



## بررسی تاثیر نانوذرات کربنات کلسیم و سازگارکننده بر زبری سطح و مقاومت خراش سطحی پلی آمید ۶

امیرحسین دائی سرخابی<sup>\*</sup>، غلامحسین امجدی

<sup>۱</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷  
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۲/۰۹

### کلمات کلیدی:

نانوکامپوزیت  
نانوذرات کربنات کلسیم  
زبری سطح  
مقاومت خراش  
پلی آمید ۶

**خلاصه:** با توجه به کاربرد گسترده پلی آمیدها در صنایع مختلف و لزوم دست یافتن به مقاومت بالا در مقابل خراش‌های سطحی و زبری سطح مطلوب، در این مقاله، به مطالعه زبری سطح و مقاومت خراش سطحی، نمونه‌های نانوکامپوزیت پلی آمید ۶ تقویت شده با نانوذرات کربنات کلسیم و پلی آمید پیوند خورده با مالئیک انیدرید به عنوان ماده سازگارکننده، پرداخته شده است. در این راستا، اجزای نمونه‌های نانوکامپوزیتی با قسمت‌های وزنی مختلف نانوذرات کربنات کلسیم با دستگاه اکسترودر دوپیچه مخلوط گردیده و با روش قالب‌گیری تزریقی اقدام به آماده‌سازی نمونه‌ها شده است. برای انجام آزمون خراش از دستگاه نانو سختی‌سنج کوپل شده به میکروسکوپ نیروی اتمی که دارای ابزار آزمون نانومکانیکی مجهز به یک نوع نوک فرورونده می‌باشد، استفاده شده است. بمنظور مطالعه زبری و مقاومت خراش سطحی نمونه‌ها تاثیر سه متغیر، نیروی عمودی خراش، قسمت وزنی فاز تقویت‌کننده و ماده سازگارکننده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن ذرات نانوکربنات کلسیم از یک قسمت وزنی به سه قسمت وزنی، مقدار زبری را تقریباً تا دو برابر افزایش داده و همچنین افزودن یک قسمت وزنی سازگارکننده زبری سطح را در حدود ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.

### ۱- مقدمه

پلیمرها مواد پرکاربردی در ساخت قطعات بکار رفته در صنایع مختلف می‌باشند که یکی از ویژگی آن‌ها کیفیت سطحی بالاست. خش‌ها، بدون در نظر گرفتن اندازه و طول آن‌ها، ممکن است تا حد زیادی ظاهر قطعات پلیمری را ناخوشایند نماید لذا امروزه، روند ایجاد این خش‌ها و نحوه اندازه گرفتن و روش‌های مختلف کاهش آن‌ها مورد بررسی محققان قرار گرفته است [۱]. از آنجایی که پلیمرها عموماً جزء مواد نرم می‌باشند، به راحتی خراشیده شده که این امر منجر به تمرکز تنش در زیرسطحی از پلیمرها شده که به نوبه خود منجر به شکست می‌شود [۲]. مقاومت در برابر خراش پلیمرها، به ماهیت خود پلیمر و پارامترهایی مانند بار اعمال شده، شکل، اندازه و ماهیت فرورونده، زاویه فرورونده، سرعت خراش، استفاده از روانکاری سطحی و غیره بستگی دارد [۳]. برای کاربرد موثر پلیمرها به عنوان مواد مهندسی، اغلب نیاز به درک و کنترل بهتر خواص مکانیکی آن‌ها در سطح می‌باشد.

یکی از پلیمرهایی که در صنعت خودروسازی و صنایع وابسته بکار می‌روند، پلی آمیدها هستند که علی‌رغم کاربرد فراوان، مقاومت کم در مقابل خراش همواره به عنوان عیبی برای این مواد مطرح می‌باشد. در این راستا و همچنین به منظور بهبود رفتار مکانیکی پلی آمیدها

مطالعات گسترده‌ای در ادبیات فن انجام شده که عمدتاً می‌توان به تولید کامپوزیت، با افزودن فاز سرامیکی اشاره نمود [۱]. سرنیاس و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۵ نشان دادند که افزودن نانو ذرات رس موجب بهبود خواص کششی و سایشی پلی آمیدها می‌شود. نتایج آزمون خراشی که توسط سین‌ها و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۹، بر روی مواد مرکب پلی آمید ۶ تقویت‌شده با درصد وزن‌های مختلف نانو رس انجام شده، نشان می‌دهد که درصد وزن نانو رس به طور قابل توجهی خواص کامپوزیت‌های پلی آمید ۶ را تحت تاثیر قرار داده و افزایش درصد وزنی نانو رس منجر به افزایش سختی و کاهش عمق خراش می‌شود. موهده و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸ مقاومت ضربه‌ای پلی آمید ۶ در حضور نانو ذرات رس را بررسی نموده و نشان دادند که وجود نانو ذرات رس در زمینه، منجر به افت مقاومت ضربه ای می‌شود. استفاده از نانو لوله های کربنی در پلی آمید ۶ بمنظور مطالعه رفتار سایشی توسط لویس و همکارانش در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که وجود تقویت‌کننده باعث کاهش عمق نفوذ سایش می‌شود. همچنین وجود نانو لوله‌های کربنی با افزایش سختی، منجر به کاهش عمق نفوذ و پهنای خراش شده و مدول یانگ را تا ۲۷ درصد افزایش می‌دهد [۷]. همچنین بررسی رفتار خراش بر روی انواع پلی آمیدها نشان می‌دهد که عرض خراش، نیروی اصطکاک، عمق نفوذ و اندازه منطقه تماس با

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amirsorkhabi@iaut.ac.ir

سانتی گراد که با ۴/۵٪ اسید استئاریک پوشش داده شده، به عنوان فاز تقویت کننده و پلی آمید پیوند خورده با مالئیک انیدرید<sup>۳</sup> با ۸/۰ تا ۱/۳ درصد مالئیک انیدرید به عنوان سازگار کننده می باشد. این مواد ابتدا در دستگاه آون به مدت ۸ ساعت با درجه حرارت ۸۰°C رطوبت گیری شده و بعد از مشخص نمودن مقادیر درصد وزنی هر نمونه، ابتدا به صورت مکانیکی و سپس به روش ذوبی و با استفاده از اکسترودر دو پیچی با قطر پیچ ۲۵ میلی متر و سرعت دورانی مارپیچ های اکسترودر معادل ۲۵۰ rpm و در دمای ۲۶۰°C، مخلوط شده و رشته های خروجی از اکسترودر توسط دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل شدند. برای تولید نمونه آزمون خراش، گرانول ها مجدداً توسط دستگاه آون به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۸۰°C رطوبت گیری شده و عملیات تزریق در دمای ۲۴۰°C و فشار ۱۲۰ بار انجام شده است. معرفی نمونه ها نماد اختصاری بر اساس تعداد واحد وزنی اجزای تشکیل دهنده که در این تحقیق بکار رفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

**جدول ۱:** نمونه ها بر اساس تعداد واحد وزنی اجزای تشکیل دهنده

**Table 1: Samples based on the number of weight units of components**

شماره نمونه	نماد اختصاری نمونه	پلی آمید <sup>۶</sup> (wt%)	نانو ذرات کربنات کلسیم (phr*)	پلی آمید پیوند خورده با مالئیک انیدرید (phr*)
۱	PA6	۱۰۰	۰	۰
۲	PA6/1C	۱۰۰	۱	۰
۳	PA6/1C/1M	۱۰۰	۱	۱
۴	PA6/3C/1M	۱۰۰	۳	۱
۵	PA6/5C/1M	۱۰۰	۵	۱

\* phr: part per hundred resin

در این تحقیق برای انجام آزمون خراش از دستگاه نانوسختی سنج با نام تجاری تریبواسکوپ<sup>۴</sup> شرکت هیسیترون<sup>۵</sup> آمریکا، دارای ابزار آزمون نانومکانیکی مجهز به یک نوع نوک فرورونده برکویچ<sup>۶</sup> از جنس الماس، طبق استاندارد ایزو ۱۴۵۷۷ استفاده شده و همچنین برای تصویربرداری از نمونه ها از میکروسکوپ نیروی اتمی کوپل شده به دستگاه نانوسختی سنج استفاده شده است. به منظور مشاهده تاثیر نانو ذرات کلسیم و سازگار کننده مالئیک انیدرید بر کیفیت سطح نانو کامپوزیت پلی آمید<sup>۶</sup> تصاویر حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی توسط نرم افزار نانو اسکوپ<sup>۷</sup> تحلیل شده و میزان زبری سطوح در همه نمونه ها استخراج شده است.

- 3 PA-g-MAH
- 4 Tribo Scope
- 5 Hysitron
- 6 Berkovich
- 7 Nanoscop II

اعمال بار تقریباً بصورت خطی افزایش یافته و در این میان پلی آمیدهایی که انعطاف پذیری بیشتری دارند مقاومت خراش کمتری دارند [۳]. نوازده و همکاران [۸]، با بررسی تاثیر نانو ذرات کربنات کلسیم روی پلی آمید ۶ نشان دادند که مقاومت سایشی در حضور نانو ذرات کربنات کلسیم افزایش یافته و مقدار جذب آب کاهش می یابد. بررسی آزمون خراش نانوکامپوزیت پایه پلی اتیلن تقویت شده با نانو ذرات کربنات کلسیم با درصد های وزنی متفاوت توسط بازبندی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ انجام شد. تاثیر سه متغیر نیروی عمودی خراش، سرعت خراش و درصد فاز تقویت کننده، بر رفتار خراش فیلم پلی اتیلن، نشان داد که با افزایش درصد نانو ذرات کربنات کلسیم به زمینه پلی اتیلن، پهنای خراش برای تمام نیروهای عمودی و سرعت های خراش، کاهش می یابد. همچنین نتایج حاصل از بررسی رفتار خراش پلی اتیلن سنگین و تقویت شده با ۵ تا ۲۰ درصد میکرو ذرات کربنات کلسیم توسط تانیروس و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۵، به روشنی نشان می دهد که تقویت کردن پلی اتیلن چگالی زیاد با کربنات کلسیم، تاثیر شدیدی روی فرآیند تغییر شکل خراش با خراشنده هافمن داشته و با افزایش کربنات کلسیم، پهنای عمق خراش کمتر و تشکیل ترک در لبه های شیار خراش و همچنین زبری سطح خراش کاهش می یابد. رانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۵ با انجام مطالعه ای نشان دادند که افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم بر پلی بوتیلن سبب سریع شدن کریستال سازی و مقاومت دمایی خوب شده و افزودن نانو ذرات تا ۳٪ وزنی موجب افزایش قابل توجهی در خواص دینامیکی مکانیکی می شود. در تحقیقی دیگر محسن زاده و همکاران [۱۲] به مطالعه تاثیر نانو ذرات کربنات کلسیم بر رفتار سایشی چرخنده های نانوکامپوزیتی بر پایه آمیخته پلی آمید<sup>۶</sup> و پلی پروپیلن کلسیم پرداخته و نشان دادند که افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم تا پنج قسمت وزنی منجر به کاهش سایش در چرخنده ها می شود.

پیشینه تحقیق ارائه شده نشان می دهد که تحقیقات گسترده و مناسبی در زمینه افزودن نانو ذرات مختلف بر روی انواع مواد پلیمری صورت گرفته است که در این میان سهم ماده پلی پروپیلن و نانو ذرات رس از همه بیشتر بوده است. لذا در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی تاثیر افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم با درصد های وزنی متفاوت بر سختی خراشی پلی آمید<sup>۶</sup> در حضور سازگار کننده و بدون آن پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش ها:

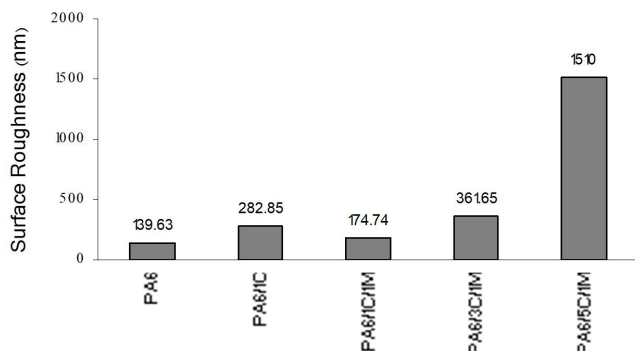
مواد بکار گرفته شده در تحقیق حاضر، پلی آمید<sup>۶</sup> به عنوان زمینه کامپوزیت، نانو ذرات کربنات کلسیم<sup>۲</sup> با چگالی ۲/۷۱ گرم بر سانتی متر مکعب و اندازه دانه های ۴۰ تا ۱۳۰ نانومتر با نقطه ذوب ۱۳۳۹ درجه

- 1 PA6
- 2 CaCo3

### ۳- آزمون‌ها، نتایج و بحث‌ها:

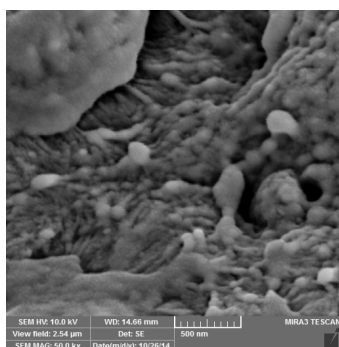
#### ۳-۱- زبری سطح:

همانطور که اشاره شد در این تحقیق برای استخراج زبری سطوح از نرم افزار نانو اسکوپ ۲ استفاده شده و برای تمامی نمونه‌ها این کار انجام پذیرفته است که به عنوان نمونه در شکل ۱ تصویر سه‌بعدی و میزان زبری برای نمونه PA/IC نشان داده شده است.

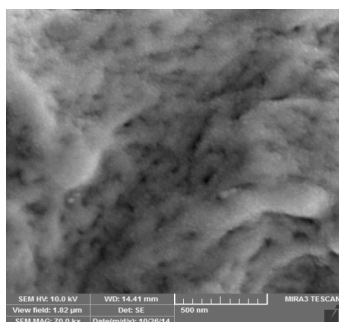


شکل ۲: زبری سطح نمونه‌ها

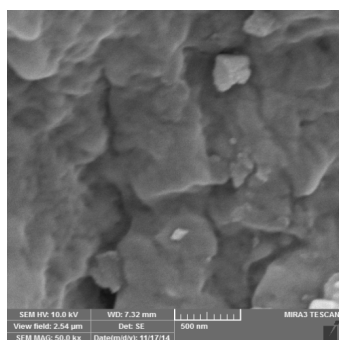
Fig2: Maximum relative height of different samples



الف



ب

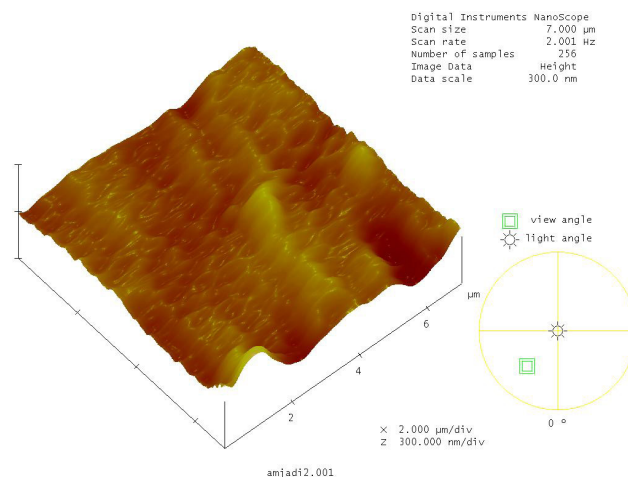


ج

شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف) برای نمونه PA6/IC

ب) برای نمونه PA6/IC/1M ج) برای نمونه PA6/5C/1M

Fig3: Image of scanning electron microscope a) PA/IC sample b) PA/IC/1M sample c) PA/5C/1M sample



شکل ۱: تصویر سه‌بعدی و زبری سطح برای نمونه PA/IC

Fig1: 3D image and surface roughness for PA/IC sample

بررسی نتایج زبری سطح حاصل از نمونه‌های مختلف با قسمت‌های وزنی متفاوت نانوکربنات کلسیم که در نمودار شکل ۲ ارائه شده، بر اساس Ra بوده و نشان می‌دهد که کامپوزیت پلی‌آمید ۶ با یک قسمت وزنی نانوکربنات کلسیم و یک قسمت وزنی سازگارکننده مالئیک انیدرید (PA6/IC/1M)، زبری سطح مطلوب‌تری نسبت به بقیه نمونه‌ها داشته و با افزایش قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم مقدار زبری سطح نیز افزایش می‌یابد که علت این افزایش زبری را می‌توان این چنین بیان نمود که افزودنی‌های معدنی به دلیل عوامل متعددی از قبیل ابعاد، تحرک، ویژگی‌های گروه‌های انتهایی، ترکیب نسبی و ساختار مولکولی قادر به مهاجرت به سطح پلیمرها بوده و منجر به افزایش زبری سطح می‌شود [۱۳]. مشکل عمده در تمام نانوکامپوزیت‌های حاوی نانو ذرات، متراکم شدن ذرات در سطح به دلیل سطح مخصوص بالای آنهاست. این تجمع ذرات نانو در سطح پلیمر در نانو ذرات رس و سیلیکا نیز مشاهده شده است [۱۳ و ۱۴]. شکل‌های ۳-الف، ۳-ب و ۳-ج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را بترتیب برای نمونه‌های شماره ۲، ۳ و ۵ نشان می‌دهند. با توجه به این که کربنات کلسیم ماهیت قطبی دارد و پلی‌آمید ۶ مولکولی غیرقطبی است، پس در کامپوزیت حاوی این دو ماده، پیوند برقرار شده بین آنها، قوی نبوده و احتمال جدایش در فصل مشترک آنها در حین بارگذاری وجود دارد.

با زمینه، پیوند برقرار سازند، این امر موجب افزایش مدول الاستیک شده که در بهبود مقاومت خراشی کامپوزیت اثر مثبت دارد. در تحقیق حاضر، آزمون خراش در همه نمونه‌ها با نیروهای عمودی ۱۰۰ میکرونیوتن و ۱۵۰ میکرونیوتن در ۳۰ ثانیه در طول ۴ میکرومتر با نوک فرورونده برکویچ از جنس الماس انجام شده است و جهت کاهش خطا، حداقل ۳ خراش در قسمت‌های مختلف نمونه ایجاد شده است. عملکرد دستگاه طوری می‌باشد که نوک فرورونده در روی قطعه خراش ایجاد می‌کند و به همراه آن میکروسکوپ نیروی اتمی تصویربرداری می‌نماید. در این تحقیق برای مقایسه مقاومت در مقابل خراش نمونه‌های مختلف از پارامترهای ضریب اصطکاک، ارتفاع نسبی و عمق خراش استفاده شده است.

### ۳-۲-۱- اثر ضریب اصطکاک:

در آزمون خراش، براساس استاندارد نسبت نیروی جانبی خراش به نیروی عمودی خراش را ضریب اصطکاک گویند که در این تحقیق برای بدست آوردن این مقدار از دستگاه نانو سختی سنج و نرم‌افزار تریبواسکوپ استفاده شده است. ضریب اصطکاک در نمونه‌های مختلف، دارای مقادیر متفاوتی است که در دو نیروی عمودی ۱۰۰ میکرونیوتن و ۱۵۰ میکرونیوتن استخراج و در جدول ۲ ارائه شده است. با بررسی اعداد موجود در این جدول می‌توان دریافت که با افزایش قسمت تقویت‌کننده نانوکربنات کلسیم، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد، همچنین در نمونه ۴ و نمونه ۵ برای ضریب اصطکاک با نیروهای مختلف مقدار مشخصی بدست نمی‌آید که نشان از تاثیر منفی قسمت‌های وزنی تقویت‌کننده نانو ذرات کربنات کلسیم دارد. همچنین با افزایش نیروی عمودی از ۱۰۰ میکرونیوتن به ۱۵۰ میکرونیوتن، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

**جدول ۲:** ضریب اصطکاک نمونه‌های مختلف در نیروی عمودی ۱۰۰ μN و ۱۵۰ μN  
**Table 2: Coefficient of friction for different samples with two vertical forces of 100 μN and 150 μN**

ضریب اصطکاک		شماره نمونه	نماد اختصاری
با نیروی ۱۰۰ μN	با نیروی ۱۵۰ μN		
۰/۷۵	۰/۷۰	۱	PA <sup>6</sup>
۰/۸۵	۰/۸۰	۲	PA6/1C
۰/۹۲	۰/۸۵	۳	PA6/1C/1M
-	۰/۹۰	۴	PA6/3C/1M
-	-	۵	PA6/5C/1M

### ۳-۲-۲- ارتفاع نسبی:

ارتفاع نسبی یا ارتفاع پله به ارتفاع پایین تا بلندی قله در روی سطح گفته می‌شود که در این تحقیق برای بدست آوردن آن در نمونه‌های

از طرفی به دلیل ابعاد کوچک نانو ذرات نسبت به میکرو ذرات، مساحت سطح بزرگی برای ذرات وجود دارد که انرژی سطحی بزرگی به سیستم اعمال کنند که برای کاهش این انرژی ذرات تمایل به آگلومره شدن دارند. در نتیجه برای کاهش این اثرات از ماده‌ای که مولکول آن از یک سو قطبی و از سوی دیگر غیرقطبی است، برای پوشش سطح نانو ذرات کربنات کلسیم استفاده می‌شود تا انرژی سطحی نانو ذرات را کاهش داده و پیوند قوی‌تری بین ذره و زمینه ایجاد کند [۱۵ و ۱۶]. لذا در تحقیق حاضر همانطور که قبلاً اشاره شد، از نانو کربنات کلسیمی که با اسید استتاریک عملیات سطحی شده، برای تقویت کردن زمینه پلی‌آمید استفاده شده است و افزودن سازگار کننده پلی‌آمید پیوند خورده با مالئیک انیدرید، سبب بهبود کیفیت سطح می‌شود که این امر در مقایسه دو شکل ۳-الف و ۳-ب مشهود بوده و ناشی از تاثیر مثبت نقش سازگار کننده است که قابلیت پخش نانوکربنات کلسیم در زمینه پلیمری را بهبود می‌بخشد و ساختار همگنی به وجود می‌آورد. از مقایسه شکل‌های ۳-ب و ۳-ج می‌توان گفت که با افزایش غلظت نانو ذرات کربنات کلسیم امکان پراکندگی یکنواخت ذرات در پلیمر کاهش یافته و ذرات فضای کمتری جهت توزیع یکنواخت در بستر پلیمر دارند و کلوخه می‌شوند. در شکل ۳-ج که شامل پنج قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم این موضوع کاملاً مشهود بوده که به استناد توضیحات قبلی، وجود سازگار کننده و روکش اسید استتاریک بر سطح نانو ذرات، به طور چشم‌گیری انرژی آزاد سطح پرکننده و در نتیجه برهمکنش ذره-ذره را کاهش داده که این امر منجر به پراکندگی بهتر نانو ذرات در زمینه و کاهش کلوخه شدن آن‌ها می‌گردد. هر چند روکش‌دهی سطح، انرژی سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد اما به دلیل کوچکی ذرات و بزرگی سطح ویژه و در نتیجه بالا بودن تراز انرژی آزاد سطح، باز هم احتمال به هم چسبیدن ذرات و کلوخه شدن در درصد‌های بیشتر پرکننده وجود دارد [۱۷ و ۱۸]. از این رو در نمونه حاوی پنج قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم (شکل ۳-ج)، پراکندگی ذرات کمی کاهش یافته و کلوخه شدن اندکی مشاهده می‌شود.

### ۳-۲-۳- خراش:

در حالت کلی، سختی خراشی مواد با حضور فاز تقویت‌کننده، افزایش می‌یابد که موجب کاهش نفوذ خراشنده به سطح ماده می‌شود. بررسی نتایج تحقیقات موجود در ادبیات فن بر روی کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که صرفاً این پارامتر برای بهبود رفتار خراش کامپوزیت‌ها کافی نبوده و چگونگی پیوند ذرات پرکننده و زمینه، عاملی است که تاثیر مثبت افزایش سختی خراشی ناشی از حضور فاز تقویت‌کننده در زمینه پلیمری را تعیین می‌کند. لذا اگر ذرات تقویت‌کننده به خوبی

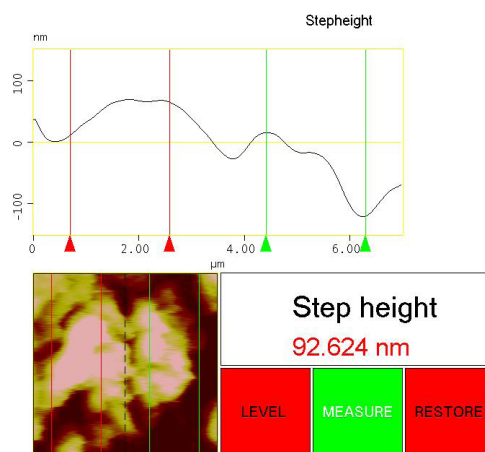
خراش در دو نیروی عمودی ۱۰۰ میکرونیوتن و ۱۵۰ میکرونیوتن برای نمونه‌های مختلف این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجائی که مناسب‌ترین عمق، کمترین مقدار بوده و نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در مقابل خراش می‌باشد، مقادیر بدست آمده برای بیشترین عمق خراش در نمونه‌های مختلف گویای این موضوع است که نمونه شماره ۳ (پلی‌آمید ۶ با یک قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم و یک قسمت وزنی مالئیک انیدرید) از لحاظ مقاومت در مقابل خراش نسبت به سایر نمونه‌ها بهتر می‌باشد. همچنین با افزایش نیروی عمودی از ۱۰۰ میکرونیوتن به ۱۵۰ میکرونیوتن، عمق خراش افزایش و به عبارت دیگر سختی خراش کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان به افزایش تنش کششی نسبت داد. هرچه نیروی عمودی بیشتر شود، این تنش افزایش بیشتری می‌یابد. باتوجه به حضور نانو ذرات در زمینه، تنش بیشتر منجر به افزایش تمرکز تنش در نواحی فصل مشترک و احتمالاً جدایش در این نواحی شده و همین پدیده عاملی برای افزایش تغییر شکل مومسان در نیروهای عمودی بزرگتر می‌شود که کاهش در سختی خراش نانوکامپوزیت‌ها را بدنبال دارد [۹ و ۱۹].

جدول ۳: بیشترین عمق خراش در نیروی عمودی ۱۰۰  $\mu\text{N}$  و ۱۵۰  $\mu\text{N}$   
**Table3: Maximum scratch depth for different samples with two vertical forces of 100  $\mu\text{N}$  and 150  $\mu\text{N}$ .**

ضریب اصطکاک		شماره نمونه	نماد اختصاری
با نیروی ۱۰۰ $\mu\text{N}$	با نیروی ۱۵۰ $\mu\text{N}$		
۱۷۶/۰۴	۳۴۰/۵۱	۱	PA6
۲۹۹/۲۹	۶۸۳/۵۳	۲	PA6/1C
۱۶۸/۳۷	۳۶۶/۰۳	۳	PA6/1C/1M
۳۴۴/۸۲	۶۹۱/۹۰	۴	PA6/3C/1M
۱۱۳۱	۲۹۷۴	۵	PA6/5C/1M

با توجه به این که افزودن سازگارکننده به ذرات کربنات کلسیم موجب کاهش ذرات آگلومره شده، می‌شود ولی آن‌ها را کاملاً حذف نمی‌کند، پس پیوند بین نانو ذرات و زمینه، کاملاً ایده‌آل نیست. از اینرو می‌توان علت دیگری برای کاهش تقویت‌کنندگی در نیروهای عمودی بزرگتر بیان کرد و آن را به جدایش فصل مشترک ذره-پلیمر و البته تمرکز تنش بیشتر در اطراف ذرات آگلومره شده، نسبت داد. در نیروهای عمودی بزرگتر، تنش‌های اعمال شده، ناشی از حرکت خراشنده، بزرگتر می‌شوند [۹] که موجب افزایش تمرکز تنش در اطراف ذرات و نتیجتاً جدایش در فصل مشترک ذره-پلیمر می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وجود یک پیوند ایده‌آل بین نانو ذرات و زمینه پلیمری، انتقال تنش موثر از سطح به زیر سطح، به خوبی انجام شده و در نتیجه تنش کششی سطح کاهش می‌یابد و از تغییر شکل خراش با ابعاد بزرگتر در سطح و همچنین ایجاد جدایش

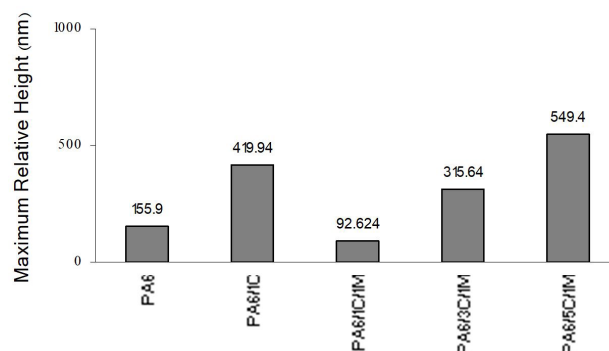
مختلف از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و نرم‌افزار نانو اسکوپ ۲ استفاده شده که به عنوان مثال، برای نمونه شماره ۳ در شکل ۴ ارائه شده که بیشترین ارتفاع نسبی را ۹۲/۶۲۴ نانومتر نشان می‌دهد.



شکل ۴: تصویر بیشترین ارتفاع نسبی برای نمونه PA/1C/1M با نرم افزار نانو اسکوپ ۲

**Fig4: Maximum relative height image for PA / 1C / 1M sample with Nano Scope II software**

مقادیر بیشترین ارتفاع نسبی نمونه‌های مختلف تحقیق حاضر در نمودار شکل ۵ ارائه شده است.



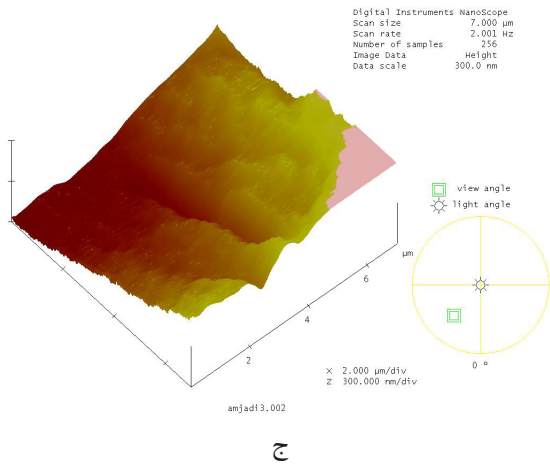
شکل ۵: بیشترین ارتفاع نسبی نمونه‌ها

**Fig5: Maximum relative height of different samples**

همانطور که مشاهده می‌شود، ارتفاع نسبی با افزایش نانو ذرات، افزایش یافته و مقاومت خراش کاهش می‌یابد بجز در نمونه شماره ۳ که این ارتفاع کاهش یافته در بقیه نمونه‌ها ارتفاع نسبی روند افزایشی داشته، یعنی اینکه وجود نانو ذرات تا یک قسمت وزنی تاثیر مثبت در مقاومت خراش داشته و بیش از آن تاثیر منفی دارد.

### ۳-۲-۳- عمق خراش:

عمق خراش نیز مانند ارتفاع نسبی از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و نرم افزار نانو اسکوپ ۲ استخراج می‌شود. مقادیر بیشترین عمق



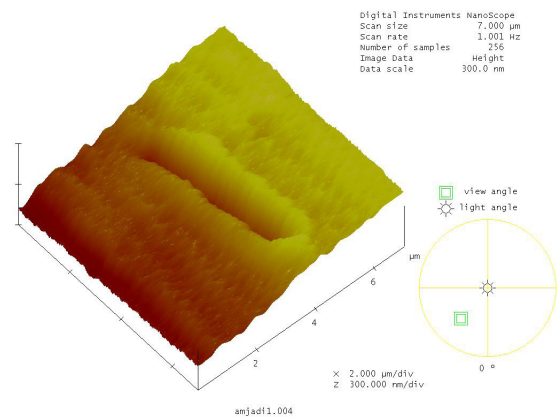
ج

**شکل ۶:** تصاویر سه بعدی بیشترین عمق خراش، الف) برای نمونه PA 6  
ب) برای نمونه PA6/1C/1M (ج) PA6/1C/1M  
**Fig6: 3D images of maximum scratch depth a) PA sample b)**  
**PA/1C sample c) PA/1C/1M sample**

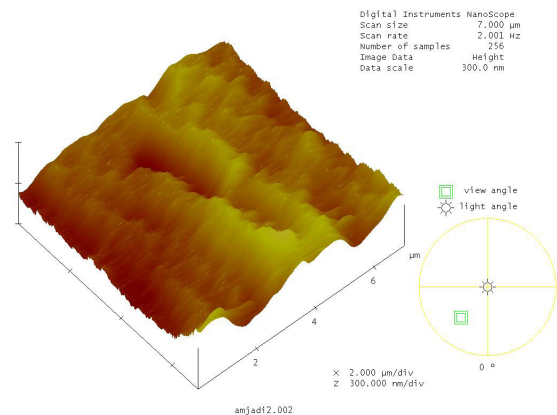
#### ۴- نتیجه گیری:

- افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم در کامپوزیت به دلیل تجمع ذرات در سطح، باعث افزایش زبری سطح می شود بطوری که با افزایش کربنات کلسیم از یک قسمت وزنی به سه قسمت وزنی، مقدار زبری تقریباً دو برابر افزایش می یابد.
- افزودن سازگارکننده به کامپوزیت باعث پراکندگی یکنواخت ذرات و کاهش قابل توجه زبری سطح می شود بطوری که در پلی آمید ۶ با یک قسمت وزنی کربنات کلسیم، افزودن یک قسمت وزنی مالئیک انیدرید زبری سطح را در حدود ۴۰ درصد کاهش می دهد.
- در بررسی ضریب اصطکاک، ارتفاع نسبی و عمق خراش بعنوان پارامترهای مقاومت در مقابل خراش مشخص شد که افزودن یک قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم به پلی آمید ۶ با پراکندگی همگن در زمینه، ضریب اصطکاک را ۱۰ درصد، بیشترین ارتفاع نسبی را در حدود ۲/۵ برابر و عمق خراش را در حدود ۲ برابر افزایش می یابد ولی در نمونه های با سه و پنج قسمت وزنی، بخاطر تجمع ذرات و پدیده آگلومره شدن، نمی توان به نتیجه مشابهی دست یافت. همچنین افزودن یک قسمت وزنی مالئیک انیدرید بعنوان سازگارکننده و یک قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم به پلی آمید ۶، ضریب اصطکاک را ۵ درصد افزایش ولی بیشترین ارتفاع نسبی و عمق خراش را شدیداً کاهش می دهد.
- افزایش نیروی عمودی در کلیه نمونه ها باعث کاهش مقاومت خراش و افزایش ارتفاع نسبی و عمق خراش می شود.
- شکل خراش با افزایش قسمت وزنی نانو ذرات از حالت مومسان یکنواخت به حالت شخم زدن تغییر می کند.

در فصل مشترک ذره-زمینه و ترک ناشی از جدایش جلوگیری می شود. شکل ۶ شامل تصاویر سه بعدی بیشترین عمق خراش (شکل خراش) برای نمونه های شماره ۱ تا ۳ می باشد. از بررسی تصاویر الف و ب شکل ۶ می توان نتیجه گرفت که افزایش نانو ذرات کربنات کلسیم، شکل خراش را از حالت انعطاف پذیری مومسان به حالت شخم زدن تبدیل می کند بطوریکه شکل خراش ها در پلی آمید ۶ خالص کاملاً یکنواخت بوده (شکل ۶-الف) ولی با افزایش قسمت های نانو ذرات این یکنواختی خراش از بین می رود (شکل ۶-ب). همچنین مقایسه تصاویر ب و ج شکل ۶ نشان می دهد که استفاده از سازگارکننده عدم یکنواختی خراش را بهبود می بخشد که علت عدم یکنواختی شکل خراش در نمونه ای که از سازگارکننده استفاده نشده است را می توان به تجمع ذرات کربنات کلسیم در زمینه نسبت داد. در انتها به طور خلاصه می توان گفت که اگرچه افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم، عمق خراش را کم می کند و از این جهت مقاومت خراش ماده را افزایش می دهد، ولی تاثیر مثبت این ذرات در نیروهای خراش بزرگ کم رنگتر می شود. همچنین در نیروهای عمودی بزرگ، مقدار آسیب ناشی از خراش شدیدتر است که به اعمال تنش کششی بزرگ و عدم وجود فصل مشترک کاملاً یکنواخت، بین نانو ذرات کربنات کلسیم و پلی آمید ۶ مرتبط است.



الف



ب

with nanoparticles of calcium carbonate, Novin, Vol. 2, pp. 79-92, 2013. (In Persian)

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله خود وظیفه خود می‌دانند که از مسئولین و کارشناسان محترم مراکز آزمایشگاهی و پژوهشی دانشگاه‌های امیرکبیر، علم و صنعت و آزاد اسلامی واحد تبریز و همچنین شرکت کیمیا فروز برای کمک‌های که در راستای اجرای این تحقیق انجام دادند تشکر نمایند. همچنین حمایت مالی ستاد نانو در انجام این تحقیق شایان سپاس و قدردانی می‌باشد.

## منابع و مراجع

- [10] M. Tanniru, R. D. K. Misra, K. Berbrand, D. Murphy, The determining role of calcium carbonate on surface deformation during scratching of calcium carbonate-reinforced polyethylene composites, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 404, pp. 208-220, 2005.
- [11] Y. Rong, Z. Wei, Zh. Hai, Z. Gui, T. Zhi, Thermal behavior, dynamic mechanical properties of PBS/CaCo<sub>3</sub> Nano, Polymer Testing. Vol. 42, pp. 160-167, 2015.
- [12] R. Mohsenzadeh, K. Sheleshnejad, M. Soltanzadeh Firoz Salari, S. Montakhabi, Influence of calcium carbonate nanoparticles on wear behavior of PA6 / PP / Nano CaCo<sub>3</sub> nanocomposites. New Materials, Vol. 6, No.4, pp. 95-105, 2016. (In Persian)
- [13] M. Parvinezadeh, S. Moradian, A. Rashidi, M. E. Yazdanshenas, Surface characterization of polyethylene terephthalate/silica nanocomposites, Applied Surface Science. Vol. 256, pp. 2792-2802, 2010.
- [14] M. Parvinezadeh, S. Moradian, A. Rashidi, M. E. Yazdanshenas, Effect of the Addition of Modified Nanoclays on the Surface Properties of the Resultant Polyethylene Terephthalate/Clay Nanocomposites, Polymer-plastics technology and engineering, Vol. 49, pp. 874-884, 2010.
- [15] H. R. Dennis, D. L. Hunter, D. Chang, S. Kim, J. L. White, J.W. Cho, D. R. Paul, Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay- based nanocomposites. Polymer, Vol. 42, pp. 9513-9522, 2001.
- [16] Rakesh K. Gupta, Elliot Kennel, Polymer nanocomposites handbook, CRC Press, 2010.
- [17] G. Pritchard, Plastics Adittives. UK, Rapra Technology Limited. 4,43, 2005.
- [18] K. Gahr, Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam. Elsevier. pp. 80-105, 1987.
- [19] S. Sahebzan, S. M. Zebarjad, S. A. Sajjadi, Z. Sherafat, and A. Lazzeri, Effect of Both Uncoated and Coated Calcium Carbonate on Fracture Toughness of HDPE/ CaCO<sub>3</sub> Nanocomposites, J. App. Poly. Sci., Vol. 104, pp. 3688-3694, 2007.
- [1] R. L. Browning, H. Jiang, H. -J. Sue, Scratch behavior of polymeric materials, Tribology and Interface Engineering Series, Vol. 55, pp. 354-373, 2008.
- [2] B. J. Briscoe, P. D. Evans, E. Pelillo, S. K. Sinha, "Scratching maps for polymers", Wear, Vol. 200, pp. 137-147, 1996.
- [3] J. John Rajesh, Jayashree Bijwe, Investigations on scratch behaviour of various polyamides, Wear, Vol. 259, pp. 661-668, 2005.
- [4] Srinath, G. Nanamoorthy, R. Sliding wear performance of Polyamid6-clay nano composites in water, composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 399-405, 2007.
- [5] S. K. Sinha, T. Song, X. Wan, Y. Tong, Scratch and normal hardness characteristics of polyamide 6/nano-clay composite, Wear, Vol. 266, pp. 814-821, 2009.
- [6] Mohd. I, Kusmono, Chow, W. S. Takeichi, T. Ro-chmadi, Effect of organoclay modification on themechanical, morphology, and thermal properties of injectionmolded polyamide 6 / polypropylene / montmorillonite Nanocomposites, Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting (PPS-24), Salerno (Italy) June 15-19, 2008.
- [7] Luis F. Giraldo, Witold Brostow, Eric Devaux, Betty L. Lopez, and Leon D. Perez. Scratch and Wear Resistance of Polyamide 6 Reinforced with Multiwall Carbon Nanotubes, Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 8, pp. 1-8, 2008.
- [8] A. Nozad. R. Mohsenzadeh. S. M. Nurani, Experimental Study on the Water Absorption and Tribological Properties Of PA6/CaCO<sub>3</sub> Nanocomposites, Mechanic modares, Vol. 5, pp. 114-118, 2014. (In Persian)
- [9] N. Bazubandi. S. M. Zabajad. S. A. Sajadi, The scratch resistance of polyethylene and composites reinforced

