

# مروری بر مشخصه‌های واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلیمری

رسول محسن‌زاده سعدآبادی

دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی و حرفه‌ای میانه، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان آذربایجان شرقی، ایران

r.mohsenzadeh@tabrizu.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

پلیمر  
چرخ‌دنده  
واماندگی  
سایش  
خستگی  
آسیب حرارتی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱

کاربرد چرخ‌دنده‌های پلیمری به دلیل برخورداری از امتیازهایی شامل پایین بودن وزن، عملکرد کم‌صدا، عدم نیاز به روانکاری، سهولت در تولید انبوه و همچنین هزینه ساخت کم، رو به افزایش است. با این وجود، چرخ‌دنده‌های پلیمری، محدودیت‌هایی از جمله، مقاومت حرارتی پایین و استحکام مکانیکی نازل نسبت به چرخ‌دنده‌های فلزی دارند. چرخ‌دنده‌های پلیمری در طی انتقال قدرت در معرض شرایط پیچیده‌ای از بارگذاری، فرسایش و ترمودینامیکی قرار دارند. بنابراین، مطالعه عوامل واماندگی برای چرخ‌دنده‌های پلیمری با توجه به شرایط محیطی و بارگذاری حائز اهمیت است. واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلیمری متفاوت از چرخ‌دنده‌های فولادی است. یک نمونه از واماندگی در چرخ‌دنده پلیمری، واماندگی حرارتی است که برای چرخ‌دنده‌های فولادی رخ نمی‌دهد. این نوع از واماندگی می‌تواند تحت آسیب‌های حرارتی طبقه بندی شود. این مقاله سه نوع از ویژگی واماندگی شامل: سایش، خستگی و آسیب‌های حرارتی را مرور می‌کند. این ویژگی‌ها اغلب با هم به عنوان مکمل یکدیگر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

## ۱ مقدمه

نتیجه تغییر شکل آنها می‌شود. خستگی و سایش از دیگر عواملی هستند که منجر به واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری می‌شوند. سایش، خستگی، نوع و مکانیزم ایجاد آنها نه تنها به گشتاور اعمال شده بستگی دارد، بلکه از ماده اولیه چرخ‌دنده نیز اثر می‌پذیرد. محسن‌زاده و همکاران، چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی PA6/PP/nan CaCO<sub>3</sub> را تحت دو گشتاور ۸/۹ (کمتر از بار بحرانی) و ۱۴/۸ (بالای بار بحرانی) بررسی کردند. آنها برای چرخ‌دنده‌های تحت گشتاور بالای بار بحرانی، واماندگی حرارتی و برای چرخ‌دنده‌های تحت گشتاور کمتر از بار بحرانی، واماندگی از نوع سایش مشاهده کردند [۵]. به علاوه، ماو و همکاران، با مشاهده نتایج مشابه در چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی، واماندگی در گشتاورهای خیلی کمتر از بار بحرانی را از نوع خستگی توصیف کردند [۶]. در این مقاله، سه نوع ویژگی واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلیمری، شامل سایش، خستگی و آسیب حرارتی، مرور می‌شود.

چرخ‌دنده‌ها یکی از ابزارهای بادوام و با قابلیت استفاده زیاد در زمینه انتقال قدرت هستند. اهمیت انتقال قدرت توسط چرخ‌دنده‌ها در ماشین‌های دقیق و کاربردهایی که در آنها دقت درگیری چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک اهمیت دارد، بسیار زیاد است. راندمان انتقال قدرت توسط چرخ‌دنده‌ها حدود ۹۸٪ است [۱]. چرخ‌دنده‌ها در صنعت خودرو، حمل‌ونقل، صنایع دریایی، دستگاه‌های شکل‌دهی، لوازم برقی خانه و اداره، دوچرخه، صنعت اسباب‌بازی و سایر صنایع به کار می‌روند [۲]. 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، نداشتن قابلیت خودروانکاری، هزینه راه‌اندازی و تعمیرات زیاد و ایجاد آلودگی صوتی و محیطی است [۳]. 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 [۴].

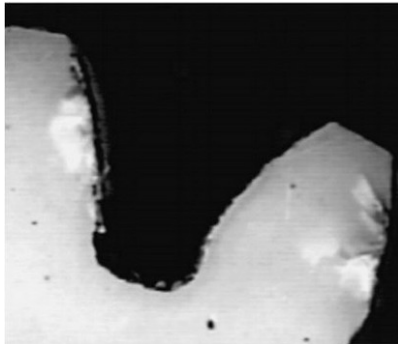
## ۲ مشخصه‌های واماندگی

### ۱.۲ سایش

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته توسط ماو و همکاران [۶]، مکانیزم واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی متفاوت از چرخ‌دنده‌های پلی‌آمید یا نایلون است. با توجه به شکل ۱، نمودار سایش برای چرخ‌دنده پلی‌استال-پلی‌استال و نایلون-نایلون، به سه مرحله تقسیم می‌شود: مرحله شروع، مرحله خطی و مرحله پایانی چرخ‌دنده. زمان مرحله شروع سایش کم بوده ولی میزان

مکانیزم واماندگی در چرخ‌دنده‌های فلزی متفاوت با چرخ‌دنده‌های پلیمری است. از جمله آسیب‌های مهم که منجر به واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری می‌گردد، تغییر شکل حرارتی است که این نوع واماندگی در چرخ‌دنده‌های فلزی وجود ندارد. در چرخ‌دنده‌های پلیمری، به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک و پلاستیک پلیمرها، در طی درگیری دنده‌ها حرارت زیادی ایجاد می‌شود و دما افزایش می‌یابد. افزایش دما باعث نرم شدن دنده‌ها و در

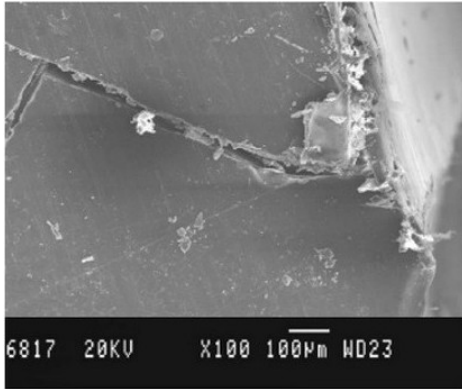
در به وجود آمدن ترک‌ها اثرگذار هستند. دمای تولیدشده در اثر اصطکاک و هیستریزس در سطح دنده، به دلیل رسانایی کم پلیمر، انباشته می‌شود. دمای زیاد سطح دنده‌ها و مخالف جهت بودن راستای سایش در منطقه گام دنده، منجر به ایجاد ترک‌های ریز در شرایط خشک می‌شود [۸].



(الف)



(ب)



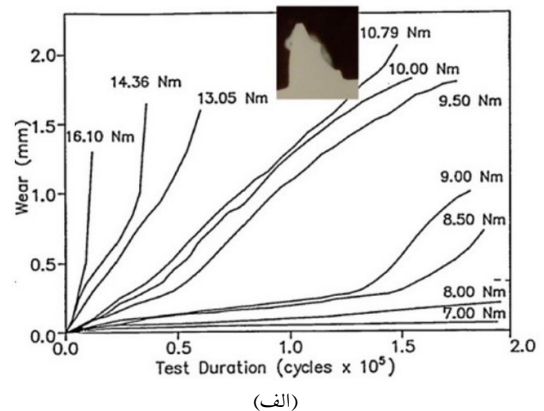
(ج)

**شکل ۲:** چرخ‌دنده نایلونی: (الف) نمای کلی سایش، (ب) شماتیک ناحیه حاوی ریز ترک و (ج) میکروساختار ترک [۸].

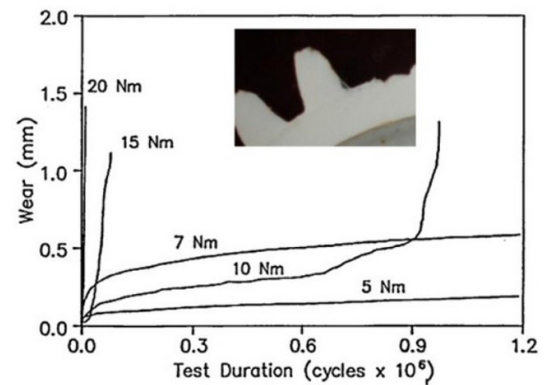
در پژوهشی دیگر، محسن‌زاده و همکاران [۹]، عملکرد چرخ‌دنده پلی‌استالی خالص و تقویت‌شده با نانو ذرات کلسیم کربنات را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند چرخ‌دنده‌های خالص تحت آسیب حرارتی و امانده شدند و چرخ‌دنده‌های تقویت‌شده با اینکه عمر بیشتری نسبت به چرخ‌دنده‌های خالص داشتند ولی در ناحیه گام دنده چرخ‌دنده محرک ریز ترک و نهایتاً ترک (شکل ۳) ایجاد شده و منجر به شکست و اماندگی در چرخ‌دنده شد.

با توجه به پروفیل سطحی دندانه‌ها، سطوح تماسی دو چرخ‌دنده محرک و متحرک نسبت به یکدیگر دارای غلتش و لغزش است. سایش در تمام سطوح دنده چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک رخ می‌دهد. با وجود این، بیشترین سایش در چرخ‌دنده محرک و در منطقه دایره گام ایجاد می‌شود. در طی

سایش قابل توجه است، در مرحله خطی میزان سایش به ثبات نسبی رسیده و میزان سایش خطی است و در مرحله سوم دوباره میزان سایش افزایش یافته و منجر به واماندگی چرخ‌دنده می‌گردد. علاوه‌براین زمانی که چرخ‌دنده‌های استالی تحت بار ۱۰ الی ۱۶ نیوتن متر قرار می‌گیرند، بلافاصله بعد از شروع آزمایش بقایای پلیسه‌ای تشکیل می‌شود. در حالی که برای چرخ‌دنده‌های نایلونی، پس از گذر از مرحله شروع و خطی، شکست دنده‌ها رخ می‌دهد. میزان عمر چرخ‌دنده‌های پلیمری، وابسته به گشتاور است. برای گشتاورهای پایین‌تر، شکست و یا واماندگی در اثر سایش رخ نمی‌دهد (بیشتر از  $10^7$  سیکل). در حالی که برای گشتاورهای بالاتر شکست در زمان‌های کمتر از  $10^6$  سیکل رخ می‌دهد.



(الف)



(ب)

**شکل ۱:** سایش چرخ‌دنده‌های (الف) پلی‌استالی و (ب) نایلونی [۶].

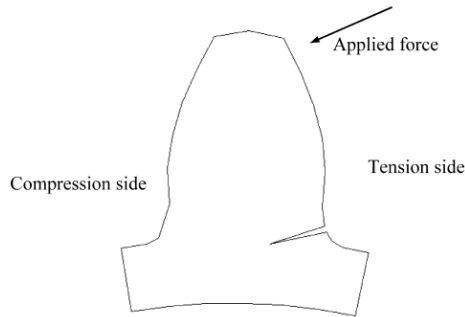
## ۲.۲ خستگی

زمانی که چرخ‌دنده‌ها تحت تنش تماسی بیش از حد دوام خستگی قرار بگیرند، ترک (در ناحیه گام یا ریشه) به وجود آمده و شروع به رشد می‌کند [۷].

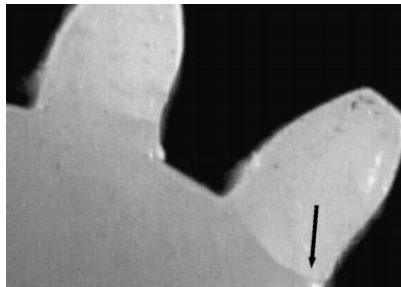
### ۱.۲.۲ ترک در ناحیه گام دنده

شکل ۲، نمای کلی سایش (الف)، شماتیک ناحیه حاوی ریز ترک (ب) و میکروساختار ترک (ج) برای چرخ‌دنده نایلونی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، سنتیلوان و همکاران [۸] نشان دادند، یک ناحیه که حاوی تعداد زیادی ریز ترک است، در منطقه گام دنده چرخ‌دنده‌های نایلونی با تنش کمتر از ۱۵ مگاپاسگال مشاهده می‌شود. تنش تماسی، دما و استحکام خستگی

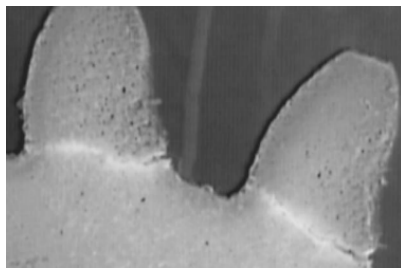
در مقابل گسترش ترک دارد. چرخ‌دنده حاوی الیاف شیشه با وجود اینکه استحکام بالایی دارند، با این حال خود محل تمرکز تنش بوده و عامل ایجاد ترک می‌باشند. چرخ‌دنده حاوی کربن با پل‌زدگی در انتهای ترک و یا کند کردن تیزی انتهای ترک، منجر به کاهش رشد و گسترش ترک می‌شوند.



شکل ۵: شماتیک گسترش ترک در ریشه دنده.



شکل ۶: رشد ترک در ریشه دنده برای چرخ‌دنده پلیمری خالص [۱۱].



شکل ۷: رشد ترک در ریشه دنده برای چرخ‌دنده پلیمری حاوی الیاف شیشه [۱۱].

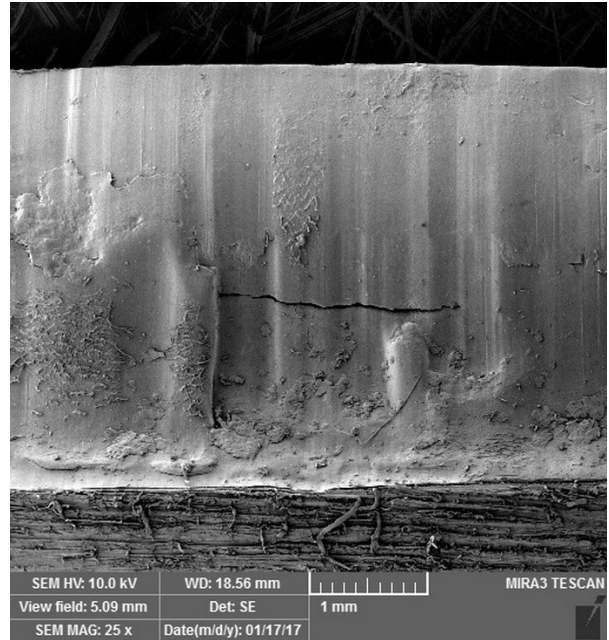


شکل ۸: رشد ترک در ریشه دنده برای چرخ‌دنده پلیمری حاوی الیاف کربن [۱۱].

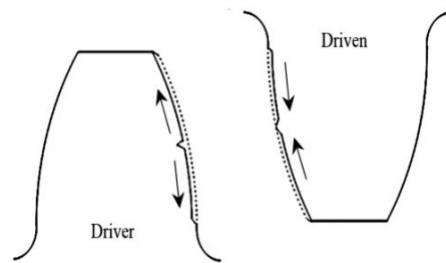
### ۳.۲ آسیب حرارتی

دمای سطحی دنده‌ها از جمله پارامترهای مهم در چرخ‌دنده‌های پلیمری است. این پارامتر جز شاخص‌های افت قدرت بوده و تأثیر به‌سزایی در

انتقال حرکت، در سطوح بالا و پایین ناحیه دایره گام، تماس لغزشی قابل ملاحظه‌ای وجود داشته و در چرخ‌دنده محرک منجر به ایجاد تنش‌های سطحی در دو جهت خلاف یکدیگر می‌شود. این می‌تواند باعث ایجاد ریز ترک‌هایی در ناحیه دایره گام دنده چرخ‌دنده محرک شده و سایش در آن ناحیه را تشدید کند. (شکل ۴) [۶، ۱۰].



شکل ۳: ترک در ناحیه گام چرخ‌دنده نانوکامپوزیتی [۸].

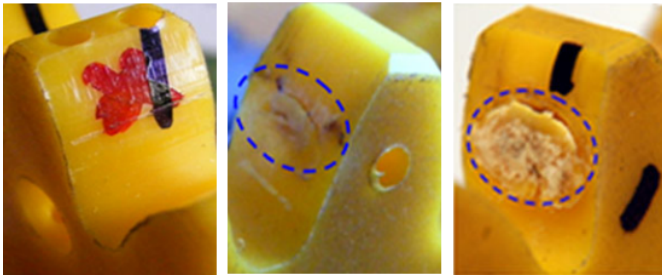


شکل ۴: وضعیت سایش سطح دنده در چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک [۱۰].

### ۲.۲.۲ ترک در ناحیه ریشه دنده

این نوع ترک، معمولاً برای چرخ‌دنده‌هایی که در معرض گشتاورهای بالا قرار دارند، رخ می‌دهد. تمرکز تنش بالا در ناحیه ریشه دنده منجر به ایجاد ترک در این ناحیه می‌گردد [۱۱]. در گشتاورهای بالا ترک بوجود آمده و در اثر بارهای سیکلی، رشد کرده و در نهایت منجر به شکست دنده می‌شود. شماتیکی از نحوه ایجاد و گسترش ترک در ناحیه ریشه دنده و در اثر تنش خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است.

علاوه‌براین، اشکال ۶، ۷ و ۸، به ترتیب نشان‌دهنده ترک در ناحیه ریشه دنده در چرخ‌دنده‌های خالص، حاوی الیاف شیشه و حاوی کربن هستند. در هر سه نوع چرخ‌دنده به دلیل تمرکز تنش در ناحیه ریشه دنده، ترک ایجاد شده و گسترش پیدا می‌کند. با این وجود، چرخ‌دنده نایلونی خالص به دلیل تافنس نسبتاً پایین، حساس به ترک بوده و مقاومت کمتری



شکل ۹: سه نوع طراحی ظاهری دنده جهت کاهش آسیب حرارتی [۱۲].

## مراجع

- [1] Juvinall, Robert C and Marshek, Kurt M. *Fundamentals of machine component design*, vol. 126127. Wiley New York, 1983.
- [2] Davis, Joseph R. *Gear materials, properties, and manufacture*. ASM International, 2005.
- [3] Hossan, Mohammad Robiul and Hu, Zhong. Strength evaluation of polymer composite spur gear by finite element analysis. in *ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 65-72. American Society of Mechanical Engineers, 2008.
- [4] Kirupasankar, S, Gurunathan, C, and Gnanamoorthy, R. Transmission efficiency of polyamide nanocomposite spur gears. *Materials & Design*, 39:338-343, 2012.
- [5] محسن‌زاده، رسول و شلش‌نژاد، کریم. مطالعه تجربی دوام چرخنده‌های نانوکامپوزیتی پلی آمید-۶-پلی پروپیلن-کربنات کلسیم. نشریه علوم و فناوری کامپوزیت، ۳(۲):۱۴۷-۱۵۶، ۱۳۹۵.
- [6] Mao, K, Li, W, Hooke, CJ, and Walton, D. Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears. *Wear*, 267(1-4):639-645, 2009.
- [7] Dowling, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson, 2012.
- [8] Senthilvelan, S and Gnanamoorthy, R. Damage mechanisms in injection molded unreinforced, glass and carbon reinforced nylon 66 spur gears. *Applied composite materials*, 11(6):377-397, 2004.
- [9] Mohsenzadeh, Rasool, Majidi, Hojjat, Soltanzadeh, Mohsen, and Shelesh-Nezhad, Karim. Wear and failure of polyoxymethylene/calcium carbonate nanocomposite gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, p. 1350650119867530, 2019.
- [10] Mao, K. A new approach for polymer composite gear design. *Wear*, 262(3-4):432-441, 2007.
- [11] Walton, D and Shi, YW. A comparison of ratings for plastic gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science*, 203(1):31-38, 1989.
- [12] Düzçükoğlu, Hayrettin, Yakut, Rifat, and Uysal, Eyyub. The use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth. *Journal of failure analysis and prevention*, 10(6):545-555, 2010.

عمر چرخ‌دنده‌های پلیمری دارد. اندازه‌گیری دمای سطحی دنده، از جمله روش‌های تشخیص آسیب بوده و چنانچه دمای سطحی دنده به دمای شیشه‌ای یا دمای ذوب برسد، خواص مکانیکی و در نهایت عمر چرخ‌دنده را تحت تأثیر قرار خواهد داد. مدهای واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلیمری خالص و کامپوزیتی با توجه به تحقیقات سنتیلوان و همکارانش [۸] متفاوت است. آنها با تحقیق بر روی چرخ‌دنده‌های پلی‌آمید خالص و پلی‌آمید حاوی الیاف کربن و الیاف شیشه، دریافتند که دمای سطحی دنده‌های پلیمر خالص بیشتر از دمای سطحی دنده‌های پلیمر تقویت شده است. علاوه بر این دمای سطحی دنده چرخ‌دنده‌های حاوی الیاف کربن، کمتر از دمای سطحی دنده چرخ‌دنده‌های تقویت‌شده، استحکام بیشتر، ضریب اصطکاک کمتر و خواص گرمایی بهتر نسبت به پلیمر خالص است. استحکام بیشتر چرخ‌دنده‌های تقویت‌شده، از خم‌شدگی دنده‌ها ممانعت می‌کند و از درگیری ناخواسته که منجر به سایش و در نهایت دمای بیشتر می‌شود، می‌کاهد. علاوه بر این، بهبود انتقال دمای سطحی دنده‌ها و جلوگیری از انباشت دمای، از دیگر محاسن چرخ‌دنده‌های تقویت‌شده است. برخی دیگر از محققین با ایجاد سوراخ‌های خنک‌کاری در دنده، منجر به کاهش دمای سطح دنده شده‌اند [۱۲]. با توجه به شکل ۹، آنها جهت کاهش آسیب حرارتی، سه نوع طراحی: چرخ‌دنده‌های اصلاح نشده، چرخ‌دنده‌هایی که در ناحیه سطحی گام دنده سوراخ ایجاد شده و چرخ‌دنده‌هایی که در ناحیه گام و در بدنه چرخ‌دنده سوراخ ایجاد شده است را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، چرخ‌دنده‌های اصلاح‌نشده، در مجاورت ناحیه گام نرم شده و وامانده شدند. علت امر، انباشتگی دما در سطح دنده و عدم توانایی پلیمر به انتقال حرارت در حجم دنده است که منجر به نرم‌شدگی و در نهایت واماندگی می‌شود. در طراحی دوم، آثار آسیب حرارتی در ناحیه گام و ریشه دنده دیده شد. با این وجود میزان دما و آسیب حرارتی کمتر از حالت اول است. در طراحی سوم آسیب حرارتی فقط در گشتاور بالا (۱۸ نیوتن متر) مشاهده گردید.

## ۳ نتیجه‌گیری

با روی کار آمدن پلیمرها و استفاده فراوان در صنعت، پژوهشگران را به فکر امکان‌سنجی جهت جایگزینی قطعات فولادی از پلیمرها انداخت. در این میان، چرخ‌دنده‌ها از جمله اجزای مهم در انتقال قدرت و حرکت هستند که در صنعت به وفور استفاده می‌شوند. جایگزینی چرخ‌دنده‌های پلیمری برای چرخ‌دنده‌های فولادی در شرایط کاری کم باری، می‌تواند مزایایی همچون کارکرد کم صدا، بدون روانکار و تولید آسان را به ارمغان بیاورد. با این وجود برای طراحی مناسب و کم‌خطا، آشنایی با عوامل واماندگی در چرخ‌دنده را می‌طلبد. واماندگی در چرخ‌دنده‌های پلیمری، متفاوت از چرخ‌دنده‌های فولادی است. در این مقاله واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری به سه قسمت سایش، خستگی و آسیب حرارتی تقسیم شده است. با توجه به شرایط کاری چرخ‌دنده‌های پلیمری، عامل واماندگی، می‌تواند یکی از عوامل ذکر شده و یا چند مورد بصورت همزمان ظاهر شوند.