‌های چرخ‌دنده در طول آزمایش بارگذاری مرحله‌ای شناسایی کرد. تحقیقات پیشین با موفقیت گشتاور انتقالی را از طریق پایش نرخ فرسایش تعیین کرده‌اند [۱۰، ۱۱].

بررسی عمر و تخریب چرخ‌دنده‌های پلیمری تحت بارهای مختلف، هم در سطح ماکروسکوپی و هم میکروسکوپی، برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد آن‌ها ضروری است. در سطح ماکروسکوپی، تحلیل کلی رفتار چرخ‌دنده‌ها تحت شرایط بارگذاری متفاوت، اطلاعات جامعی درباره نحوه توزیع تنش، تغییر شکل‌های کلی، و نقاط تمرکز تنش ارائه می‌دهد. این بررسی‌ها به شناسایی محدوده بار ایمن کمک کرده و از شکست ناگهانی یا تخریب زودرس در تجهیزات جلوگیری می‌کند. در این سطح، رفتار کلی مانند تغییرات دمایی، سایش سطحی، و تغییرات هندسی دنده‌ها نیز مورد ارزیابی

قرار می‌گیرد که می‌تواند نشان‌دهنده نقاط ضعف طراحی باشد. در سطح میکروسکوپی، تمرکز بر روی ریزساختار ماده و فرآیندهای داخلی تخریب مانند شروع و گسترش ترک‌های ریز، انواع سایش و دیگر مکانیزم‌های تخریب میکروسکوپی است. این جنبه از تحلیل به درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های تخریب کمک می‌کند، از جمله نقش تنش‌های محلی در ایجاد ترک‌ها یا تغییرات ساختاری ناشی از حرارت. علاوه بر این، مطالعه ریزساختار مواد در هنگام بارگذاری‌های طولانی‌مدت یا دینامیک، می‌تواند به بهبود فرمولاسیون پلیمرها برای افزایش مقاومت حرارتی، کاهش حساسیت به ضربه، و بهینه‌سازی رفتار مکانیکی کمک کند [۱۲]. این رویکرد چندلایه نه تنها به پیش‌بینی دقیق‌تر عمر مفید چرخ‌دنده‌ها کمک می‌کند، بلکه ابزارهای لازم برای طراحی مواد و چرخ‌دنده‌های مقاوم‌تر و کارآمدتر را فراهم می‌سازد. در نهایت، چنین بررسی‌هایی می‌توانند هزینه‌های نگهداری و تعویض را کاهش داده و قابلیت اطمینان سیستم‌های مکانیکی را در کاربردهای صنعتی به‌طور چشمگیری افزایش دهند.

هدف اصلی این مطالعه بررسی جامع حالت‌های تخریب چرخ‌دنده‌های پلی‌استال تحت تأثیر گشتاورهای مختلف (۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ N.m) و با سرعت چرخش ثابت ۱۵۰۰ rpm است. این پژوهش با تمرکز بر شناسایی عوامل مؤثر بر تخریب چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی انجام می‌شود. دمای سطحی دنده به‌عنوان یک پارامتر کلیدی که تأثیر بسزایی در تسریع فرآیند تخریب چرخ‌دنده‌های پلیمری دارد، در طول آزمون به‌طور مداوم اندازه‌گیری و پایش می‌شود. تغییرات دمای سطح دنده می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان تنش حرارتی و رفتار حرارتی مواد تحت بارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. برای تحلیل حالت‌های تخریب چرخ‌دنده‌ها، از رویکردی دوگانه در مقیاس‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی بهره گرفته شده است. در مقیاس ماکروسکوپی، از میکروسکوپ دیجیتال استفاده می‌شود تا ویژگی‌های کلی تخریب، مانند تغییر شکل هندسی، شکست و جریان مواد در شرایط بیش‌بار، ثبت و بررسی شوند. در مقیاس میکروسکوپی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ برای بررسی دقیق‌تر سطح دنده‌ها استفاده می‌شود. این تحلیل امکان شناسایی مکانیزم‌های تخریب جزئی‌تر مانند جریان پلاستیک، سایش چسبنده، ترک‌های میکروساختاری و تجمع براده‌های تولیدشده را فراهم می‌کند.

1. Acrylonitrile Butadiene Styrene
2. High-Density Polyethylene



شکل ۱. نمای بالا از چرخ‌دنده پلی‌استال تزریقی

Fig. 1. Top view of the injection-molded polyacetal gear

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های چرخ‌دنده ساده (تمام ابعاد به میلی‌متر است)

Table 1. Specifications of the Simple Gear Samples (All dimensions are in millimeters)

پارامتر	مشخصه	اندازه
مدول دندانه	m	۲
فاصله بین دو محور	a	۷۲
تعداد دندانه	Z	۳۶
زاویه فشار	α_p	۲۰
به‌نای دندانه	b	۱۴
گام دندانه	p	۳۶

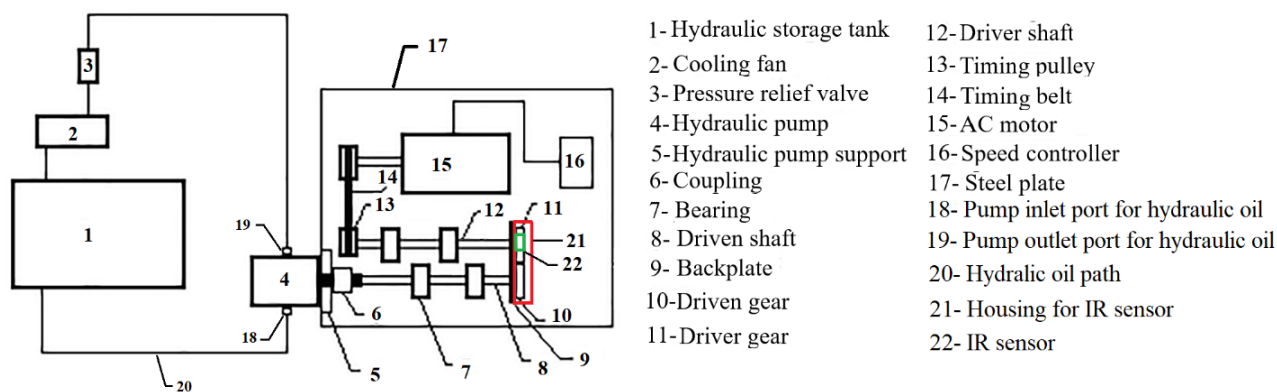
۲- تجربی

۲-۱- مواد و روش ساخت چرخ‌دنده

پلی‌استال خالص اف‌بیست-صفرسه^۱ دارای شاخص جریان مذاب ۱۰/۹ g/min، محصول شرکت کپیتال کره، به عنوان ماده اولیه پلیمری انتخاب گردید. برای آماده‌سازی پلیمر جهت قالب‌گیری تزریقی، گرانول‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰ °C خشک شدند. سپس چرخ‌دنده‌ها با استفاده از دستگاه قالب‌گیری تزریقی (پولاد، ایران) تولید شدند، به‌طوری‌که دماهای قالب و مذاب به ترتیب بر روی ۶۰ °C و ۱۸۰ °C تنظیم گردید. شکل ۱ نمونه‌ای از چرخ‌دنده پلی‌استال تزریقی را نشان می‌دهد. مشخصات هندسی دقیق چرخ‌دنده در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- آزمون چرخ‌دنده

آزمون‌های چرخ‌دنده در یک دستگاه آزمون چرخ‌دنده ساخته شده به‌صورت اختصاصی انجام شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات دقیق دستگاه در منابع دیگر موجود است [۱۳، ۱۴]. در هر آزمون، جفت چرخ‌دنده‌های یکسان از نظر مواد و هندسه، به‌عنوان چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک، با سرعت چرخشی ثابت و در دمای اتاق استفاده شدند. آزمون چرخ‌دنده با سرعت ۱۵۰۰ rpm انجام گرفت. زیرا که این سرعت معادل سرعت چرخشی اسمی موتور جریان متناوب^۲ و پمپ چرخ‌دنده مورد استفاده است می‌باشد. برای ایجاد گشتاور مورد نظر، چرخ‌دنده متحرک مستقیماً از طریق یک جفت‌کننده به واحد هیدرولیکی متصل گردید. میزان گشتاور با



شکل ۲. شکل شماتیک دستگاه آزمون چرخ‌دنده

Fig. 2. Schematic diagram of the gear testing apparatus

به‌طور دقیق پایش شود. برای کالیبراسیون سنسور دمای مادون قرمز، از یک سنسور تماسی استاندارد به‌عنوان مرجع استفاده شد. کالیبراسیون در شرایط ایستا و در دماهای مختلف سطحی انجام گرفت تا دقت قرائت در محدوده عملکرد آزمون تضمین گردد. بر اساس مقایسه با سنسور تماسی، خطای اندازه‌گیری دمای سطح توسط سنسور مادون قرمز کمتر از $\pm 1/5^\circ\text{C}$ برآورد شد و این مقدار در تحلیل نتایج لحاظ گردید.

۲-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی

میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل وگا/تسان^۲ ساخت جمهوری چک با ولتاژ کاری ۱۰ kV برای بررسی مورفولوژی سایش در نمونه‌های مختلف به‌کار گرفته شد. پیش از انجام آزمون‌های میکروسکوپی، سطوح نمونه‌ها با یک لایه طلا پوشش داده شدند.

۲-۴- میکروسکوپ دیجیتال

برای بررسی سطح تخریب نمونه‌ها پس از آزمون، از میکروسکوپ دیجیتال آسه‌جی‌اس^۳ استفاده شد. این دستگاه با قابلیت بزرگنمایی تا ۱۶۰۰ برابر و مجهز به نور ال‌ای‌دی^۴، امکان مشاهده و تحلیل کیفی تخریب سطحی در مقیاس ماکرو را فراهم می‌سازد. تصاویر سطح نمونه‌ها پس از آزمون توسط این میکروسکوپ تهیه و به کمک نرم‌افزار تحلیل تصویر مربوطه مورد بررسی قرار گرفتند.

تنظیم شیر تخلیه فشار که بین پمپ و درگاه ورودی مخزن ذخیره‌سازی قرار دارد، تنظیم گردید. رابطه بین گشتاور تولید شده (T) و فشار پمپ (ΔP) با استفاده از رابطه (۱) قابل تعیین است [۱۵].

$$T = \frac{1.59V\Delta P}{100\eta_{mh}} \quad (1)$$

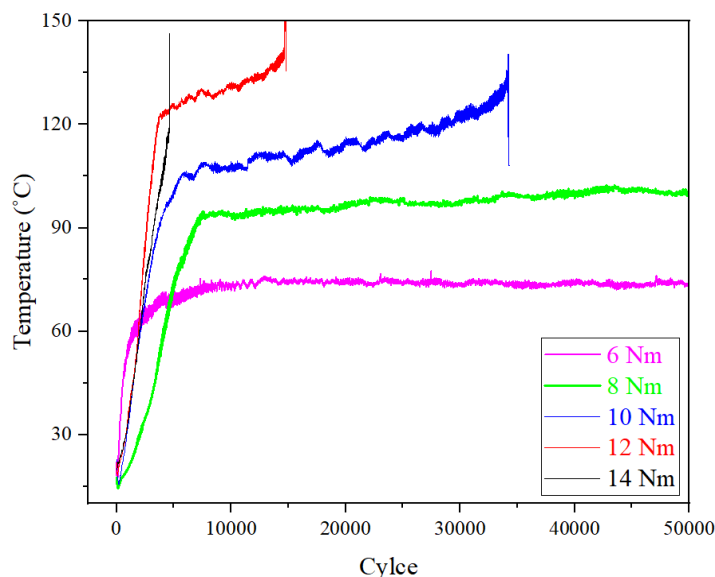
در رابطه (۱)، V جابجایی حجمی پمپ است که برای پمپ مورد استفاده شده در آزمون چرخ‌دنده، برابر با $21/3 \text{ cm}^3/\text{rev}$ است. بازده هیدرومکانیکی (η_{mh}) پمپ با استفاده از منحنی مشخصه، برابر با $0/9$ تعیین شد. آزمون‌های چرخ‌دنده با استفاده از یک استراتژی بارگذاری ثابت انجام شد که شامل اعمال پنج سطح گشتاور مختلف (۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ N.m) بود. این آزمون‌ها تا وقوع شکست ادامه یافت. برای ثبت تصاویر دقیق، یک میکروسکوپ دیجیتال در حین فرایند تصویربرداری در مقابل چرخ‌دنده‌های محرک قرار داده شد. دمای سطح دنده‌ها به‌صورت آنلاین با استفاده از یک سنسور دمای مادون قرمز غیرتماسی از نوع جی‌وای-ام‌سی‌یو^۱ اندازه‌گیری شد. این سنسور به‌طور دقیق در نزدیکی بالای دنده‌های چرخ‌دنده محرک نصب گردید تا دمای سطح آن‌ها بدون تماس مستقیم با سطح مورد نظر اندازه‌گیری شود. عملکرد سنسور به این صورت است که با تاباندن پرتو مادون قرمز به سطح مورد نظر، تابش بازگشتی را دریافت کرده و با پردازش آن، دمای سطح را محاسبه می‌کند. همچنین، این اندازه‌گیری‌ها به‌طور پیوسته در طول آزمایش ثبت و به سیستم کنترل داده‌ها ارسال می‌شود تا تغییرات دما در طول فرآیند

2. VEGA/TESCAN

3. A3GS

4. LED

1. GY-MCU90615



شکل ۳. شکل شماتیک دستگاه آزمون چرخ‌دنده

Fig. 3. Schematic diagram of the gear testing apparatus

۳- نتایج و بحث

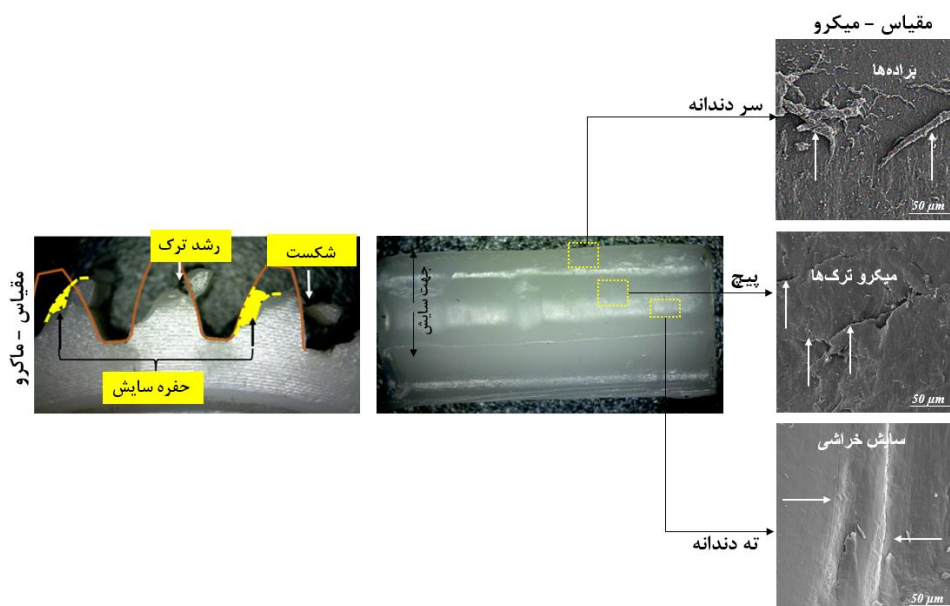
۳-۱- دمای سطحی دندانه

شکل ۳ تغییرات دمای دنده‌های چرخ‌دنده‌های محرک را در طی چرخه‌های مختلف درگیری، تا سقف ۵۰۰۰۰ چرخه، تحت گشتاورهای متفاوت نشان می‌دهد. در شرایطی که چرخ‌دنده تحت گشتاورهای ۶ و ۸ قرار دارد، افزایش قابل توجهی در دمای دنده‌ها مشاهده نمی‌شود و دما پس از یک افزایش اولیه، تقریباً ثابت می‌ماند. اما با عبور گشتاور از این محدوده، افزایش مداوم دمای دنده‌ها تا زمان شکست چرخ‌دنده رخ می‌دهد. این پدیده ناشی از تجاوز گشتاور اعمالی از حدود تنش خمشی و تغییر شکل مجاز دنده‌ها است [۱۰]. تغییر شکل دنده‌ها باعث افزایش سطح تماس بین دنده‌های چرخ‌دنده محرک و متحرک شده و به دنبال آن، اصطکاک بیشتری تولید می‌کند [۱۶]. همچنین، این تغییر شکل موجب افزایش سرعت لغزش و طول خط درگیری دنده‌ها می‌شود که نتیجه آن تولید گرمای اصطکاکی بیشتر است [۱۷]. افزون‌بر این، ویژگی‌های ویسکوالاستیک پلیمر نیز نقش مهمی در افزایش دما ایفا می‌کند [۱۸]. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند ماده در برابر تنش‌های متناوب و تغییر شکل‌های مکرر، انرژی ذخیره‌شده را به صورت گرمای هیستریزس آزاد کند. با افزایش گشتاور، تغییر شکل دنده‌ها بیشتر شده و گرمای هیستریزس افزایش می‌یابد. این گرما نه تنها موجب افزایش دمای دنده‌ها می‌شود، بلکه با تغییر خواص مکانیکی ماده، استحکام آن را کاهش داده و شرایط را برای شکست فراهم می‌کند. از سوی دیگر،

تغییر شکل دنده‌ها موجب تشدید فشار در نقاط تماس و افزایش اصطکاک می‌شود. این فشارهای موضعی که به تداخل غیرطبیعی سطوح تماس منجر می‌شوند، باعث ایجاد نقاط داغ و تولید گرمای موضعی بیشتر می‌گردند. محدودیت در هدایت حرارتی مواد پلیمری مانند پلی‌استال نیز به این مشکل دامن می‌زند. برخلاف مواد فلزی، پلیمرها توانایی کمتری در انتقال و اتلاف گرما دارند، بنابراین گرمای تولیدشده تجمع یافته و دمای کلی دنده‌ها افزایش می‌یابد. این دمای بالا نه تنها موجب ذوب یا نرم شدن ماده می‌شود، بلکه با افزایش اصطکاک و کاهش استحکام مکانیکی، احتمال شکست نهایی چرخ‌دنده را بیشتر می‌کند. بنابراین، افزایش دمای دنده‌ها در گشتاورهای بالا نتیجه مستقیم ترکیبی از عوامل مکانیکی و حرارتی است. عبور از حدود تنش مجاز، تغییر شکل دنده‌ها، تولید گرمای هیستریزس، و محدودیت در اتلاف گرما، همگی به ایجاد چرخه‌ای از تخریب تدریجی ماده و در نهایت شکست چرخ‌دنده منجر می‌شوند.

۴- آنالیز تخریب

شکل‌های ۴ تا ۸ مکانیزم‌های مختلف تخریب در چرخ‌دنده‌های پلی‌استال خالص را در سطوح گشتاور متفاوت پس از وقوع تخریب نشان می‌دهند. برای بررسی حالت‌های تخریب در مقیاس ماکرو، از یک میکروسکوپ دیجیتال استفاده شد، علاوه‌بر این از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تهیه تصاویر میکروسکوپی از سطوح دنده‌های آسیب‌دیده تحت بارهای مختلف استفاده شد



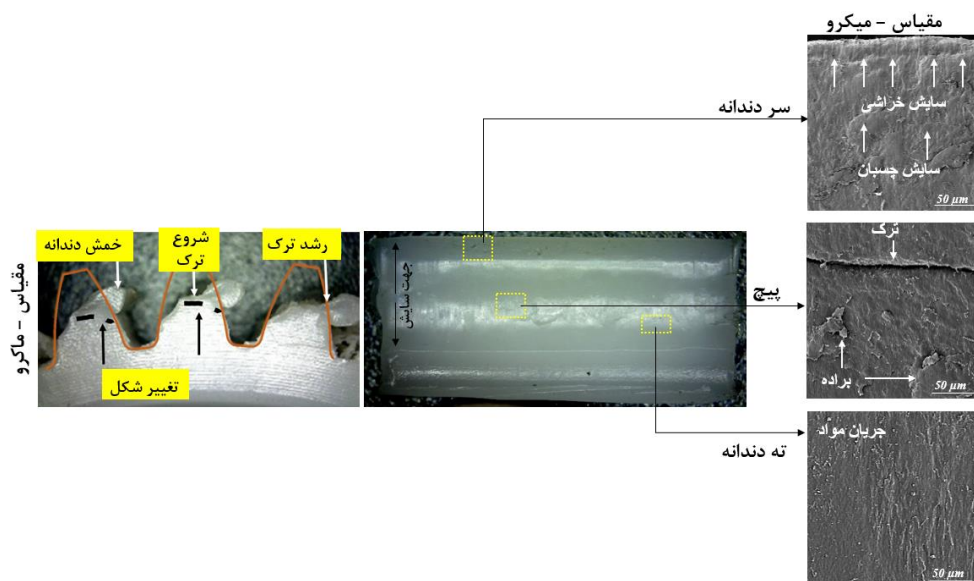
شکل ۴. مقیاس‌های متفاوت از مکانیزم‌های تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال در لحظه تخریب (۲۲۴۰۰۰ چرخه) و تحت بار ۶ N.m

Fig. 4. Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (224,000 cycles) under a load of 6 N.m

تحتانی دنده در شکل ۴ به وضوح دیده می‌شوند.

شکل ۵ نمایش جامعی از مکانیزم تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال تحت بار ۸ N.m را ارائه می‌دهد. پس از وقوع سایش و نازک شدن سر دنده، مکانیزم‌های تغییر شکل پلاستیک و شکست ناشی از خستگی آشکار شدند. خم شدگی سر دنده را می‌توان به تجمع بیش از حد گرما در این ناحیه، در زمان اعمال گشتاور، نسبت داد. این گرما به دلیل اصطکاک لغزشی شدید ایجاد شده است. سر دنده، به علت داشتن کمترین استحکام مکانیکی نسبت به سایر بخش‌های دنده، مستعد تغییر شکل بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۵ (در مقیاس ماکرو)، نازک شدن دنده در اطراف منطقه گام، منجر به تضعیف ناحیه سر دنده می‌شود. نمای میکروسکوپی در شکل ۵ نشان می‌دهد که سایش چسبان به عنوان مکانیزم غالب سایش در ناحیه سر دنده چرخ‌دنده پلی‌استال تحت گشتاور ۸ N.m می‌باشد. با افزایش سطح گشتاور از ۶ N.m به ۸، تعداد بیشتری از نشانه‌های سایش‌ها مشاهده شد که ناشی از افزایش نیروهای اصطکاکی و نرم‌شدگی هیستریزیسی است. براده‌های ایجاد شده در اثر سایش خراشی، در راستای درگیری دو دنده، حرکت کرده و از محل درگیری خارج می‌شوند. با این وجود، برخی براده‌ها شانس خروج از محل درگیری را نداشته و در طول درگیری حبس شده و بصورت انباشته پرس می‌شوند [۲۳]. علاوه بر این، تصویر منطقه گام در شکل

در چرخ‌دنده‌ی نشان‌داده‌شده در شکل ۴ (تحت بار ۶ N.m)، پدیده گسترش ترک در امتداد خط فشار، نزدیک به منطقه گام قابل مشاهده است. این ترک‌های گامی که در دنده‌های آسیب‌دیده‌ی چرخ‌دنده‌ی پلی‌استال مشاهده شدند، ناشی از ترکیب میکروتورک‌های سطحی کوچک در منطقه گام بودند که به ترک‌های بزرگ‌تر تبدیل شده و در نهایت منجر به شکست دنده شده‌اند [۱۹]. تنش‌های تماسی بالا و مکرر، تغییر جهت لغزش در منطقه گام، و تجمع حرارت منجر به تسریع در شروع ترک‌ها شده‌اند. همچنین، ترک‌ها باعث تغییر شکل دنده‌ها در هر چرخه‌ی درگیری شده است که در نهایت منجر به تماس زودرس دنده‌ی بعدی گردیده است. این تماس زودرس منجر به اعمال بار اضافی و تغییر شکل زود هنگام دنده شده است. با ادامه فرایند درگیری، ترک‌ها به هم ملحق شده و پدیده شکست رخ داده است. مشاهدات مشابهی از ترک‌های سطحی در منطقه گام چرخ‌دنده‌های پلیمری توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است [۲۰-۲۲]. تصاویر بزرگ‌نمایی‌شده‌ی شکل ۴، حضور ذرات سایشی را در ناحیه سر دنده نشان می‌دهند. علاوه بر این، میکروتورک‌های سطحی در منطقه گام به وضوح قابل مشاهده هستند. ترک‌های سطحی به دلیل تنش‌های نرمال بالا و معکوس شدن لغزش در منطقه گام ایجاد شده‌اند. علاوه بر ترک‌ها و ذرات سایشی در مناطق گام و سر دنده، نشانه‌های سایش خراشی در راستای لغزش، در ناحیه



شکل ۵. مقیاس‌های متفاوت از مکانیزم‌های تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال در لحظه تخریب (۸۱۰۰۰ چرخه) و تحت بار ۸ N.m

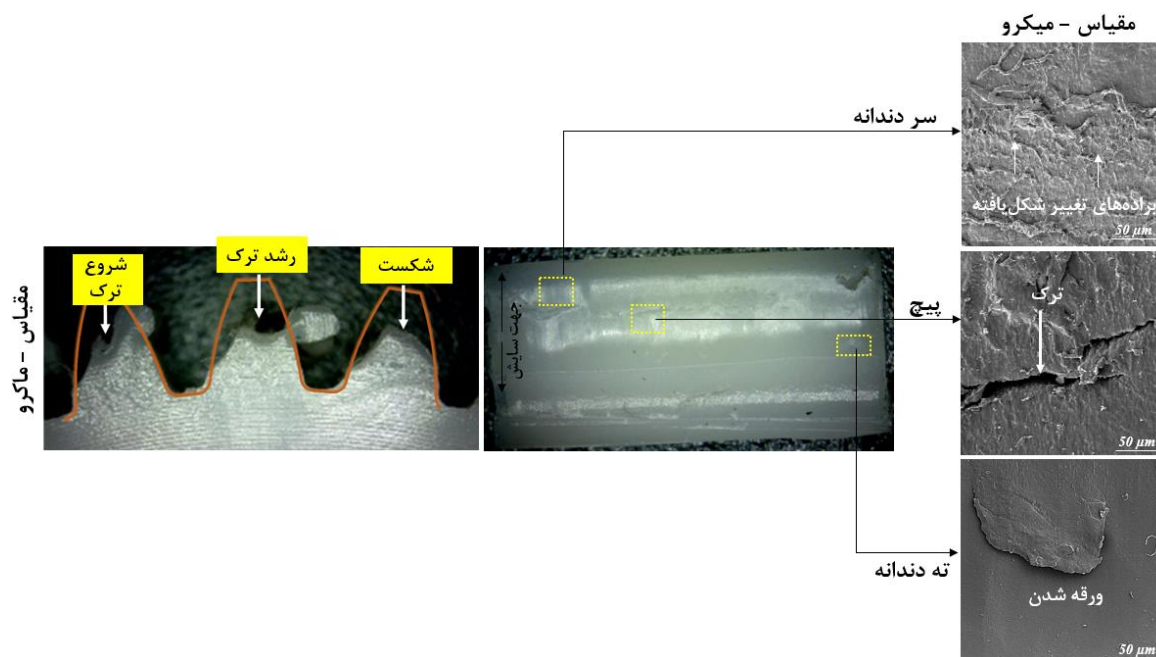
Fig. 5. Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (81,000 cycles) under a load of 8 N.m

تحت نیروهای وارد گرفته و به شکل استوانه‌ای متراکم در می‌آیند. علاوه‌براین، جریان مواد در راستای غلتش و لغزش در ناحیه سر دنده، عمدتاً به دلیل اثرات هم‌زمان تنش‌های تماسی و افزایش دما در این ناحیه رخ می‌دهد. علاوه بر مکانیزم‌های فوق، چندین ترک سطحی نیز در نزدیکی ناحیه گام دنده‌ها مشاهده شده است که به‌طور مستقیم با بارهای تماسی چرخه‌ای و خستگی سطحی مرتبط هستند. این ترک‌ها به‌عنوان شواهدی از خستگی ناشی از تماس‌های مکرر، نقش مهمی در تحلیل تخریب ایفا می‌کنند.

با افزایش گشتاور به ۱۲ N.m، مکانیزم‌های تخریب قابل‌توجهی مانند تخریب دنده و جریان مواد مشاهده شد (شکل ۷). این افزایش گشتاور باعث افزایش تنش تماسی وارد بر دنده‌های چرخ‌دنده شد. تنش تماسی بالاتر منجر به افزایش دمای سطح دنده‌ها گردید و استحکام مواد دنده را کاهش داد. با بالا رفتن دما و تشدید تنش، میزان سایش و تغییر شکل دنده‌ها افزایش یافت. این شرایط باعث شد که دنده‌ها به‌تدریج نازک‌تر شوند. به‌ویژه در ناحیه بالای ناحیه گام، تخریب دنده به دلیل تأثیرات ترکیبی دما و تنش تشدید شد و سرانجام دنده در این ناحیه دچار تخریب کامل شد. در مقیاس میکرو، با افزایش گشتاور از ۱۰ N.m به ۱۲، به دلیل سایش شدید سه‌جسمی، آسیب کامل سطح دنده در شکل ۷ قابل مشاهده است. براده‌های حاصل

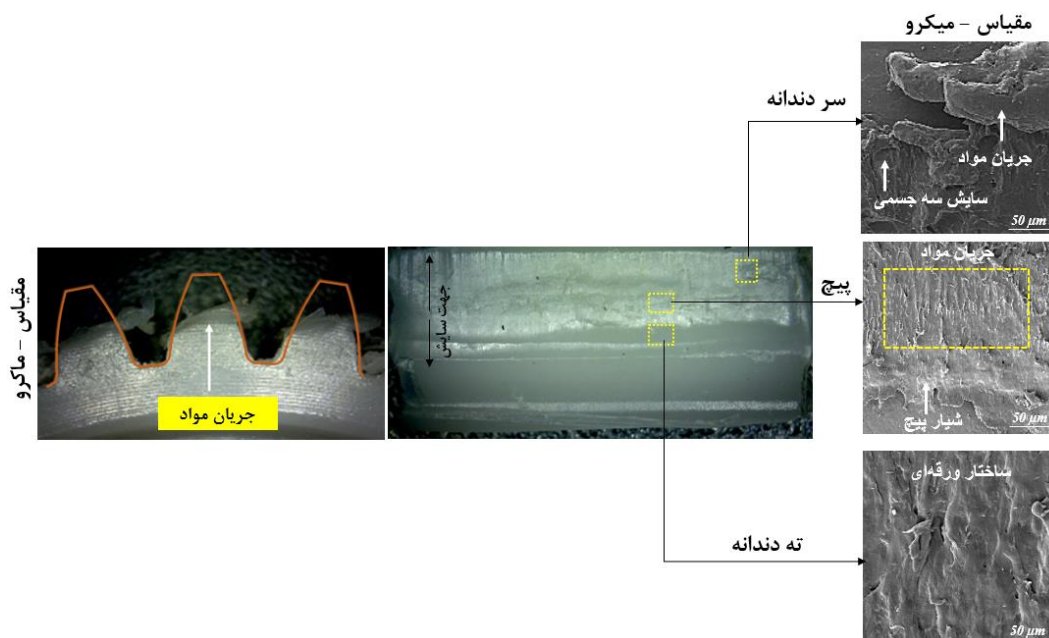
۵، ترک‌های سطحی بزرگ‌تری را در مقیاسه با شکل ۴ نشان می‌دهد. افزایش سرعت رشد ترک‌ها همراه با افزایش بار، به تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر منجر می‌شود که ناشی از افزایش دما، تنش تماسی بالاتر، و تغییر شکل دندانه‌های چرخ‌دنده می‌باشد. افزون‌براین، با توجه به شکل ۵، افزایش سطح گشتاور، مکانیزم سایش را در ناحیه پایین دنده از سایش خراشی به جریان پلاستیک ماده تغییر می‌دهد.

شکل ۶، مکانیزم‌های تخریب چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی را در دو مقیاس میکرو و ماکرو تحت بار ۱۰ N.m نمایش می‌دهد. تصاویر مقیاس ماکرو نشان می‌دهد که شکست در دنده‌ها عمدتاً به‌صورت داکتیل رخ داده است. شکست داکتیل معمولاً با ویژگی‌هایی مانند سطوح شکست صاف و نسبتاً هموار همراه است که نشان‌دهنده تغییر شکل‌های پلاستیک پیش از شکست نهایی است. در این مطالعه، این نوع شکست به خمیدگی دنده و نرمی ناشی از افزایش دما نسبت شده است. افزایش دما می‌تواند ناشی از اصطکاک بین دنده‌ها و انتقال گرما در طول فرآیند تماس باشد که باعث کاهش استحکام مکانیکی پلی‌استال در این شرایط می‌شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپی در مقیاس میکرو، براده‌های تغییر شکل‌یافته و جریان مواد به‌عنوان مکانیزم‌های اصلی در سطح دنده‌های وامانده مشاهده می‌شود. این براده‌ها که طی فرآیند درگیری دنده‌ها ایجاد می‌شوند، در مسیر درگیری



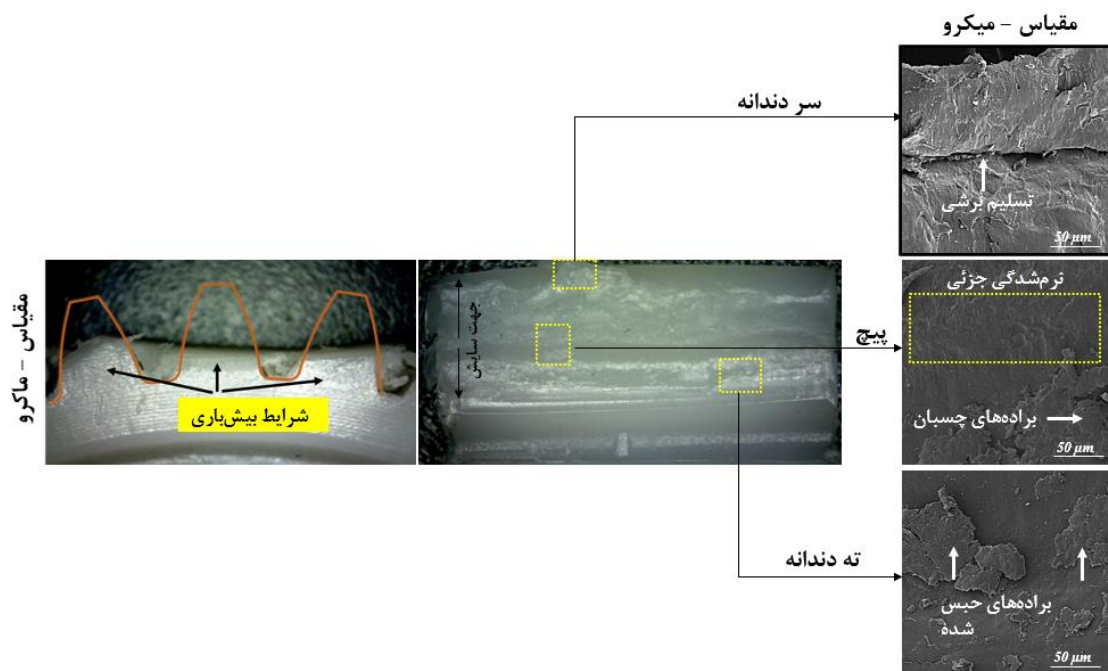
شکل ۶. مقیاس‌های متفاوت از مکانیزم‌های تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال در لحظه تخریب (۳۴۰۰۰ چرخه) و تحت بار ۱۰ N.m

Fig. 6. Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (34,000 cycles) under a load of 10 N.m



شکل ۷. مقیاس‌های متفاوت از مکانیزم‌های تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال در لحظه تخریب (۱۴۸۰۰ چرخه) و تحت بار ۱۲ N.m

Fig. 7. Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (81,000 cycles) Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (14,800 cycles) under a load of 12 N.m



شکل ۸. مقیاس‌های متفاوت از مکانیزم‌های تخریب دندانه‌های چرخ‌دنده پلی‌استال در لحظه تخریب (۴۶۰۰ چرخه) و تحت بار ۱۴ N.m

Fig. 8. Different scales of failure mechanisms in polyacetal gear teeth at the moment of failure (4,600 cycles) under a load of 14 N.m

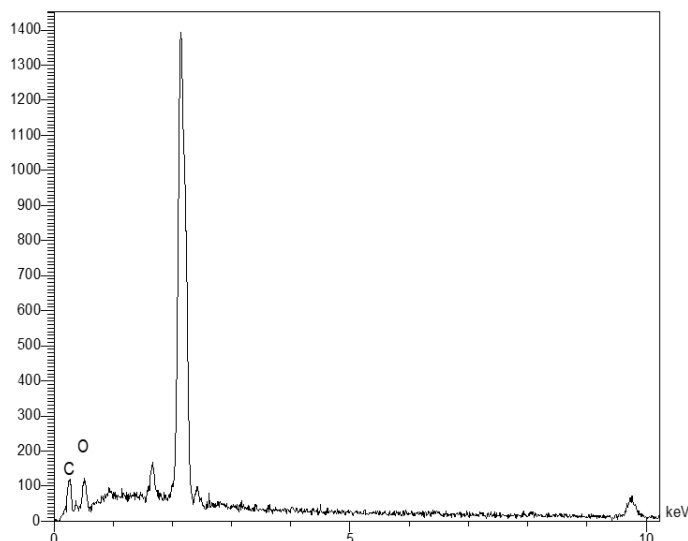
گام و سایش چسبان در ناحیه پایین خط گام برای دنده چرخ‌دنده پلی‌استال خالص قابل مشاهده است. در چرخ‌دنده پلی‌استالی تحت گشتاور ۱۴ N.m، بار بیش از حد تحمل، به دلیل تنش تماسی و دمای بالا، انحراف شدید دنده و تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد. نرم‌شدگی موضعی همراه با براده‌های تغییر شکل یافته در منطقه گام به دلیل تک‌دنده بودن تماس و خلاف جهت هم بودن لغزش در این ناحیه می‌باشد. براده‌های جدا شده از ناحیه گام دنده، در جهت لغزش از گام به سمت پای دنده حرکت می‌کنند. این براده‌ها به دلیل اینکه مجال و محل خروج از ناحیه درگیری پیدا نمی‌کنند، بنابراین در ناحیه پای دنده حبس شده و پرس می‌شوند.

شکل ۹، طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^۱ اخذ شده از سطح چرخ‌دنده پلی‌استال را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. همان‌طور که در این طیف مشاهده می‌شود، دو عنصر اصلی موجود شامل کربن و اکسیژن هستند که با ساختار شیمیایی پلی‌استال مطابقت دارند. حضور این دو عنصر تأیید می‌کند که ذرات سایشی تشکیل شده بر اثر تماس و سایش در حین آزمون، از خود ماده پلیمری منشأ گرفته‌اند. در واقع، نبود عناصر خارجی در طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس نشان‌دهنده آن است که

از سایش، در حین درگیری در میان جفت دنده درگیر قرار گرفته و مکانیزم سایش سه‌جسمی را فعال می‌کنند. علاوه بر این، دمای بالای دنده نیز این پدیده را تشدید می‌کند. مطابق شکل ۷، جریان مواد، شیار گام و جدا شدن لایه مواد در ناحیه گام دنده پلی‌استال مشاهده می‌شود. بر خلاف حالت قبلی مشاهده شده در شکل ۶، هیچ ترکی در منطقه گام دنده ایجاد نشده است. در گشتاور بالا (۱۲ N.m)، به دلیل سطح دمایی بالاتر، جریان پلاستیک، قبل از شروع ترک رخ می‌دهد. علاوه بر این، یک ساختار لایه لایه در قسمت پایین دنده پلی‌استال دیده می‌شود. تحت اثر ترکیبی گرمای اصطکاکی و سایش چسبان، ساختار ورقه‌ای چند لایه در نتیجه تغییر شکل پلاستیک در حال شکل‌گیری است.

شکل ۸، مکانیزم‌های تخریب چرخ‌دنده پلی‌استالی را در دو مقیاس متفاوت تحت بار ۱۴ N.m نمایش می‌دهد. با افزایش گشتاور به بیش از ۱۲ N.m، جریان قابل توجهی از مواد در سطح دنده مشاهده شد. افزایش دمای دنده و هدایت حرارتی محدود چرخ‌دنده‌های پلی‌استال، باعث کاهش استحکام دنده‌ها شد که این امر منجر به جریان شدید مواد تحت تأثیر حرارت گردید. با توجه به تصاویر میکروسکوپی در شکل ۸، جریان مواد شدید در ناحیه بالای خط گام، نرم‌شدگی موضعی و براده‌های پرس شده در ناحیه

1. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy



شکل ۹. طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس سطح چرخ‌دنده پس از سایش

Fig. 9. EDS spectrum of the gear surface after wear

ماده را بهبود بخشد.

- **طراحی هندسی بهینه چرخ‌دنده‌ها:** طراحی هندسی مناسب نقش مهمی در کاهش تمرکز تنش‌ها و توزیع یکنواخت بار دارد. اصلاح پارامترهایی مانند زاویه فشار، شعاع فیلِت، ارتفاع دندانه و استفاده از پروفیل‌های غیرمستقیم می‌تواند باعث کاهش تنش‌های خمشی و تماس در نقاط بحرانی شود. این امر منجر به کاهش احتمال ایجاد ترک‌های گام و جلوگیری از تسریع جریان پلاستیک در گشتاورهای بالا خواهد شد. همچنین، اصلاحاتی مانند کرونینگ پروفیل و آزادسازی نوک دندانه می‌تواند باعث بهبود دینامیکی عملکرد و کاهش ارتعاشات شود.
- **بهبود سطح و استفاده از پوشش‌های مقاوم به سایش:** پرداخت سطح دقیق و اعمال پوشش‌های نازک مقاوم به سایش (مانند پوشش‌های پلیمر تقویت‌شده با نانوذرات یا پوشش‌های سرامیکی نازک) می‌تواند باعث کاهش سایش و افزایش مقاومت در برابر خراش و تخریب سطحی شود. این موضوع به ویژه در کاربردهایی که بارهای تماسی بالا وجود دارد، اهمیت دارد.
- **کنترل شرایط کاری و محیط عملیاتی:** کاهش بارهای بیش از حد و کنترل دما و شرایط محیطی (مانند رطوبت و تهویه) می‌تواند به طور مستقیم در بهبود عمر چرخ‌دنده‌ها تأثیرگذار باشد. استفاده از روان کارهای مناسب در مواردی که امکان استفاده از روان کاری وجود دارد، می‌تواند

ذرات مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپی ناشی از تخریب سطحی ماده اصلی هستند و به دلیل آلودگی یا ورود ذرات بیگانه به سیستم ایجاد نشده‌اند. این موضوع می‌تواند بیانگر رفتار سایشی ذاتی ماده پلی‌استال و ویژگی‌های مکانیکی آن در شرایط آزمون باشد.

۴-۱- راهکارهای افزایش دوام و عملکرد چرخ‌دنده‌های پلی‌استال

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه و همچنین بررسی ادبیات موضوع، چندین راهکار کلیدی برای افزایش عمر و بهبود عملکرد چرخ‌دنده‌های ساخته شده از پلی‌استال پیشنهاد می‌شود:

- **بهینه‌سازی فرمولاسیون ماده پایه:** پلی‌استال به دلیل هدایت حرارتی پایین، در بارهای بالا و دمای زیاد مستعد افزایش دمای سطحی و در نتیجه تسریع مکانیزم‌های تخریب حرارتی مانند جریان پلاستیک و سایش چسبان است. افزودن نانوذراتی با خواص حرارتی بالا مانند نانوکربن‌ها (کربن بلک، نانولوله‌های کربنی، گرافن) یا نانوذرات سرامیکی (آلومینا، اکسید زیرکونیوم، کلسیم کربنات) می‌تواند هدایت حرارتی پلیمر را بهبود داده و دمای سطحی را کاهش دهد. این کاهش دما موجب کاهش فشارهای حرارتی و تنش‌های داخلی شده و به طور مستقیم در افزایش دوام قطعات مؤثر است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که ترکیب این افزودنی‌ها با پلی‌استال می‌تواند مقاومت سایشی و خواص مکانیکی

using Finite Element Analysis and its Correlation with Experience, Journal of Failure Analysis and Prevention, 22(4) (2022) 1495-1503.

- [2] N. Wright, S. Kukureka, Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears, Wear, 251(1-12) (2001) 1567-1578.
- [3] B. Trobentar, M. Hriberšek, S. Kulovec, S. Glodež, A. Belšak, Noise evaluation of S-polymer gears, Polymers, 14(3) (2022) 438.
- [4] O. Doğan, M.S. Kamer, Wear characteristics of 3D-printed spur gears: material type and design parameters effects, Iranian Polymer Journal, (2025), in press.
- [5] M. Chernets, A. Kornienko, Y. Chernets, Investigation of the effect of height correction of metal-polymer helical gears teeth on contact pressures, wear, and durability, Australian Journal of Mechanical Engineering, 22(2) (2024) 271-281.
- [6] R. Mohsenzadeh, B.H. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad, Synergetic impacts of two rigid nano-scale inclusions on the mechanical and thermal performance of POM/carbon black/CaCO₃ ternary nanocomposite systems, Polym. Compos., 43(5) (2022) 3041-3056.
- [7] B. Soudmand, R. Mohsenzadeh, Mechanical, morphological, and numerical evaluation of biocompatible ultra-high molecular weight polyethylene/nano-zeolite nanocomposites, Polym. Compos., 45(4) (2024) 3666-3682.
- [8] P.K. Singh, A.K. Singh, An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears, Tribology International, 118 (2018) 264-272.
- [9] R. Mohsenzadeh, A. Fathi, Evaluation of the impact resistance of POM/TPU/CB three-phase nanocomposite for application in bumper bracket, Iran. J. Polym. Sci Technol.(Persian), 34 (2022) 557-568.
- [10] R. Mohsenzadeh, B. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad, Load-bearing analysis of polymer nanocomposite gears using a temperature-based step loading technique: Experimental and numerical study, Wear, 514 (2023) 204595.
- [11] R. Mohsenzadeh, B. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad,

اصطکاک و دمای سطح را کاهش دهد و به بهبود عملکرد حرارتی و مکانیکی چرخ‌دنده‌ها کمک کند.

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی حالت‌های مختلف خرابی چرخ‌دنده‌های پلیمری پلی‌استال ساخته‌شده به روش تزریق در شرایط خشک پرداخته است. چرخ‌دنده‌ها تحت گشتاورهای متفاوت قرار گرفتند تا عملکرد آن‌ها مورد تحلیل قرار گیرد. برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه آزمون چرخ‌دنده با طراحی خاص و سیستم ترمز هیدرولیک استفاده شد. چرخ‌دنده‌ها تحت گشتاورهای ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ و با سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور در دقیقه قرار گرفتند. در بررسی تصاویر میکروسکوپی دنده‌های وامانده، نشانه‌هایی از ترک‌خوردگی دنده‌ها در ناحیه گام دنده مشاهده شد. با افزایش سطح گشتاور، سایش و نرمی مواد به‌طور محسوسی بیشتر شد که منجر به نازک‌شدن شدید دندانه‌ها و در نهایت شکست آن‌ها شد. به‌ویژه، وجود حفره سایش در ناحیه گام دنده‌های وامانده، به فشار نرمال بالا، تغییر جهت حرکت در ناحیه گام و دمای سطحی بالا در آن ناحیه نسبت داده شد. علاوه‌براین، ترک‌های سطحی را در گشتاورهای پایین مشاهده شد. باین‌حال، با افزایش گشتاور، افزایش قابل توجهی در جریان پلاستیکی مواد، سایش چسبان و انباشت براده مشاهده شد. بررسی‌ها نشان‌دهنده تأثیرات پیچیده بارهای مکانیکی و حرارتی در تخریب چرخ‌دنده‌ها هستند و اهمیت دقت در طراحی و انتخاب مواد را در شرایط عملیاتی مختلف را نشان می‌دهند. برای توسعه یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مدل‌های عددی پیشرفته‌ای برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و پیش‌بینی دمای سطحی دنده‌ها تحت گشتاورهای مختلف توسعه یابد. همچنین، مدل‌های عددی یا نیمه‌تجربی برای پیش‌بینی گذار بین مکانیزم‌های تخریب بر اساس شرایط بارگذاری و حرارتی ارائه شود تا درک بهتری از فرایندهای واماندگی حاصل شود. به‌علاوه، تحلیل آماری دقیق‌تر داده‌های حرارتی و مکانیکی با محاسبه انحراف معیار و بازه اطمینان جهت افزایش اعتبار نتایج توصیه می‌شود. در نهایت، توسعه مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی دقیق توزیع تنش و دمای سطحی می‌تواند مکمل ارزشمندی برای داده‌های تجربی باشد و به بهبود دوام چرخ‌دنده‌های پلی‌استال کمک کند.

منابع

- [1] R. Mohsenzadeh, Development of Stress Distribution of Composite Gear Tooth Reinforced by Nano-CaCO₃,

- 203(1) (1989) 31-38.
- [18] G. Wannop, J. Archard, Elastic hysteresis and a catastrophic wear mechanism for polymers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 187(1) (1973) 615-623.
- [19] R. Mohsenzadeh, B. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad, Failure analysis of POM ternary nanocomposites for gear applications: Experimental and finite element study, *Engineering Failure Analysis*, 140 (2022) 106606.
- [20] D. Zorko, Investigation on the high-cycle tooth bending fatigue and thermo-mechanical behavior of polymer gears with a progressive curved path of contact, *Int. J. Fatigue*, 151 (2021) 106394.
- [21] B. Soudmand, K. Shelesh-Nezhad, Study on the gear performance of polymer-clay nanocomposites by applying step and constant loading schemes and image analysis, *Wear*, 458 (2020) 203412.
- [22] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, Effect of gear tooth fillet radius on the performance of injection molded Nylon 6/6 gears, *Mater. Des.*, 27(8) (2006) 632-639.
- [23] K. Mao, W. Li, C. Hooke, D. Walton, Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears, *wear*, 267(1-4) (2009) 639-645.
- A combined experimental-numerical approach for life analysis and modeling of polymer-based ternary nanocomposite gears, *Tribology International*, 173 (2022) 107654.
- [12] R. Mohsenzadeh, Experimental Studies on The Tribology Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Zeolite Nanocomposite, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(10) (2021) 5159-5168.
- [13] R. Mohsenzadeh, K. Shelesh-Nezhad, T. Navid Chakherlou, Experimental study on wear behavior of polyacetal nanocomposite gears, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 36(2) (2023) 151-165.
- [14] R. Mohsenzadeh, K. Shelesh-Nezhad, T. Chakherlou, Experimental and finite element analysis on the performance of polyacetal/carbon black nanocomposite gears, *Tribology International*, 160 (2021) 107055.
- [15] J. Johnson, Introduction to fluid power, 6th ed., Delmar Thomson Learning Albany, NY, 2002.
- [16] D. Koffi, R. Gauvin, H. Yelle, Heat generation in thermoplastic spur gears, 107(1) (1985) 31-36.
- [17] D. Walton, Y. Shi, A comparison of ratings for plastic gears, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Mohsenzadeh, K. Shelesh-Nezhad, Multiscale Study of Polymer Gear Failure Under Variable Torque Conditions, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 57(2) (2025) 171-186.

DOI: [10.22060/mej.2025.23987.7831](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23987.7831)



