

بررسی وابستگی نرخ سایش و اندازه ذرات سائیده‌شده آمیزه رویه تایرهای سواری و باری به زبری سطح ساینده رضوانه علی‌یاری^۱، علیرضا بنی‌اسد^۲، مهدی رزاقی کاشانی^{۱*}

۱ گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۱۴، تهران، ایران

۲ بخش آمیزه‌کاری، گروه صنعتی بارز، صندوق پستی ۳۷۱۱-۱۵۸۷۵، کرمان، ایران

آدرس ایمیل عهده‌دار مکاتبات: mehdi.razzaghi@modares.ac.ir*

شماره تلفن عهده‌دار مکاتبات: 021-82883336

چکیده

پیش‌بینی کمی سایش تایر یکی از چالش‌های صنعت تایر از دیدگاه پایداری و اقتصاد چرخشی است. مدل‌های تحلیلی و رایانه‌ای مورد استفاده بدین منظور نیازمند ارتباط اندازه و توزیع اندازه ذرات سائیده شده هر آمیزه به زبری سطوح ساینده است. در این مطالعه اثر زبری سطح بر نرخ سایش و اندازه ذرات سائیده‌شده سه آمیزه لاستیکی تجاری مربوط به تایرهای سواری و باری بررسی شده است. بدین منظور، چهار سنگ ساینده با زبری‌های مختلف انتخاب و آزمون‌های سایش توسط دستگاه اکرون تحت شرایط کنترل‌شده و یکسان انجام گرفت. ویژگی‌های سطوح با پروفایل‌متر لیزری و ذرات سائیده‌شده با میکروسکوپ نوری و نرم‌افزار ImageJ ارزیابی شدند. نتایج نشان داد با افزایش زبری سطح، نرخ سایش ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، درحالی‌که متوسط اندازه ذرات لاستیک سائیده شده به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد. اگرچه که متوسط اندازه ذرات به آمیزه لاستیکی بستگی دارد اما روند وابستگی آن به زبری سطح برای هر سه آمیزه یکسان بود. داده‌های حاصل می‌توانند به‌عنوان ورودی در توسعه مدل‌های نظری و عددی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آمیزه رویه تایر، سایش لاستیک، زبری سطح ساینده، ذرات سائیده‌شده لاستیکی

محور مقاله: پایداری و اقتصاد چرخشی

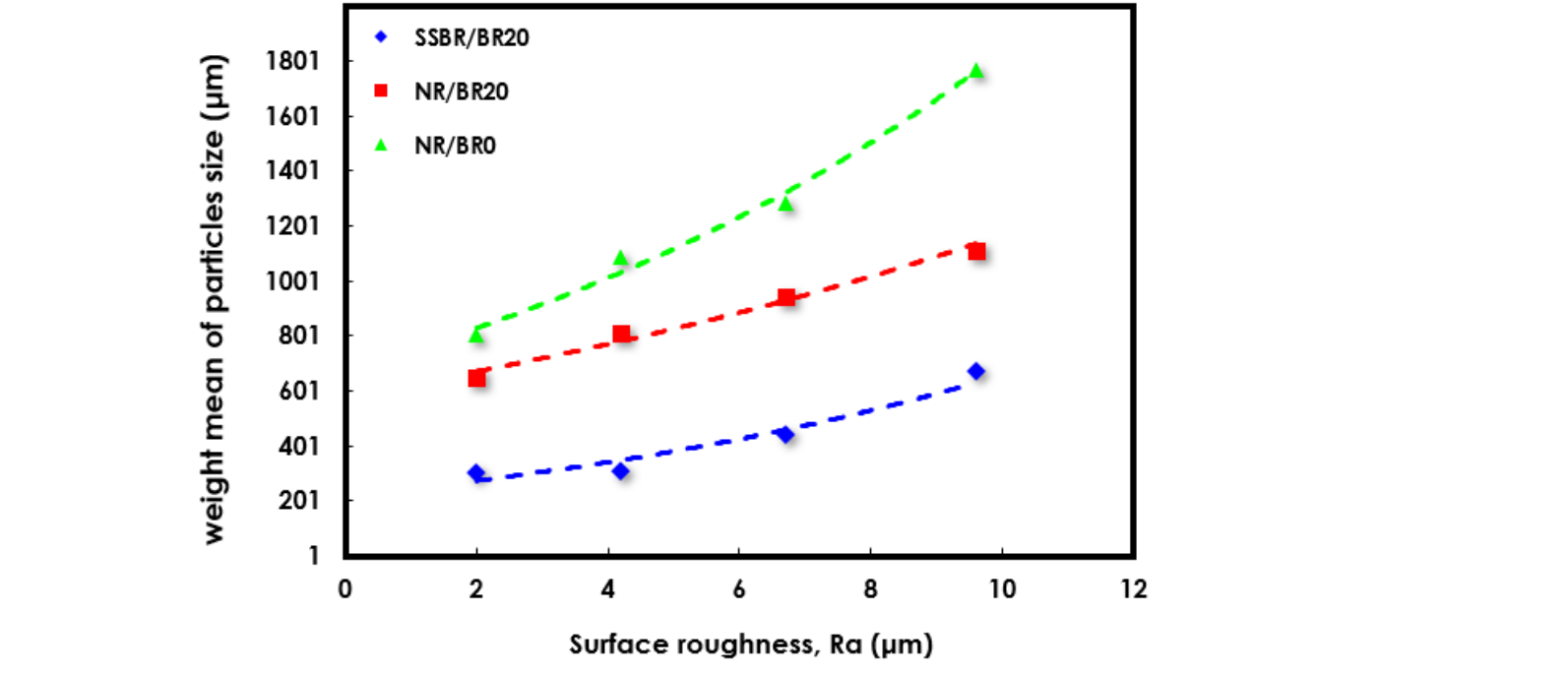
مقدمه

سایش مکانیکی فرآیندی است که طی آن، ماده نرم‌تر در اثر تماس و حرکت نسبی با سطوح زبر و سخت به‌تدریج جدا یا تخریب می‌شود و می‌تواند به شکل‌هایی مانند خراش، فرسودگی، خوردگی مکانیکی یا رنگی خستگی ظاهر شود. رفتگی خستگی یکی از سازوکارهای غالب سایش تایر حین غلتش است [۱] و به‌دلیل تولید ذرات میکروپلاستیک و تأثیر بر آلودگی محیط‌زیست اهمیت بالایی دارد. آمیزه رویه تایر در اثر برخورد مکرر با سطح جاده، تحت تنش‌های موضعی قرار گرفته و با ایجاد و رشد ترک‌های سطحی، شکست خستگی و جدایش ذرات را تجربه می‌کند [۲]. این ذرات که اندازه‌ای در حدود ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر دارند [۳]، به‌شدت تحت‌تأثیر زبری سطح هستند. Schallamach [۴] برای نخستین‌بار نقش زبری را با معرفی امواج Schallamach مطرح کرد و Champ و همکاران [۵] نیز روش سایش تیغه را برای تحلیل رفتار سایشی و مکانیک رشد ترک ارائه کردند که بعدها توسط محققان متعددی توسعه یافت.

یکی از مطالعات بنیادین در زمینه ارتباط زبری سطح با رفتار سایشی لاستیک توسط Persson طی سه دهه گذشته انجام شده است. Persson [۶] ابتدا مدلی نظری برای توصیف اثر زبری در مقیاس‌های مختلف بر خواص ویسکوالاستیک، چسبندگی سطحی و رفتار اصطکاکی توسعه داد. Persson در مدل‌های خود [۷، ۸]، توزیع برآمدگی‌ها را یکنواخت فرض کرده است، اما شواهد نشان می‌دهد که زبری سطح به‌شدت ناهمگن بوده و ویژگی‌های موضعی برآمدگی‌ها در ناحیه تماس، عامل اصلی در شکل‌گیری تنش‌های موضعی و ترک‌ها هستند [۳]. اگرچه مدل به‌روزشده Persson و Xu [۳] این محدودیت را تا حدی برطرف کرده است، اما همچنان وابستگی نرخ رشد ترک به اندازه اولیه ترک در نظر گرفته نشده است؛ درحالی‌که Ciavarella [۹] نشان داده است که ترک‌های کوچک ایجاد شده در اثر تماس با ناهمواری‌های ریزتر، به‌دلیل نزدیکی نوک ترک به سطح و تمرکز تنش بالاتر در این نواحی، پارگی سطح سریع‌تر اتفاق افتاده و در نتیجه ذرات سایشی کوچک‌تر و بیشتری تولید می‌شود. با این حال، این نتایج مبتنی‌بر مدل‌سازی نظری است و نیاز به اعتبارسنجی تجربی دارد. در این راستا، پژوهش حاضر با رویکردی تجربی اثر زبری سطح در چهار سطح مختلف و روی سه آمیزه لاستیکی را در سازوکار رفتگی خستگی بررسی کرده و مجموعه‌ای از داده‌های تجربی قابل استناد برای توسعه مدل‌های نظری و عددی فراهم می‌کند.

بخش تجربی: مواد و روش‌ها

در این پژوهش، سه نوع آمیزه با خواص مکانیکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت که شامل یک آمیزه سیلیکایی برای رویه تایر سواری (SSBR/BR20) و دو آمیزه پرشده با دوده برای رویه تایر باری (NR/BRO و NR/BR20) هستند. این آمیزه‌ها توسط گروه صنعتی بارز تهیه و فرمول‌بندی شده‌اند. همچنین به‌منظور بررسی اثر زبری سطح، چهار سنگ ساینده از شرکت سیلک سابان کویر کاشان (ایران، کاشان) تهیه شد. یک سنگ ساینده با دانه‌بندی ۲۴ به عنوان زبرترین سطح، دو سنگ ساینده با دانه‌بندی ۳۶ و ۴۶ نماینده زبری متوسط و یک سنگ ساینده با دانه‌بندی ۶۰ به‌عنوان صاف‌ترین سطح، مورد ارزیابی قرار گرفتند.



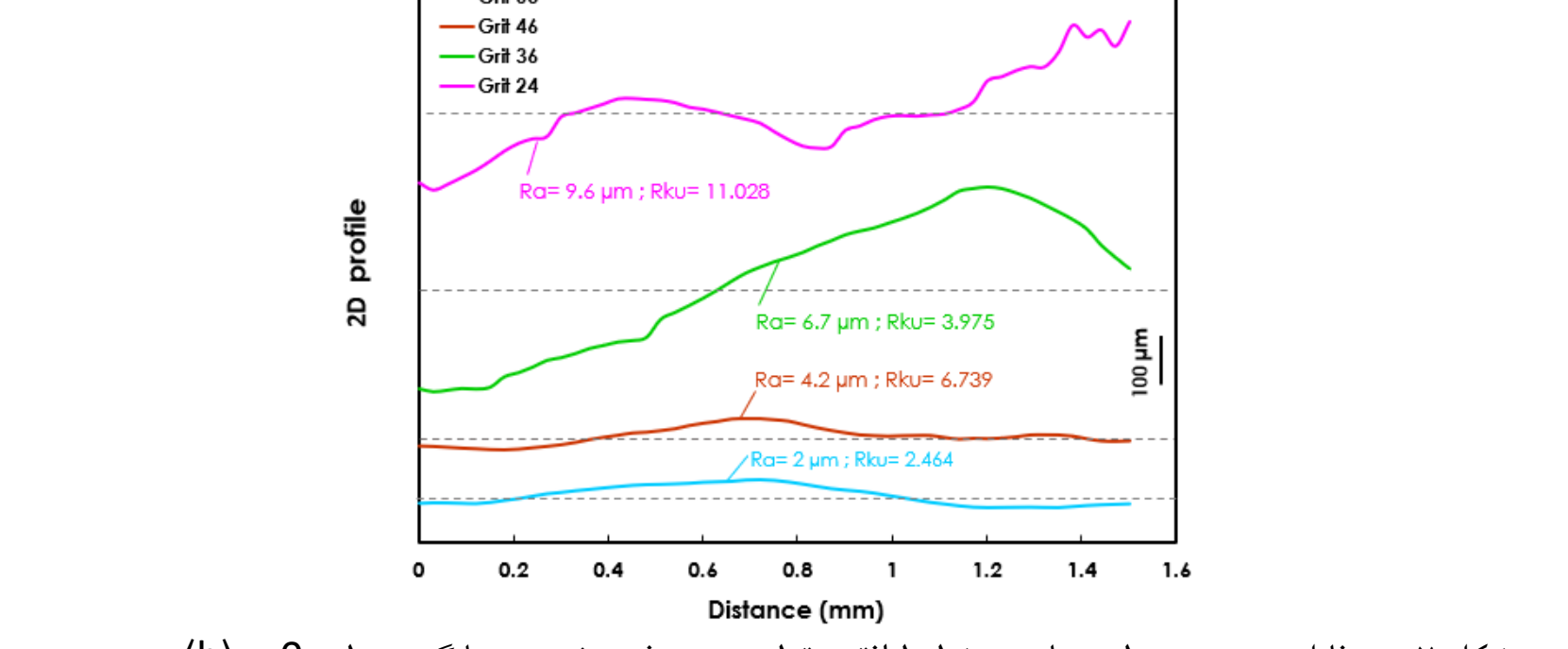
شکل ۴- ارتباط بین میزان زبری سطح و توزیع اندازه ذرات سائیده‌شده آمیزه‌های لاستیکی رویه تایر

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش زبری سطح، نرخ سایش ابتدا کاهش یافته و سپس مجدداً افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد که وجود یک محدوده بهینه از زبری سطح می‌تواند منجر به کاهش نرخ سایش آمیزه‌های لاستیکی رویه تایر شود. همچنین اندازه ذرات سائیده‌شده به‌طور یکنواخت و غیرخطی با افزایش زبری سطح، افزایش می‌یابد. این روند برای هر سه آمیزه مورد بررسی مشابه بوده است که نشان می‌دهد اثر زبری سطح مستقل از نوع آمیزه است. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای توسعه مدل‌های عددی و تئوری در پیش‌بینی رفتار سایش آمیزه‌های لاستیکی و کاهش اثرات محیط‌زیستی حاصل از میکروپلاستیک‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

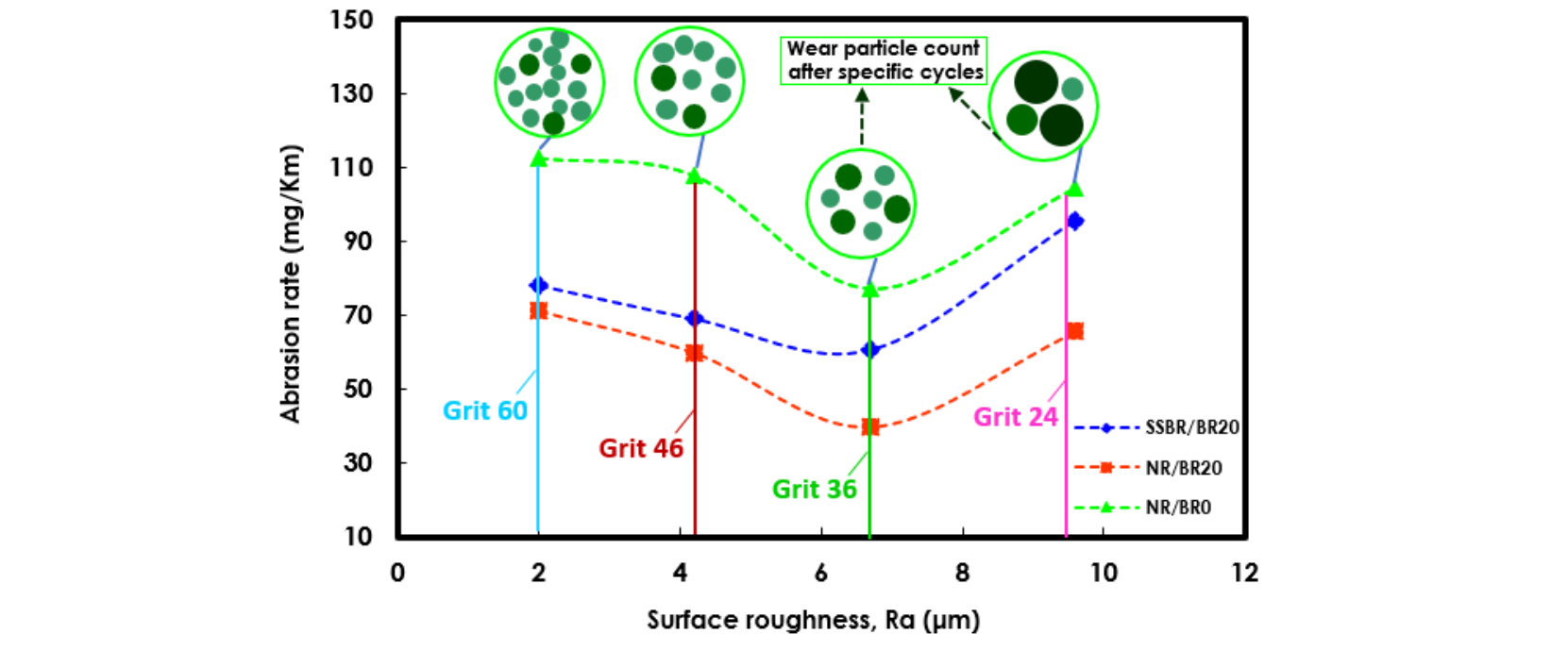
- G. Heinrich and M. Klüppel, Basic Mechanisms and PredictiveTesting of Tire-Road Abrasion, Adv. Polym. Sci., 289 (2023) 1-14.
- L. Kreider a, M. Panko, L. McAtee, I. Sweet, L. Finley, Physical and chemical characterization of fire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies, Sci. Total Environ., 408 (2010) 652-659
- B.N.J. Persson, R. Xu, N. Miyashita, Rubber wear: experiment and theory, J. Chem. Phys, 162 (2025) 074704.
- A.Schallamach, Abrasion pattern on rubber, Trans. Inst Rubber Ind, 28 (1952) 256.
- Champ, E Southern & AG Thomas, Fracture Mechanics Applied to Rubber Abrasion, Coatings, Plast, Prep (Am Chem Soc), 34 (1) (1974) 237-243.
- B.N.J. Persson, on the Theory of Rubber Friction, Surf. Sci., 401 (1998) 445-454.
- B.N.J. Persson, Contact mechanics for randomly rough surface, Sur. Sci. Rep. 61 (2006) 201.
- B.N.J. Persson, Theory of Powdery Rubber Wear, J. Phys.: Condens. Matter, 21 (2009) 485001.
- M. Ciavarella, Wear due to fatigue initiation, Tribol. Int., 207 (2025) 110592.
- D. Feng, D. Shen, M., Peng, X., & Meng, X. Surface Roughness Effect on the Friction and Wear Behaviour of Acrylonitrile–Butadiene Rubber (NBR) Under Oil Lubrication, Tribol. Lett., 65 (2017) 1-14.



شکل ۲- پروفایل دو بعدی سطوح ساینده؛ خطوط افقی نقطه‌چین معرف صفحه‌ی میانگین سطح $h = 0$ هستند.

اثر زبری سطح بر نرخ سایش

نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح یک کمینه در نرخ سایش ایجاد می‌شود و کمترین میزان سایش به ترتیب توسط چرخ‌های ساینده با زبری سطح ۶/۷ و ۴/۳ میکرومتر (دانه‌بندی ۳۶ و ۴۶) مشاهده می‌شود. افزایش مجدد نرخ سایش در سطح با زبری کمتر به علت افزایش تعداد برآمدگی‌های ریز، افزایش تماس با سطح و درنتیجه افزایش ایجاد ترک‌های ریز است؛ زیرا برآمدگی‌های ریزتر تنش کمتری به سطح مقابل منتقل کرده و درنتیجه توانایی ایجاد ترک‌های بزرگ کمتر می‌شود. تحت چنین شرایطی و براساس تحلیل‌های Ciavarella [۹]، که بیان می‌دارد نرخ رشد ترک‌های ریز بیشتر از ترک‌های درشت‌تر است، ترک‌های ریز ایجاد شده در چرخه‌های اولیه تماس بعد از گذشت تعداد معینی چرخه، به‌دلیل تحمل انرژی پارگی بالاتر و تمرکز تنش بیشتر، زودتر به پارگی سطح منجر می‌شوند و در نتیجه جدایش ذرات بیشتری از سطح لاستیک رخ می‌دهد که مستقیماً موجب افزایش نرخ سایش خواهد شد. این یافته نشان می‌دهد که یک محدوده بهینه از زبری سطح برای کاهش نرخ سایش وجود دارد که توسط Feng و همکاران [۱۰] نیز بیان شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، آمیزه لاستیکی فقط بر پایه لاستیک طبیعی (NR/BRO) حاوی دوده دارای بالاترین نرخ سایش روی تمام سطوح زبر است. افزایش ۲۰ قسمت وزنی پلی بوتادین (NR/BR20) باعث کاهش قابل توجه نرخ سایش شده است. آمیزه رویه تایر سواری سبز حاوی سیلیکا (SSBR/BR20) نرخ سایشی بین دو مورد ذکر شده دارد.



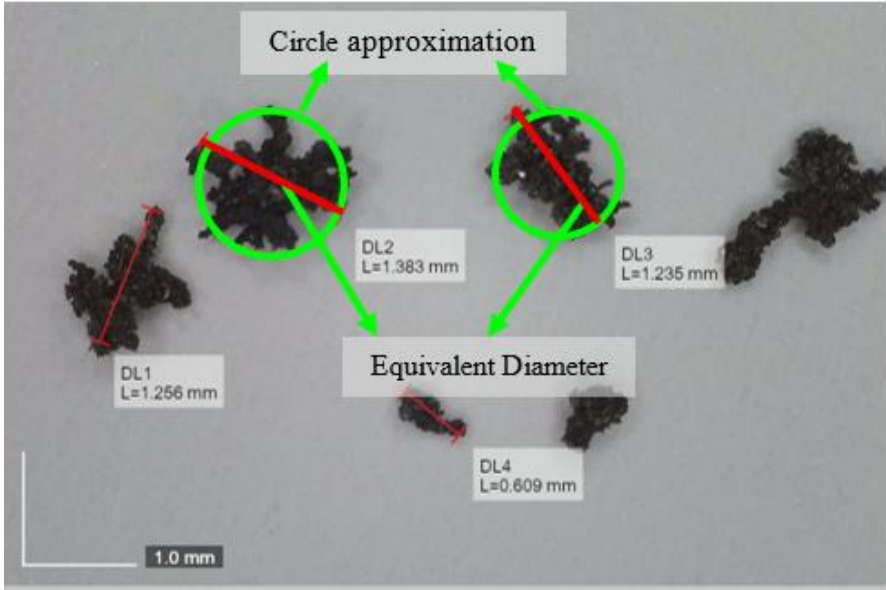
شکل ۳- تغییرات میزان سایش برای سه آمیزه لاستیکی تحت تأثیر زبری‌های مختلف سنگ‌های ساینده

اندازه ذرات سائیده‌شده روی زبری‌های مختلف

شکل ۴ تغییرات متوسط اندازه ذرات سائیده‌شده را به‌عنوان تابعی از زبری سطح برای سه آمیزه لاستیکی مختلف نشان می‌دهد که داده‌ها با یک تابع نمایی (نشان‌داده‌شده با خط‌چین) برازش شده‌اند. با افزایش زبری سطح، اندازه ذرات سائیده‌شده به‌صورت غیرخطی و تقریباً نمایی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که آمیزه SSBR/BR20 کوچک‌ترین، آمیزه NR/BRO بزرگ‌ترین و آمیزه NR/BR20 مقادیر میانی متوسط اندازه ذرات را تولید می‌کنند. جالب توجه است که آمیزه SSBR/BR20 اگرچه که نرخ سایش بینا بینی داشت اما اندازه ذرات ریزتر و احتمالاً تعداد ذرات سائیده شده بیشتری دارد. ریزتر بودن ذرات سائیده شده این آمیزه را می‌توان به اثر تقویتی سیلیکای اصلاح شده نسبت داد. افزایش غیرخطی اندازه ذرات با افزایش زبری می‌تواند ناشی از افزایش تنش‌های برشی و قابلیت جدایش ذرات بزرگ‌تر باشد؛ زیرا برآمدگی‌های بزرگ‌تر در سطوح زبرتر قادرند ترک‌های عمیق‌تری ایجاد کرده و درنتیجه ذرات درشت‌تری را جدا کنند.

آزمون سایش، آشکارسازی ذرات و سطوح ساینده

پیش از شروع آزمون‌های سایش سنگ‌های ساینده توسط دستگاه سایش اکرون و یک چرخ لاستیکی مطابق با سایر نمونه‌های مورد آزمایش، تحت پرداخت کاری طی ۱۰۰۰ چرخه قرار گرفتند. در ادامه فرآیند، نمونه‌های لاستیکی تحت قالب‌گیری فشاری با زمان پخت بهینه قرار گرفتند و درنهایت تحت شرایط کنترل‌شده و یکسان بار ۰/۹۱ کیلوگرم و زاویه لغزش ۱۵ درجه یکسان روی چهار سطح ساینده مورد آزمون سایش طی ۲۰۰۰ چرخه (معادل با ۱/۶۱ کیلومتر) قرار گرفتند. ذرات سائیده‌شده حین آزمون جمع‌آوری و با میکروسکوپ نوری Dino-Lite (مدل AM4113/AD4113) تصویربرداری شدند. برای تعیین اندازه ذرات از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. شکل ۱ تصویری از ذرات لاستیکی سائیده شده و روش تحلیل اندازه ذرات را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ذرات دارای شکل نامنظمی هستند که مقطع دو بعدی آنها با دایره‌ای به مساحت برابر معادل سازی شد. بدین روش قطر معادل ۵۰ ذره سائیده شده هر آمیزه روی سطوح مختلف اندازه‌گیری و متوسط قطر معادل مورد استفاده قرار گرفت. همچنین پس از آزمون‌های سایش، سطوح ساینده با پروفایل‌متر لیزری LPM-D1 (شرکت فناوری خلا کهربا، تهران) برای تعیین ویژگی‌های سطحی آشکارسازی شدند.



شکل ۱- ذرات لاستیکی سائیده شده و روش تحلیل اندازه ذرات

بحث و نتیجه‌گیری

تعیین مشخصات زبری سطح

شکل ۲ پروفایل دوبعدی چهار سطح ساینده با دانه‌بندی‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آن تغییرات ارتفاع ناهمواری‌ها برحسب طول ارزیابی‌شده (L=1.5 mm) رسم شده است. به‌منظور جلوگیری از هم‌پوشانی نمودارها، مقادیر ارتفاع (h) به‌صورت عمودی جابه‌جا شده‌اند. با کاهش دانه‌بندی، زبری سطح افزایش یافته و اختلاف ارتفاع قله‌ها و دره‌ها بیشتر می‌شود. مقادیر زبری متوسط (Ra) و کشیدگی پروفایل (Rku) در شکل ۲ ارائه شده‌اند؛ لازم به ذکر است که Ra برحسب میکرومتر (μm) بیان شده و Rku یک پارامتر بی‌بعد است. مقدار بالای Rku برای دانه‌بندی ۲۴ نشان‌دهنده وجود قله‌های بلند و دره‌های عمیق اما کم‌تعداد است، درحالی‌که مقدار پایین Rku برای دانه‌بندی ۶۰ بیانگر توزیع یکنواخت‌تری از برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌هاست. سطوح با مقادیر متوسط Rku (دانه‌بندی‌های ۳۶ و ۴۶) رفتاری تعادلی از خود نشان می‌دهند و به دلیل ترکیب مناسب قله‌ها و دره‌ها، عملکرد بهینه‌تری در تماس با سطح لاستیک ایجاد می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر میانگین زبری سطح، توزیع ارتفاع برآمدگی‌ها نیز نقش مهمی در سازوکار سایش و اندازه ذرات سائیده‌شده ایفا می‌کند. در این مقطع، مقادیر Ra به عنوان معیار زبری سطوح ساینده مورد استفاده قرار گرفتند.