

## تأثیر نانو ذرات کربنات کلسیم بر رفتار سایشی چرخنده های نانو کامپوزیتی PA6/PP/Nano

### CaCO<sub>3</sub>

رسول محسن زاده<sup>۱\*</sup>، کریم شلش نژاد<sup>۲</sup>، محسن سلطان زاده فیروز سالاری<sup>۳</sup>، سعید منتخبی<sup>۴</sup>

### چکیده

چرخنده های نانو کامپوزیتی بر پایه آمیخته پلی آمید ۶-پلی پروپیلن (با نسبت وزنی ۶۷/۳۳ PA6/PP) حاوی نانو کربنات کلسیم (۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی) و سازگار کننده PP-g-MAH (۵ قسمت وزنی) به روش قالب گیری تزریقی تولید گردیدند. با استفاده از یک دستگاه آزمون دوام چرخنده، مقدار سایش و دمای سطحی دندانها بر حسب زمان و همچنین عمر کاری چرخنده ها تا لحظه تغییر شکل دائمی و توقف انتقال حرکت، تحت گشتاور خروجی ۱۴/۸ Nm اندازه گیری شد. حضور نانو ذرات کربنات کلسیم، دمای کاری چرخنده ها را تا ۵ درجه سانتیگراد کاهش داد. حداکثر عمر چرخنده های نانو کامپوزیتی تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm، در آمیخته محتوی ۲/۵ قسمت وزنی از نانو کربنات کلسیم مشاهده شد که این مقدار تقریباً ۲/۵ برابر بیش تر از عمر چرخنده های پلی آمیدی خالص است. افزایش دوام چرخنده های پایه پلیمری در اثر وجود نانو ذرات کربنات کلسیم به بهبود مقاومت خمشی و سایشی دنده ها نسبت داده شد.

**واژگان کلیدی:** نانو کربنات کلسیم، پلی آمید، پلی پروپیلن، سایش.

<sup>۱</sup> - کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۲</sup> - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۳</sup> - کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۴</sup> - کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* نویسنده مسئول مقاله : [rasoolmohsenzadeh@gmail.com](mailto:rasoolmohsenzadeh@gmail.com)

## پیشگفتار

کاربرد چرخنده های پلیمری به دلیل برخورداری از امتیازهایی شامل پایین بودن وزن و صدا، عدم نیاز به روانکاری و همچنین سهولت در تولید انبوه، رو به افزایش است [۱]. چرخنده های پلیمری در طی انتقال قدرت در معرض شرایط پیچیده ای از بارگذاری و فرسایش قرار دارند. انتخاب صحیح نوع ماده یا آمیخته پلیمری برای چرخنده با توجه به شرایط محیطی و بارگذاری حائز اهمیت است. پلی آمید یا نایلون، یکی از مواد پلیمری مهم در ساخت چرخنده ها می باشد [۲]. پلی آمید در ردیف پلیمرهای مهندسی قرار داشته و به طور نسبی در مقایسه با سایر پلیمرهای گرمانرم از مقاومت مکانیکی، حرارتی، سایشی و خواص عمومی مناسبی برخوردار است [۳]. مهم ترین عیوب پلی آمید شامل، فرایند پذیری پایین به دلیل باریک بودن محدوده دمایی قالب گیری آن و همچنین تمایل زیاد آن به جذب رطوبت است [۴]. رطوبت جذب شده در پلی آمید، به دلیل تاثیر بر باند هیدروژنی مابین زنجیره های پلیمری و افزایش تحرک آن ها، سبب کاهش دمای شیشه ای<sup>۱</sup> می شود [۵]. جذب رطوبت در پلیمرهای نیمه بلوری باعث کاهش مدول یانگ و تنش تسلیم، افزایش ازدیاد طول تا پارگی و کاهش مقاومت به سایش می شود [۶، ۷، ۸]. مخلوط کردن پلی آمید با پلیمرهای دیگر و پرکننده های معدنی می تواند بر خواص مکانیکی و جذب آب آمیخته های پلی آمیدی اثر گذارد. نانوذرات معدنی در مقایسه با پرکننده های معدنی میکرونی دارای سطح ویژه بالا، اثر اصلاح کننده خواص ضربه ای و مقاومت به جذب آب بیش تری هستند. مطلبی و همکارانش [۹] نشان دادند، بکارگیری ۵ درصد وزنی نانوذرات کربنات کلسیم در PA6 باعث بهبود ۶ درصدی در مقاومت ضربه ای و کاهش ۱۵ درصدی در جذب آب می شود. منتخبی از PP برای کاهش جذب آب در PA6، از PP-g-MAH به عنوان سازگار کننده در آمیخته PA6/PP و از نانوکربنات کلسیم ( ۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی) برای بهبود خواص مکانیکی PA6/PP استفاده کردند، نتایج نشان دهنده کاهش جذب آب ۷۲ درصدی، افزایش ۱۶ درصدی در استحکام خمشی، افزایش ۳۲

درصدی در مدول خمشی و افزایش ۹۵ درصدی مقاومت ضربه ای بود [۱۰]. کوزومو و همکاران اثر افزودن نانورس و سازگارکننده را بر روی خواص مکانیکی آمیخته PA6/PP مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که وجود نانوذرات رس و افزایش چسبندگی نانوذرات به پلیمر، باعث بهبود خواص کششی و خمشی می شود. از سوی دیگر، افزودن نانورس (با و بدون سازگارکننده) سبب کاهش مقاومت ضربه ای و ازدیاد طول در نقطه شکست می شود [۱۱]. در برخی دیگر از پژوهش ها، اثر نانوذرات معدنی بر خواص سایشی پلی آمیدها و آمیخته های پلی آمیدی بررسی شده است. سریناس و همکاران [۸] با افزودن نانو ذرات رس به پلی آمید ۶، خواص سایشی را تحت شرایط خشک و مرطوب به روش پین روی دیسک بررسی کردند. افزودن نانو ذرات رس، سبب بهبود مقاومت سایشی و رطوبت جذب شده در پلیمر منجر به کاهش مقاومت سایشی گردید. سورش و همکاران [۱۲]، با استفاده از آزمون پین روی دیسک نشان دادند که بکارگیری ۲ درصد وزنی نانو ذرات رس در آمیخته PA66/PP سبب کاهش حدود ۵۰ درصد در مقدار سایش می شود. ژانگ و همکاران [۱۳]، از نانو ذرات کربنات کلسیم جهت افزایش مقاومت سایشی پلیمر poly-alpha-olefin استفاده کردند، آن ها نشان دادند که نمونه های نانو کامپوزیتی، دارای مقاومت سایشی بیش تر و ضریب اصطکاک پایین تری نسبت به نمونه های خالص می باشند. بهبود مقاومت سایشی به اثر روانکاری نانو ذرات کربنات کلسیم نسبت داده شده است. با توجه به شرایط کاری خاص چرخنده های محرک و متحرک، شامل توزیع تنش، کرنش، دما و اعمال بارهای ضربه ای به دنده ها، مکانیزم سایش در چرخنده ها با مکانیزم سایش در آزمون پین روی دیسک متفاوت بوده و بنابراین برای تعیین عمر چرخنده ها لازم است از آزمون سایش چرخنده استفاده نمود [۱۴]. مو و همکارانش [۱۵]، رفتار سایشی چرخ دنده های پلی آمیدی خالص با مدول و تعداد دنده به ترتیب ۲ میلی متر و ۳۰ را به طور تجربی مطالعه کردند. در آن پژوهش، مقدار سایش دنده بر حسب مقدار گشتاور و مدت زمان انتقال حرکت تعیین گردید و نشان داده شد که با افزایش گشتاور و رسیدن آن به یک مقدار بحرانی (۱۰ تا ۱۱ نیوتن-متر)، میزان سایش به طور قابل

<sup>1</sup>- Glass Temperature

شد [۲]. جهت کاهش جذب رطوبت، PA6 با PP مخلوط گردید [۱۰]. از نانو ذرات کربنات کلسیم برای افزایش مقاومت سایشی، اثر روانکاری [۱۹-۲۱]، افزایش مقاومت ضربه‌ای در اثر حفره سازی [۲۲]، خاصیت جوانه زنی [۱۷، ۲۳]، افزایش مقاومت خراشی [۲۴] و بهبود مقاومت نفوذ پذیری [۲۵]، استفاده شد. علاوه بر این، نانو ذرات استفاده شده دارای پوشش اسید استتاریک است که می‌تواند از کلوخه‌ای شدن نانو ذرات ممانعت کند [۲۶]. آمیخته‌های گوناگون به روش ذوبی آماده شد و چرخنده‌های نانو کامپوزیتی با استفاده از یک دستگاه قالب‌گیری تزریقی تولید شد. در این تحقیق، مقاومت سایشی و دوام چرخ دنده‌های قالب‌گیری شده نانو کامپوزیتی PA6/PP/CaCO<sub>3</sub> در گشتاور ۱۴/۸ با استفاده از یک دستگاه آزمون دوام چرخنده به طور تجربی مطالعه شد.

### مواد و روش‌ها

پلی آمید ۶ با نام تجاری F223-D آکولن<sup>۱</sup> با شاخص جریان مذاب ۱۳g/۱۰ min محصول شرکت دی اس ام<sup>۲</sup>، پلی پروپیلن با نام تجاری PI0800 با شاخص جریان مذاب ۱۰ g/۱۰ min محصول شرکت پتروشیمی بندر امام به عنوان مواد اولیه پلیمری به کار گرفته شدند. از نانو ذرات کربنات کلسیم با اندازه متوسط ۷۰ نانومتر، پوشش داده شده با اسیداستتاریک محصول شرکت سولوی<sup>۳</sup> فرانسه با نام تجاری ۳۱۲ سوکال<sup>۴</sup> و از پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک آنیدرید (PP-g-MAH) به عنوان سازگارکننده با نام تجاری PP-G110، با شاخص جریان مذاب ۱۰ g/۱۰-۸۰-۵۰ و با ۱/۳-۰/۸ درصد مالئیک آنیدرید، محصول شرکت کیمیا جاوید سپاهان استفاده شد.

ملاحظه‌ای افزایش یافته و هم‌چنین دمای سطح دنده‌ها، یکی از عوامل تعیین کننده نرخ سایش چرخ دنده بود. سنتیلوان و همکارش [۱]، تاثیر سرعت دورانی چرخنده و گشتاور اعمالی را بر عملکرد و دمای سطحی دنده چرخنده‌های پلی آمیدی خالص و چرخنده‌های پلی امید ۶ تقویت شده با ۲۰ درصد الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی و گشتاور چرخنده‌ها، دمای سطحی دنده‌ها افزایش یافته و از عمر چرخنده‌ها کاسته می‌شود. افزون بر این، چرخنده‌های تقویت شده با الیاف شیشه، به دلیل خاصیت انتقال حرارت نسبتاً خوب شیشه و مقاومت مکانیکی نسبتاً بالا، عملکرد بهتری نسبت به چرخنده‌های پلی آمیدی خالص از خود نشان دادند. اشرفی و همکاران [۱۶]، اثر افزودن نانو ذرات رس را روی خواص سایشی چرخنده‌های نانوکامپوزیتی و پلی آمید ۶ درگشتاورهای نسبتاً پایین (۱/۲ Nm) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون سایش چرخنده‌ها، کاهش تا حداکثر ۴۰ درصد در مقدار سایش چرخنده‌های نانوکامپوزیتی را نسبت به پلیمر خالص نشان داد. هم‌چنین نتایج حاصل از اندازه گیری دمای سطح دنده‌ها، کاهش دمای سطح دنده‌های چرخنده‌های نانوکامپوزیتی را نسبت به دمای چرخنده‌های پلیمری خالص نشان داد. در آن پژوهش، بهبود نسبی خواص سایشی چرخنده‌های پلی آمید ۶-رس به اثر جوانه زنی بلوری نانو رس در زمینه پلی آمید ۶، بهبود انتقال حرارت در اثر حضور نانو ذرات رس و مقاومت ذاتی نانو رس در برابر سایش نسبت داده شد. بکارگیری نانو ذراتی با ساختاری همسانگرد، مانند نانو کربنات کلسیم با توجه به داشتن ساختاری شبه کروی، احتمالاً می‌تواند سبب بهبود دوام چرخنده‌های پلی آمیدی شود. مزایای بکارگیری نانو ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری شامل اثر روانکاری و بهبود خواص سایشی [۱۳]، پخش انرژی ضربه [۱۷] و خاصیت جوانه زنی [۸، ۱۸] عوامل مهمی می‌باشند که می‌توانند بر دوام چرخنده‌های پایه پلیمری اثر داشته باشند.

در این پژوهش از PA6 به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی مناسب و هم‌چنین کاربرد گسترده آن در تولید چرخنده‌های پلیمری استفاده

<sup>۱</sup>- Akulon

<sup>۲</sup>- DSM

<sup>۳</sup>- SOLVAY

<sup>۴</sup>- SOCAL

چرخنده های نمونه به روش قالب گیری تزریقی با دمای مذاب  $190^{\circ}\text{C}$  و دمای قالب  $60^{\circ}\text{C}$  تولید شد. قبل از قالب گیری نمونه ها، آمیخته ها به مدت ۶ ساعت و در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  رطوبت گیری شدند. برای آماده سازی نمونه های جذب آب کرده، چرخنده های پلی آمیدی خالص به مدت ۸ روز در آب نگه داشته شدند. با اندازه گیری وزن چرخنده ها قبل و بعد از جذب آب مشخص شد که نمونه ها به مقدار ۵/۴ درصد آب جذب کرده اند. نمونه های جذب آب کرده، با PA6/W نشان داده شده است.

## تجهیزات

برای تهیه آمیخته ها از اکسترودر دوپیچی ZSK-25، شرکت کوپرین<sup>۱</sup> آلمان با قطر پیچ ۲۵ mm و نسبت طول به قطر ۴۰ استفاده شد. چرخنده های نمونه با مدول ۲mm و تعداد دندان ۳۶ با بکارگیری یک دستگاه تزریق پلاستیک ۱۱۰/۳۸۰ از شرکت فولاد قالب گیری شدند. برای مطالعه شکل شناسی از میکروسکوپ الکترونی پویشی VEGA/TESCAN ساخت جمهوری چک استفاده شد. از دستگاه آزمون عملکرد چرخنده، طراحی و ساخته شده در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، برای تعیین دوام چرخنده ها استفاده شد. این دستگاه دارای توان ۱/۱ کیلووات و دور خروجی ۶۴۵ rpm بوده و در آن از یک موتور AC با ولتاژ ۳۸۰ ولت استفاده شده است. اندازه گیری دمای سطح دندان های چرخنده ها با استفاده از یک سنسور دیجیتالی تماسی اندازه گیری دما نوع Nicer-Ni ساخت شرکت تاستوترمو<sup>۲</sup> آلمان، انجام شد. جهت تعیین میزان سایش در دندان های چرخنده ها، از میکرومتر فک بشقابی با ریزنگری ۰/۰۱ و دامنه ۰-۲۵ میلی متر برای اندازه گیری پارامتر کنترلی پشت تا پشت چهار دنده<sup>۳</sup> استفاده شد.

## آماده سازی نمونه

مواد اولیه شامل PA6، PP، PP-g-MAH و nano-CaCO<sub>3</sub> پس از رطوبت گیری ( $80^{\circ}\text{C}$ ، ۸h)، ابتدا به صورت مکانیکی و پس از آن به روش ذوبی و با استفاده از اکسترودر دومارپیچ مخلوط شده و رشته های خروجی از اکسترودر توسط دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل شد. سرعت دورانی مارپیچ های اکسترودر معادل ۲۵۰ rpm و میزان دمای هیترها از محل تغذیه تا قالب اکسترودر به ترتیب  $210^{\circ}\text{C}$ ،  $240^{\circ}\text{C}$ ،  $250^{\circ}\text{C}$ ،  $255^{\circ}\text{C}$  و  $240^{\circ}\text{C}$  تنظیم گردید. علائم اختصاری و نسبت وزنی حضور مواد مختلف در آمیزه های تهیه شده در جدول ۱ مشخص شده است.

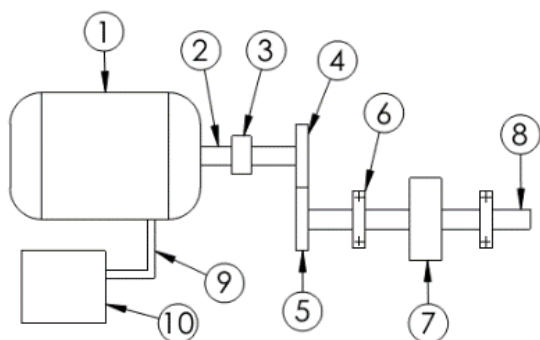
<sup>۱</sup>- Coperion

<sup>۲</sup>- Tastotermo

<sup>۳</sup>- span-size

جدول ۱- فرمول بندی نانو کامپوزیت های پلیمری

نام آمیخته	پلی آمید ۶ (wt.%)	پلی پروپیلن (wt.%)	سازگار کننده (phr) <sup>۱</sup>	نانوکربنات کلسیم (phr)
PA6	۱۰۰	۰	۰	۰
PA6/PP	۶۷	۳۳	۵	۰
PA6/PP/5/2C	۶۷	۳۳	۵	۲/۵
PA6/PP/5C	۶۷	۳۳	۵	۵
PA6/PP/5/7C	۶۷	۳۳	۵	۷/۵
PA6/PP/10C	۶۷	۳۳	۵	۱۰



### آزمون چرخنده

شکل ۱، نمایی از دستگاه تست سایش چرخنده را نشان می‌دهد. در این آزمون، دو چرخنده یکسان تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر و دور مشخص (۶۴۵ دور بر دقیقه) باهم درگیر شده و کار می‌کنند. گشتاور مورد نیاز از طریق یک سیستم ترمز لنتی (قطعه شماره ۷) تامین شده و مقدار آن با استفاده از جریان مصرفی موتور کنترل شد.

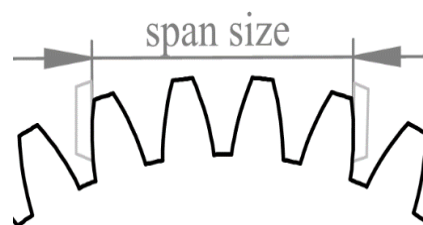
شکل ۱- دستگاه تست چرخنده : ۱- موتور الکتریکی ،  
۲- محور محرک، ۳- کوپلینگ ، ۴- چرخنده محرک،  
۵- چرخنده متحرک، ۶- یاتاقان، ۷- سیستم اعمال  
گشتاور، ۸- محور متحرک ۹- کابل ۱۰- وات متر

در این پژوهش، گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر که بالاتر از گشتاور بحرانی گزارش شده، برای چرخنده‌های پلی آمیدی با مدول ۲ mm ( ۱۰ تا ۱۱ نیوتن متر) [۱۵] است، انتخاب شد. افزون بر این، در این پژوهش، مقدار span-size، فاصله پشت تا پشت چهار دنده متوالی به عنوان پارامتر کنترلی مقدار سایش در نظر گرفته شد. شکل ۲، تصویری از شرایط اندازه گیری span-size توسط میکرومتر فک بشقابی را نشان می‌دهد. اندازه گیری

<sup>۱</sup>- part per hundred resin

زنجیره‌های پلیمری را کاهش می‌دهد و در نتیجه جدایش زنجیره‌ها به سهولت انجام پذیرفته و مقاومت سایشی کاهش می‌یابد [۲۷،۸]. با افزودن PP به PA6، میزان سایش به دلیل پایین بودن خواص سایشی PP در مقایسه با PA6 [۲۸]، افزایش یافته است. افزایش ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به ترکیب PA6/PP، منجر به کاهش ۸۳ درصدی میزان سایش نسبت به پلی آمید خالص شده است. علت این کاهش را می‌توان چنین توضیح داد که نانو ذرات کربنات کلسیم در پلیمر زمینه خاصیت هسته زائی داشته و می‌تواند منجر به افزایش درجه کریستالی شود [۲۳،۸]. افزایش هسته زنی و درجه بلورینگی می‌تواند باعث افزایش مقاومت به سایش پلیمر زمینه شود [۱۸]. چرخنده‌های پلی آمیدی خالص از مدول پایین تری برخوردار هستند و بنابراین سطح تماس دندانه‌های چرخنده محرک و متحرک در حین درگیری بیشتر است. از سوی دیگر، چرخنده‌های محتوی نانوذرات کربنات کلسیم از مدول بالاتری نسبت به پلی آمید خالص برخوردار بوده و سطح تماس دندانه‌های دو چرخ دنده کم‌تر است. افزایش سطح تماس درگیری دندانه‌ها منجر به افزایش حرارت و سایش می‌شود [۱۸]. افزون بر این، نانو ذرات کربنات کلسیم، به دلیل داشتن شکل هندسی شبه کروی، می‌تواند نقش روانکار را ایفا کند [۱۳]. نانو کربنات کلسیم از تماس مستقیم پلیمر با پلیمر کاسته و مانند بلبرینگ در تجهیزات مکانیکی عمل کرده که این منجر به کاهش لغزش و سایش می‌شود [۱۳]. مطابق شکل ۴، توزیع مناسب نانو ذرات در نمونه حاوی ۵ قسمت وزنی کربنات کلسیم به وضوح دیده می‌شود. افزودن مقادیر بالاتر (۷/۵ و ۱۰ قسمت وزنی) از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به افزایش قابل توجه نرخ سایش شده که دلیل آن می‌تواند کلوخه‌ای شدن ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری باشد. کلوخه‌های کربنات کلسیم می‌توانند به عنوان عوامل ساینده عمل نموده [۱۶] که این می‌تواند باعث افزایش سایش در چرخنده‌ها شود. شکل ۵، تصویر کلوخه‌ای شدن نانو ذرات کربنات کلسیم در آمیخته PA6/PP/10C را نشان می‌دهد.

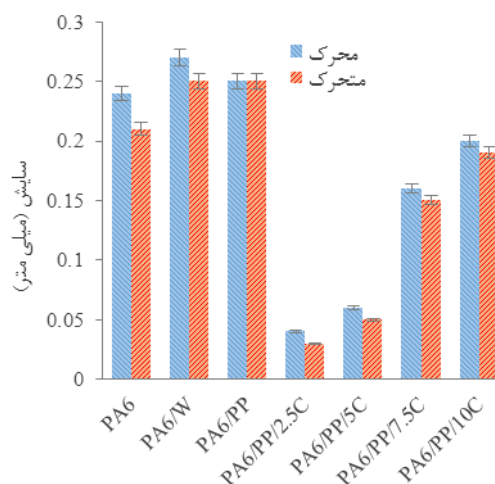
دمای سطح دندانه‌های چرخنده‌ها پس از ۱۰۰۰۰ دور و در لحظه توقف موتور با استفاده از یک دماسنج تماسی دیجیتال کالکس آلمان با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد انجام شد.



شکل ۲- پارامتر کنترلی برای اندازه گیری سایش

## نتایج و بحث

شکل ۳، نتایج آزمون سایش برای دو چرخنده محرک و متحرک نانو کامپوزیتی را بر حسب تعداد دور نشان می‌دهد.



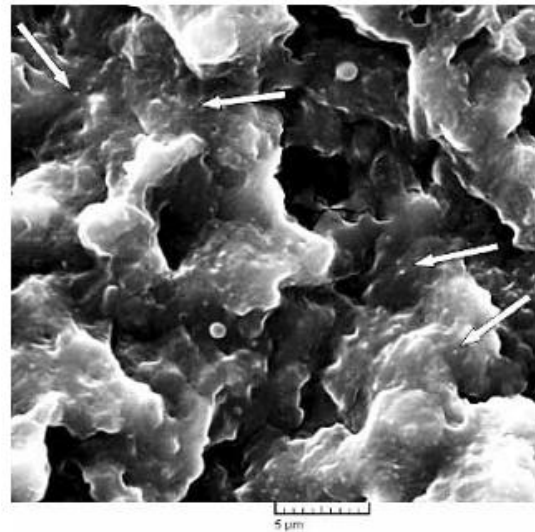
شکل ۳- سایش چرخنده‌ها تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm

مطابق شکل ۳، یک افزایش ۲۰ درصدی در مقدار سایش در نمونه پلی آمیدی که جذب آب کرده در مقایسه با پلی آمید خالص مشاهده می‌شود. نفوذ مولکول‌های آب به درون زنجیره‌های پلیمری، پیوند بین



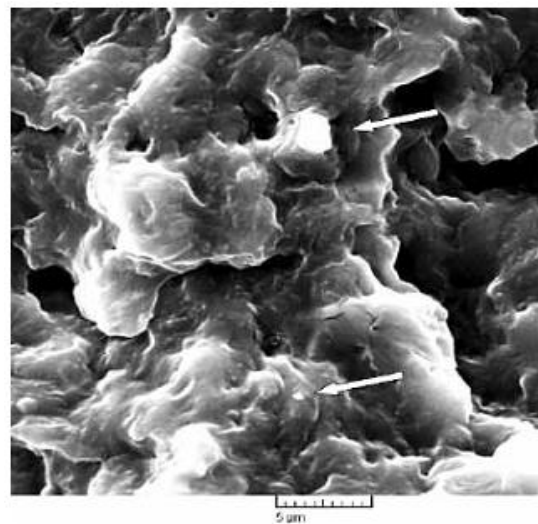
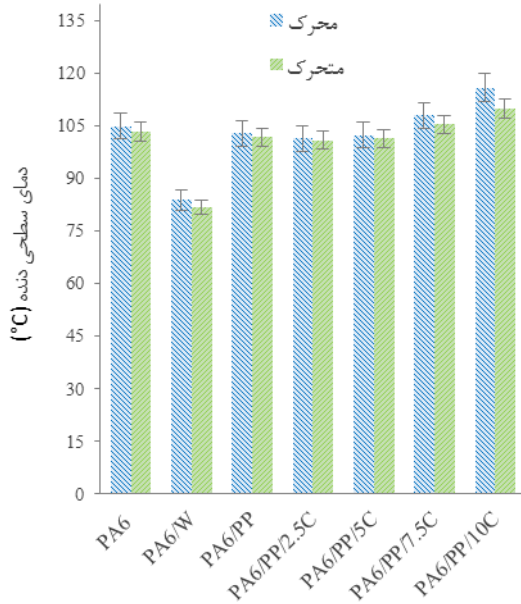
شکل ۶ - سطح دنده و مرز ناحیه‌ای که در آن بیشترین

سایش رخ می‌دهد



شکل ۴ - تصویر SEM آمیزه PA6/PP/5C

شکل ۷، نتایج تغییرات دمایی چرخنده‌های نانو کامپوزیتی پس از ۱۰۰۰۰ دور، تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm را نشان می‌دهد.



شکل ۵ - تصویر SEM آمیزه PA6/PP/10C

شکل ۶، سایش سطحی دنده‌های چرخنده PA6/PP را پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. تمام سطح دنده در معرض سایش می‌باشد؛ اما بیشترین مقدار سایش در ناحیه‌ای نزدیک به خط گام است.

شکل ۷ - دما در سطح دنده چرخنده‌ها تحت گشتاور

۱۴/۸ Nm

می‌شود که افزودن PP به PA6 منجر به کاهش جزئی عمر چرخنده شده است. افزودن ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به زمینه PA6/PP، منجر به افزایش حدود ۲/۵ برابر عمر نسبت به پلی آمید خالص شد. همان گونه که در قسمت قبل نشان داده شد، نانو ذرات کربنات کلسیم، سبب کاهش سایش و حرارت در دنده‌ها می‌شود و این می‌تواند منجر به کاهش تغییر شکل دائمی و افزایش عمر گردد. حضور نانو ذرات هم‌چنین می‌تواند باعث تغییر در بلورینگی زمینه پلیمری و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شود [۱۸]. افزون بر این، با توجه به ابعاد کوچک و پراکندگی ذرات تقویت کننده در پلیمر زمینه، انرژی وارد شده پخش شده [۲۲] و بنابراین میزان انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. بکارگیری مقادیر بالا از نانو ذرات (۷/۵ و ۱۰ قسمت وزنی) سبب کاهش قابل ملاحظه در عمر چرخنده‌ها شد. این نتیجه می‌تواند به دلیل کلوخه‌ای شدن ذرات در زمینه پلیمری باشد.

افزودن پلی پروپیلن همراه با سازگارکننده تاثیر جزئی بر دمای سطح دنده‌ها داشت. افزودن تا ۵ قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم به زمینه PA6/PP، سبب کاهش دما در سطح دنده‌ها نسبت به بقیه نانو کامپوزیت‌ها شده است. کاهش دما با افزودن ۵ قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم را می‌توان به هدایت گرمایی مناسب نانو ذرات در نمونه ۵ قسمت وزنی نانو ذرات، نسبت به درصد‌های بیشتر اشاره کرد. علاوه بر این با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین دما مربوط به چرخنده PA6/PP/10C می‌باشد که دلیل این امر می‌تواند، پدیده کلوخه‌ای شدن و توزیع نامناسب نانو ذرات باشد.

تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن-متر، چرخنده‌ها در دوره‌های کم‌تر از ۶۳۰۰۰ دچار تغییر شکل دائمی گردیدند و انتقال حرکت متوقف شد. شکل ۸، تغییر شکل دائمی ایجاد شده در چرخنده کامپوزیتی PA6/PP را تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر نشان می‌دهد.

شکل ۹، نتایج دوام و عمر چرخنده‌ها تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، مشاهده



ب



الف

شکل ۸ - دنده‌های چرخنده PA6/PP (الف) قبل از آزمون (ب) پس از آزمون، تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر



## نتیجه گیری

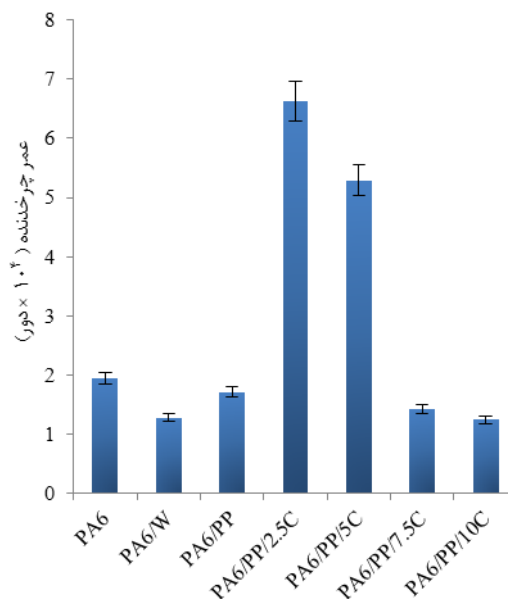
چرخنده‌های نانوکامپوزیتی PA6/PP/CaCO<sub>3</sub> محتوی ۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به روش قالب‌گیری تزریقی تولید و تحت آزمون دوام چرخنده قرار گرفتند. نتایج نشان داد، افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم تا ۵ قسمت وزنی به PA6/PP منجر به کاهش سایش در سطح دندانه‌ها می‌شود. بکارگیری ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، عمر چرخنده‌ها را تا ۲/۵ برابر، در مقایسه با پلی آمید خالص، افزایش داد. افزودن بیش از ۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به افزایش مقدار سایش و حرارت و هم چنین کاهش عمر چرخنده‌ها شد.

## سپاسگزاری و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری آقایان مهندس امیر باقری و حجت مجیدی برای ساخت قالب و تجهیزات آزمون چرخنده صمیمانه تشکر نمایند.

## References:

- 1- R. Senthilvelan, "Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and Glass fiber reinforced Nylon6 spur gears", Materials and Design, Vol. 28, pp. 765–772, 2007.
- 2- H. Imrek, "Performance improvement method for Nylon 6 spur gears" Tribology Internation, Vol. 42, pp. 503-510, 2009.
- 3- E. Alfredo, Selection of Polymeric Materials, USA, William Andrew, pp. 26-27, 2008.
- 4- F. Mend, H. Can, M. KemalKu, "Fatigue properties of polypropylene involute Rack gear reinforced with metallic springs", Materials and Design, Vol. 27, pp. 427–433, 2006.
- 5- M. Kohan, Nylon plastics handbook, Munich, Carl Hanser, pp. 9.32-9.43, 1995.
- 6- D.P.N. Vlasveld, J. Groenewold, H.E.N. Bersee, and S.J. Picken, "Moisture absorption in polyamide-6silicatenanocomposite and its influence on the mechanical properties", Polymer, Vol. 46, pp. 12567-12576, 2005.
- 7- DC. Evans, Polymer–fluid interaction in relation to wear. London: Mechanical Engineering Publication Ltd.; pp. 47–56, 1978.



شکل ۹ - مقایسه نتایج عمر برای چرخنده‌های با آمیخته‌های مختلف تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm

- 8- G. Srinath, "Sliding wear performance of polyamide6–clay nano composites in water", *Composites Science and Technology*, Vol 67, pp. 399-405, 2007.
- ۹- م. مطلبی، ح. اورنگ، ک. شلش نژاد، "مقایسه خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های پلی آمید ۶ - کربنات کلسیم و پلی آمید ۶ - سیلیکا"، یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه تبریز، مهر ۱۳۸۹.
- ۱۰- س. منتخبی، اثر افزودن نانو ذرات معدنی بر خواص مکانیکی آلیاژ PA6/PP، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مکانیک، گروه ساخت و تولید، شهریور ۱۳۹۰.
- 11- Kusmono. M, Ishak ,Chow,T. Takeichi, and Rochmadi, "Enhancement of properties of PA6/PP nano composites via organic modification and compatibilization", *Express Polymer Letters*, Vol. 2, No .9, pp. 655664, 2008.
- 12- B. Suresha, B.N. RaviKumar, M. Venkataramareddy, T. Jayaraju. "Role of micro/nano fillers on mechanical and tribological properties of polyamide66/polypropylene composites", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 311993, 2010.
- 13- M. Zhang, X.B. Wang, X.S. Fu, Y.Q. Xia, "Performance and anti-wear mechanism of CaCO3 nanoparticles as a green additive in poly-alpha-olefin", *Tribol*, Vol. 42, pp. 1029–1039, 2009.
- 14- N.A. Wright, and S.N. Kukureka, "Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears", *Wear*, Vol. 251, pp. 1567-1578, 2001.
- 15- K. Mao, "Friction and wear Behavior of acetal and nylon gears", *Wear*, Vol. 267, pp. 639-645. 2009.
- 16- E. Ashrafi,A. Nezami-Fard, K. Shelesh-Nezhad, "Experimental Study of Wear Behavior in Polyacetal(POM)/Clay Nanocomposite Gears". The 2ndInternational Conference on Composites: Dec. 27-30, Kish Island, Iran.2010.
- 17- Q.X. Zhang, "Crystallization and impact energy of polypropylene/CaCO3 nanocomposites with nonionic modifier", *Polymer*, Vol. 45, pp. 5985–5994, 2004
- 18- S. Kirupasankar, C. Gurunathan, R. Gnanamoorthy, "Transmission efficiency of polyamide nanocomposite spur gears", *Materials and Design*, Vol. 12, pp. 0261-3069, 2012.
- 19- A. Ayman, "Friction and Wear of Polymer Composites Filled by Nano-Particles", *World Journal of Nano Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 32-39, 2012.
- 20- D. Li Chang,a, Klaus Friedrich, "Enhancement effect of nanoparticles on the sliding wear of shortfiber-reinforced polymer composites: A critical discussion of wear mechanisms", *Tribology International*, Vol. 43, pp. 2355–2364, 2010.
- 21- L. Chang, "On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites", *Composites Science and Technology*" Vol. 66, pp. 3188–3198, 2006.
- 22- I. Kemal, A. Whittle, R. Burford, T. Vodenitcharova, M. Hoffman, "Toughening of unmodified polyvinylchloride through the addition of nanoparticulate calcium carbonate", *Polymer*, Vol. 50, pp. 4066-4079, 2009.
- 23- T.D. Lam, T.V. Hoang, D.T. Quang, and J.S. Kim, "Effect of nanosized and

surface-modified precipitated calcium carbonate on properties of CaCO<sub>3</sub>/polypropylene nanocomposites", Materials Science and Engineering, Vol. 501, pp. 87-93, 2009.

approach. Chichester, John Wiley and Sons, 2000.

28- J. Tripathi D. Practical, Guide to Polypropylene. UK, Rapra Technology Limited, 2002.

۲۴- ن. بازویندی، س.م. زبرجد، س.ع. سجادی، "مطالعه ی مقاومت خراشی پلی اتیلن و کامپوزیت تقویت شده ان با نانو ذرات کربنات کلسیم"، مجله مواد نوین، جلد ۴، شماره ۲، صفحه ۷۹، زمستان ۱۳۹۲.

۲۵- ز. شکوری، "ارزیابی ریزساختار نانوکامپوزیت کوپلیمر (اکرینولیتریل - بوتادین) تقویت شده بوسیله نانو کربنات کلسیم با استفاده از آزمون نفوذ پذیری"، مجله مواد نوین، جلد ۶، شماره ۲، صفحه ۲۹، زمستان ۱۳۹۴.

۲۶- س. صاحبیان سقی، س.م. زبرجد، ا. لاتزری، "تاثیر همزمان عملیات سطحی و امواج آلتراسون بر توزیع پذیری نانو لوله های کربنی در زمینه پلی اتیلن"، مجله مواد نوین، جلد ۵، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۳.

27- J. Scheirs, Compositional and failure analysis of polymers, Apractical

