

## بررسی اثر مقیاس بر پارامترهای هندسی سطوح درزه سنگ

محمدجواد آذین‌فر<sup>۱\*</sup>، عبدالهادی قزوینیان<sup>۲</sup>، حمیدرضا نجاتی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: خرداد ۱۳۹۵، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

بر اساس مطالعات انجام شده، مشخص شده است که رفتار مکانیکی درزه‌های سنگی می‌تواند به عنوان تابعی از مقیاس تغییر کند. در چهل سال گذشته، مطالعات وسیعی بر روی اثر مقیاس بر روی رفتار مکانیکی درزه‌های سنگی انجام شده است. بسیاری از این مطالعات نتایج متناقضی را در بر داشته است. بنابراین ماهیت و سازوکار اثر مقیاس بر رفتار مکانیک درزه‌های سنگی هنوز به طور کامل شناخته نشده و نیاز به مطالعات بیشتری دارد. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر روی رفتار برشی درزه‌ها تأثیر گذار است خصوصیات هندسی سطوح آنها است. بنابراین بررسی پارامترهای هندسی سطوح درزه با در نظر گرفتن اثر مقیاس بر آنها تا حد زیادی می‌تواند تبیین کننده رفتار وابسته به مقیاس درزه‌ها باشد. در پژوهش حاضر سه سطح طبیعی درزه با هندسه‌های متفاوت و با ابعاد بیش‌تر از ۲۵۰۰ سانتی‌مترمربع از طبیعت انتخاب شده‌اند. برای ابعاد  $۵۰ \times ۵۰$  میلی‌مترمربع تا  $۵۰۰ \times ۵۰۰$  میلی‌مترمربع، پارامترهای هندسی مهم درزه محاسبه شده و اثر مقیاس بر این پارامترها و تغییرات مقادیر آنها نسبت به مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد اثر مقیاس بر پارامترهای مختلف هندسی یکسان نبوده و بسته به نوع هندسه درزه و چگونگی توزیع پارامترهای زبری اولیه و ثانویه سطح، نتایج متفاوتی را به همراه خواهد داشت. پارامترهای زاویه‌ای سطح درزه در مقیاس بیشتر از ۴۰۰ سانتی‌مترمربع تقریباً مستقل از مقیاس خواهند شد. اما پارامترهای ارتفاعی سطح درزه، برای سطوحی که زبری درجه اول در آنها بیش‌تر باشد، با افزایش مقیاس (حداقل تا ۲۵۰۰ سانتی‌مترمربع) افزایش می‌یابند.

### کلید واژه‌ها

اثر مقیاس، خصوصیات هندسی سطوح درزه، پارامترهای هندسی سطح درزه، پیمایش سه‌بعدی سطح درزه، پیمایشگر نوری سه‌بعدی

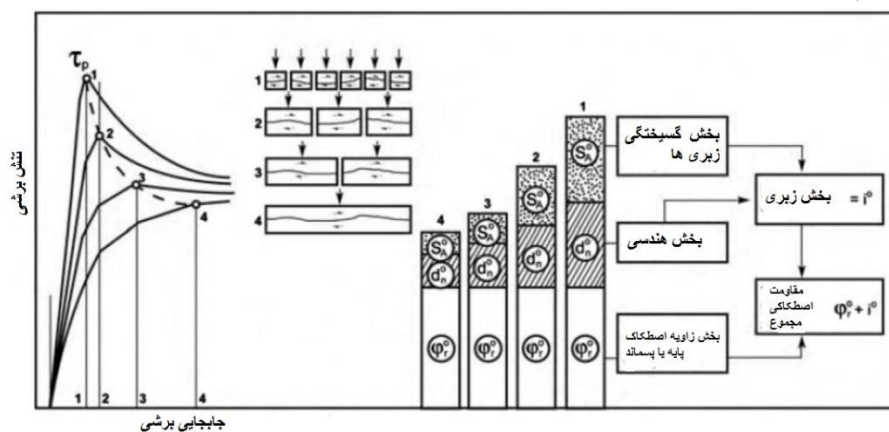
\*عهده دار مکاتبات: [j.azinfar@gmail.com](mailto:j.azinfar@gmail.com)

## ۱- مقدمه

تا حدی ناشی از تغییر مقاومت ناهمواری‌های سنگ بکر و تا حدی مربوط به تغییر در هندسه سطح (زبری) نسبت به مقیاس است [۱].

برداشت غالب از اثر مقیاس بیشتر متأثر از نتایج پژوهش‌های بندیس و همکاران [۲] است. آنان اثر ابعاد درزه بر مقاومت برشی را با انجام آزمایشات برش مستقیم بر روی درزه‌های کپی برداری شده از طبیعت با اندازه نمونه‌های ۳۶ تا ۴۰ سانتی‌متر و نمونه‌های زیر مجموعه آنها نشان دادند. آنها نشان دادند که مقاومت برشی با افزایش ابعاد نمونه‌ها کاهش یافته (اثر منفی مقیاس) و جابجایی متناظر با مقاومت برشی افزایش می‌یابد (شکل ۱). هنجر و همکاران [۳] آزمایش‌های بندیس و همکاران [۲] را با همان دستگاه و مواد و با سیستم جمع‌آوری داده پیشرفته‌تر تکرار کرده و در مورد مقاومت برشی، اثر مقیاسی مشاهده نکردند.

در طول زمان مشخص شده است که خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی یک توده‌سنگ برای طراحی سازه‌های سنگی و ارزیابی ایمنی در پروژه‌های مختلف مهندسی ضروری است. به علاوه رفتار مکانیکی شکستگی‌ها تا حد زیادی مرتبط با مقدار سطح تماس و هندسه آن است. بررسی‌ها انجام شده تاکنون نشان داده است که این خصوصیات وابسته به مقیاس هستند. مسئله اصلی در مطالعه وابستگی خصوصیات مکانیکی درزه سنگ به مقیاس، نیاز به تجهیزات پیشرفته و صرف هزینه‌های بالا، جهت انجام آزمایشات بزرگ مقیاس است. در نتیجه مطالعات زیادی در طول چهار دهه گذشته برای واکاوی اثر مقیاس بر رفتار مکانیکی درزه‌ها انجام شده است. این رفتار وابسته به مقیاس



شکل ۱: اثر مقیاس بر سه جزء مقاومت برشی درزه [۲]

در بخشی از پژوهش کراورو و همکاران [۴] پارامترهای آماری متعارف و بعد فراکتال جهت تعیین تغییرات میزان زبری با طول پروفیل مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد ناپیوستگی بین ۲۰ تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر بوده است. از پروفیل‌سنج‌های مکانیکی با فاصله نقاط اندازه‌گیری یک سانتی‌متر استفاده شده است. در بخش دیگر مطالعه فاصله نقاط اندازه‌گیری ۰.۱٪ طول پروفیل در نظر گرفته شده است. زمانی که فاصله نقاط اندازه‌گیری ثابت باشد (یک سانتی‌متر) اثر مقیاس مثبت است و زمانی که فاصله نقاط اندازه‌گیری مقیاس‌بندی شده باشد (۰.۱٪ طول پروفیل) اثر مقیاس منفی است.

کراورو و همکاران ناهمواری ناپیوستگی‌های طبیعی در صحرا با استفاده از فتوگرامتری و در آزمایشگاه با استفاده از پروفیل‌سنج اندازه‌گیری کرده‌اند. از پروفیل‌های دوعبده با

وابستگی زبری سطح ناپیوستگی‌ها و مقاومت برشی به مقیاس توسط محققان بسیار دیگری انجام شده است. بسیاری از این مطالعات نتایج متناقضی را در بر داشته است. برخی از مطالعات کاهش در مقاومت و زبری را با افزایش ابعاد ناپیوستگی نشان داده‌اند. مطالعات دیگر وجود اثر مثبت مقیاس را نشان داده‌اند و برخی دیگر ترکیبی از اثرات مثبت و منفی و یا عدم تاثیر مقیاس را نشان داده‌اند.

در اینجا به برخی از مطالعاتی اشاره می‌شود که تا کنون بر روی اثر مقیاس انجام شده و به بررسی اثر مقیاس بر هندسه سطح درزه از طریق اندازه‌گیری و تحلیل ناهمواری سطح درزه پرداخته است. دسته‌ای دیگر از مطالعات، وابستگی مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها به مقیاس را با انجام آزمایشات برش درزه بررسی کرده‌اند که با توجه به عنوان پژوهش از آن‌ها صرف نظر می‌شود.

تغییر طول مقادیر، زاویه اتساع و بعد فراکتال، جهت بررسی از طول نمونه محاسبه شده است. ابعاد ناپیوستگی بین ۶ تا ۵۰۰ سانتی‌متر و فاصله نقاط اندازه‌گیری در رقومی سازی با استفاده از فتوگرامتری و پروفیل‌سنج به ترتیب ۵۰ میلی‌متر و ۳، ۰/۷، ۰/۱ میلی‌متر بوده است. نتایج نشان داد که تمام شاخص‌های زبری با افزایش طول پروفیل کاهش می‌یابند [۵].

مقاومت برشی و ناهمواری سطح درزه‌های مصنوعی سنگی با ابعاد مختلف در پژوهش لیل گومز<sup>۲</sup> بررسی شده است. درزه‌های مصنوعی از روی یک شکستگی کششی در گرانیت نسخه برداری شده است. دامنه متوسط زبری‌ها با افزایش ابعاد درزه‌های کششی افزایش یافته و مقاومت برشی آنها نیز افزایش می‌یابد. ابعاد ناپیوستگی‌ها بین ۸۴ تا ۲۵۶ سانتی‌متر مربع بوده است. در این مطالعه اثر مثبت مقیاس بر دامنه متوسط زبری سطح با افزایش ابعاد نمونه دیده شده است [۶].

وابستگی زبری به مقیاس با رقومی‌سازی یک صفحه سیلیکونی با مساحت یک مترمربع که از یک ناپیوستگی طبیعی در آزمایشگاه نسخه‌برداری شده بود، توسط فردین و همکاران بررسی شده است.

تحلیل‌های زبری با افزایش ابعاد پنجره نمونه‌برداری انجام شده است. رقومی‌سازی توسط یک اسکنر لیزری انجام شده و زبری سه‌بعدی با استفاده از بعد فراکتال و پارامتر دامنه مرتبط با آن ارزیابی شده است. ابعاد ناپیوستگی بررسی شده در این مطالعه بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سانتی‌مترمربع و فاصله نقاط اندازه‌گیری از ۰/۲ میلی‌متر تا ۲ میلی‌متر متغیر بوده است (فاصله نقاط ۰/۰۲ طول هر درزه در نظر گرفته شده است). در این پژوهش اثر مقیاس، بر پارامترهای فراکتالی خود-متشابه<sup>۳</sup> بعد فراکتال (D) و پارامتر دامنه (A) اثر منفی داشته است. آنان دریافتند که وابستگی به مقیاس محدود به اندازه خاصی است و برای ابعاد بزرگ‌تر از این اندازه زبری سطح مستقل از مقیاس خواهد شد. این اندازه خاص به عنوان آستانه ایستایی<sup>۴</sup> تعریف می‌شود. آستانه ایستایی درزه مورد مطالعه آنان ۵۰۰ میلی‌متر تخمین زده شد. اما سطح درزه مورد مطالعه به عنوان مسطح صاف<sup>۵</sup> توصیف شده و آنان متذکر شدند که درزه زبرتر ممکن است که آستانه ایستایی بزرگ‌تری داشته باشد [۷].

در ادامه پژوهش سال ۲۰۰۱، فردین و همکاران [۸] زبری یک ناپیوستگی با ابعاد چهار مترمربع را مورد مطالعه قرار دادند که با استفاده از سیستم LIDAR در صحرا رقومی شد. مجدداً جهت بررسی وابستگی زبری به مقیاس، پنجره‌های نمونه‌برداری به صورت افزایشی در نظر گرفته شده و با استفاده از پارامترهای فراکتال سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. مساحت ناپیوستگی مورد بررسی بین ۱۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ سانتی‌مترمربع بوده است. فاصله نقاط اندازه‌گیری در این مطالعه در هنگام برداشت نقاط پنج میلی‌متر بوده است که به دلیل عدم توزیع یکسان نقاط و چگالی بالای آنها، با استفاده از نرم‌افزار فاصله نقاط یکسان شده و به ۲۰ میلی‌متر افزایش داده شده است. اثر مقیاس برای بعد فراکتال و پارامتر دامنه در این پژوهش نیز منفی بود. اما آستانه ایستایی حدود ۳۰۰۰ میلی‌متر برای این سطح درزه مشاهده شد. بنابراین آنان نشان دادند که با افزایش زبری آستانه ایستایی نیز افزایش می‌یابد.

در ادامه این پژوهش‌ها از یک سطح درزه، چهار سطح درزه از مقیاس ۲۵ تا ۴۰۰ سانتی‌مترمربع تهیه شده و با استفاده از درزه‌های نسخه‌برداری شده از یک سطح، اثر مقیاس بر خصوصیات هندسی و خصوصیات مکانیکی درزه‌ها بررسی شد. روش کار مشابه روش توضیح داده شده در پژوهش سال ۲۰۰۱ بوده است. با این حال در این پژوهش، مقیاس بر پارامترهای فراکتالی D و A اثر مثبت داشته است که در تناقض با نتایج قبلی آنان بوده است. نتایج برش آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش ابعاد درزه مقاومت برشی حداکثر، سختی برشی و نرمال کاهش می‌یابند [۹]. البته آنان در این پژوهش افزایش زاویه اتساع را با افزایش ابعاد نمونه مشاهده کردند که در تناقض با آزمایشات بندیس و همکاران [۲] است.

در پژوهشی که توسط تاتن و گراسلی انجام شد، برخی از این تناقضات توضیح داده شده است. با رقومی‌سازی و تحلیل دو سطح شکستگی بزرگ مقیاس (۲×۲ و ۳×۳ مترمربع) گنایس که در مجاورت هم قرار داشتند، با بررسی دو سطح  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  تا  $1800 \times 1800 \text{ mm}^2$  اثر اندازه نمونه بر روی تخمین زبری بررسی شد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد زبری به عنوان تابعی از اندازه پنجره نمونه‌برداری افزایش می‌یابد که با فرضیات غالب مغایرت دارد. در این پژوهش وابستگی زبری درزه به مقیاس با

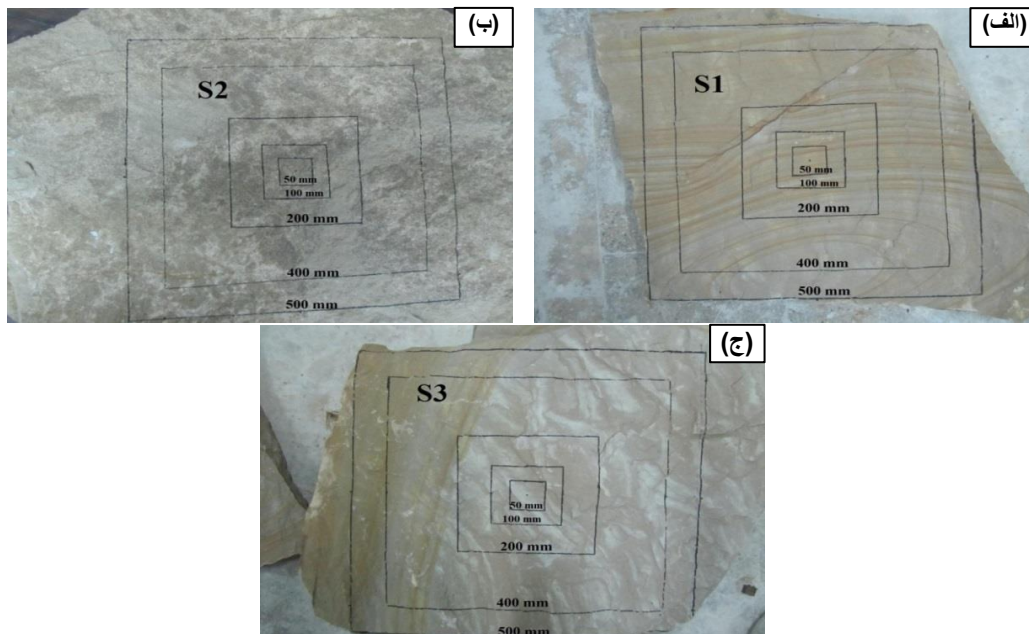
بر مقادیر پارامترهای زبری، سه سطح طبیعی با زبری‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و فواصل اندازه‌گیری نقاط در تمام مقیاس‌ها ثابت (۰٫۲۵mm) در نظر گرفته شده است.

## ۲- تهیه سطوح درزه طبیعی

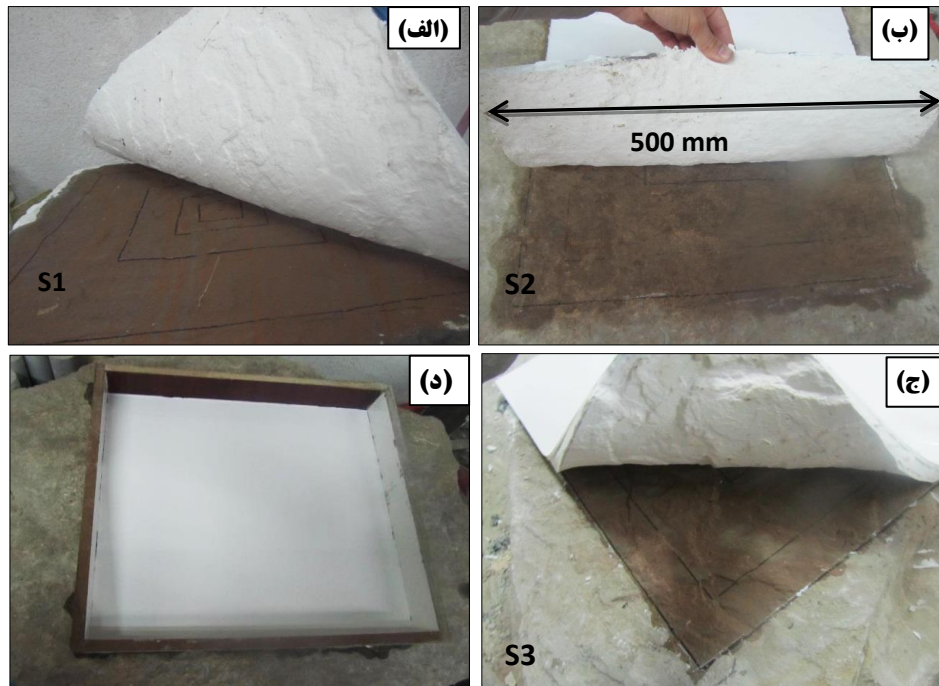
به منظور تهیه سطوح طبیعی درزه، چندین تخته سنگ با ابعاد بیش از  $2500 \text{ cm}^2$  از جنس اسلیت تهیه شده و پس از بررسی‌های اولیه در آزمایشگاه سه سطح متفاوت از بین آنها انتخاب شد به گونه‌ای که بر اساس طبقه‌بندی ISRM [۱۱] در سه رده متفاوت درزه مسطح (سطح S1)، موج‌دار (سطح S2) و پله‌ای (سطح S3) قرار می‌گیرند (شکل ۲). جهت بررسی اثر مقیاس بر پارامترهای زبری سه‌بعدی، با استفاده از سیلیکون (RTV2) از سطح درزه‌های طبیعی تا ابعاد  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  نسخه‌برداری شد. تمام سطوح درزه قبل از قالب‌گیری کاملاً تمیزکاری و تراز شده و سپس به آرامی سیلیکون بر روی سطح سنگ ریخته و با چکش به آهستگی ضرباتی به اطراف سنگ زده شد تا حباب‌های هوا به طور کامل خارج شوند. پس از ۲۴ ساعت سیلیکون از سطوح سنگی جدا شد (شکل ۳). جهت قالب‌گیری از چهارچوبی به ابعاد داخلی  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  استفاده شده است (شکل ۳-د). جهت درزگیری قالب، از خمیربازی استفاده شده است.

استفاده از پارامتر زبری جهت‌دار سه‌بعدی  $\theta_{\max}^*/C+1$ ، پارامترهای زبری سه‌بعدی غیر جهت‌دار  $R_s$  و پارامترهای فراکتال خود-متشابه D و A و پارامترهای دو بعدی غیر جهت‌دار  $Z_2$  و  $R_p$  بررسی شده است. بر این اساس اثر مثبت مقیاس برای پارامترهای  $\theta_{\max}^*/C+1$ ،  $R_p$ ،  $R_s$ ،  $Z_2$  و A مشاهده شد و تنها پارامتر D اثر منفی مقیاس را نشان داد که در تناقض با پژوهش‌های مشابهی است که قبلاً به آنها اشاره شد. آنان به این نتیجه رسیدند که اثر تفکیک‌پذیری سطح می‌تواند برخی از تناقضات روابط مربوط به مقیاس زبری را که قبلاً منتشر شده بود، تبیین نماید. در نتایج این مطالعه علت کاهش زبری با افزایش ابعاد نمونه در پژوهش‌های پیشین، نامناسب بودن تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری ذکر شده است [۱۰].

اکثر پژوهش‌های انجام شده جهت بررسی اثر مقیاس بر هندسه سطح درزه بر روی یک سطح خاص انجام شده است. بنابراین با توجه به پیچیدگی سطوح درزه‌های طبیعی بررسی یک سطح به تنهایی نمی‌تواند بیان‌کننده تغییرات مقادیر پارامترهای زبری نسبت به مقیاس باشد. علاوه بر این در بسیاری از موارد فاصله نقاط اندازه‌گیری در مقیاس‌های بالاتر، به خاطر کمتر شدن حجم محاسبات، بیشتر در نظر گرفته شده است که خود باعث از بین رفتن زبری‌های کوچک مقیاس و در نتیجه اثر آنها بر مقایر پارامترهای هندسی شده است. بنابراین در این مطالعه، با هدف بررسی اثر مقیاس



شکل ۲: سه سطح بزرگ مقیاس انتخاب شده برای رقوم‌سازی و انجام آزمایشات برش. الف) سطح S1 (مسطوح)، ب) سطح S2 (موج‌دار) و ج) سطح S3 (پله‌ای)



شکل ۳: قالب‌گیری از سطوح درزه، الف) سطح S1، ب) سطح S2، ج) سطح S3، د) چهارچوب قالب‌گیری

می‌شوند. بنابراین رقیق‌سازی کل سطح طبیعتاً نیاز به چندین اندازه‌گیری مجزا از موقعیت‌های مختلف دارد. برای مختصات دادن به سیستم از نقاط مرجع استفاده می‌شود (علامت‌های دایره‌ای که بر روی سطح چسبیده می‌شود). حداقل سه نقطه از قبل تعیین شده از نقاط مرجع باید برای انتقال ابر نقاط از هر اندازه‌گیری به سیستم مختصات عمومی قابل رویت باشد. موقعیت نقاط مرجع در چرخش‌های مختلف، باید نسبت به جسم ثابت باشد. نقاط مرجع را می‌توان به صورت مستقیم بر روی سطح یا در اطراف سطح و در موقعیتی ثابت به آن چسباند (شکل ۴).

پس از اتمام عملیات اسکن فرآیند یکپارچه‌سازی و حذف داده‌های هم‌پوشانی انجام شده و در نهایت یک سطح ناهموار مثلث‌بندی شده (TIN) پیوسته از ابر نقاط به دست خواهد آمد (شکل ۵). در نهایت سطوح درزه مثلث‌بندی شده به صورت فایل‌هایی با پسوند STL<sup>۱۷</sup> ذخیره خواهند شد (شکل ۶).

این فرمت از فایل، شامل مختصات تمام بردارهای نرمال مثلث‌های سطح و مختصات سه رأس آن‌هاست. برای بدست آوردن پارامترهای زبری از کد نوشته شده در MATLAB استفاده شده است.

سطوح سیلیکونی به دست آمده به آزمایشگاه اندازه‌گیری سطوح منتقل شد تا این سطوح نیز، توسط دستگاه اسکن رقوم‌سازی گردند.

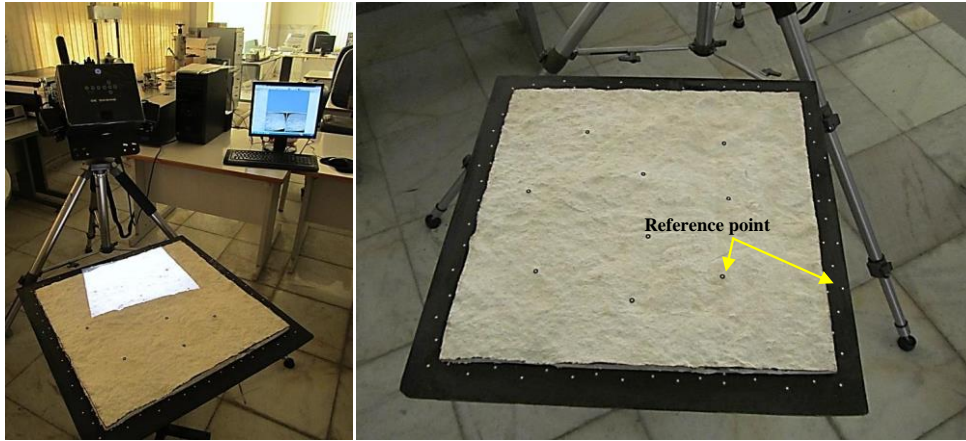
### ۳- اندازه‌گیری سطح

#### ۳-۱- تجهیزات

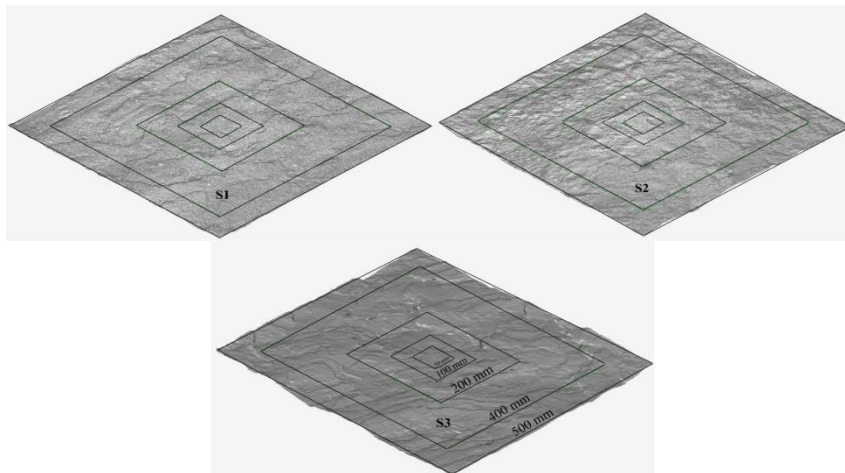
اخیراً چندین ابزار نوری برای اندازه‌گیری سریع سطوح ناپیوستگی در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی استفاده شده است. این سیستم‌ها شامل: ابزار فاصله‌یابی لیزری<sup>۸، ۱۲</sup> و سیستم‌های فوتوگرامتری زمینی برد کوتاه<sup>۸، ۱۳-۱۵</sup> و روش‌های مبتنی بر تصویرسازی نوری ساختاریافته<sup>۹</sup> مانند دوربین‌های اندازه‌گیری سریع ناهمواری<sup>۱۰، ۱۶-۱۸</sup> و اسکنرهای لیزری<sup>۱۱، ۱۹، ۲۰</sup> هستند.

در این مطالعه از یک اسکنر سه‌بعدی نوری با دقت  $\pm 0.15$  میلی‌متر و تفکیک‌پذیری<sup>۱۲</sup> (فاصله‌داری نقاط)  $0.1$  میلی‌متر برای اندازه‌گیری ناهمواری سطوح درزه استفاده شده است. این اسکنر از فناوری پیچیده اندازه‌گیری استفاده می‌کند که شامل تکنیک‌های نور ساخت یافته<sup>۱۳</sup>، تکنیک دید استریو<sup>۱۴</sup> و تکنیک اندازه‌گیری فازی<sup>۱۵</sup> است.<sup>۱۶</sup> محدوده یک اسکنر در این سیستم  $200 \times 150$  میلی‌متر مربع بوده و در هر بار اسکن تنها نقاطی که در هر دو تصویر دوربین‌های سمت راست و چپ دیده شوند در مختصات سه‌بعدی مدل





شکل ۴: نحوه اسکن سطوح با ابعاد  $500 \times 500$  میلی‌متر مربع

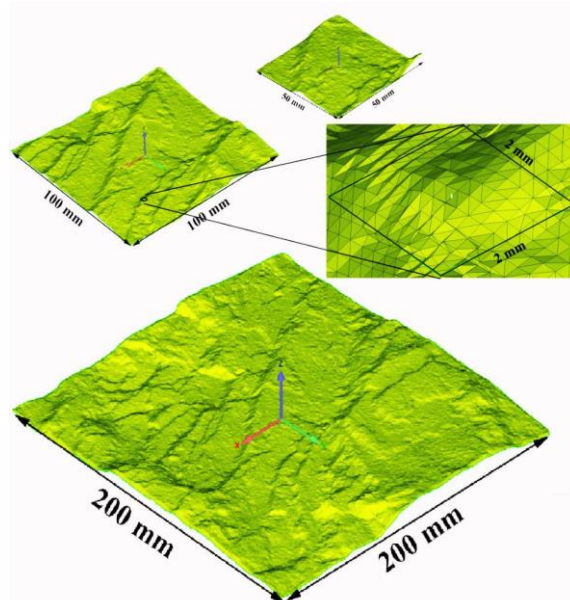


شکل ۵: سطوح رقومی‌سازی شده با ابعاد  $500 \times 500$  میلی‌متر مربع

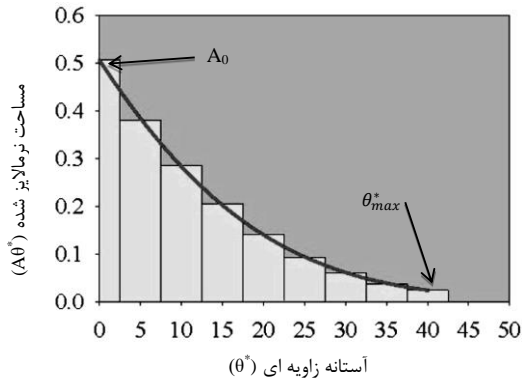
شده خواهد داشت. بنابراین در این پژوهش برای تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری در تمام مقیاس‌ها، مقدار ثابت  $0.25$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- کمی‌سازی زبری سطوح ناپیوستگی

چندین روش سه‌بعدی جهت کمی‌نمودن زبری ناپیوستگی‌های سنگی وجود دارد. پارامترهای زبری می‌توانند به دو دسته پارامترهای وابسته به جهت (دارا بودن مقادیر متفاوت زبری در جهات مختلف) و غیر وابسته به جهت (دارا بودن مقادیر یکسان زبری در جهات مختلف) تقسیم شوند. پارامتر زبری گراسلی  $(2A_0\theta_{\max}^*/C+1)$  پارامتری جهت دار و پارامترهای فراکتالی  $D$  و  $A$  و ضریب زبری  $R_s$ ، ریشه میانگین مربع ارتفاع ناهمواری‌ها نسبت به یک سطح مبنا (RMS)، میانگین سطح مرکزی (CLA)، زاویه متوسط سطح  $(\theta_{ave})$  و پارامتر  $Z_2$  (ریشه میانگین مجذور مشتق اول پروفیل) پارامترهای زبری مستقل از جهت برش هستند. در



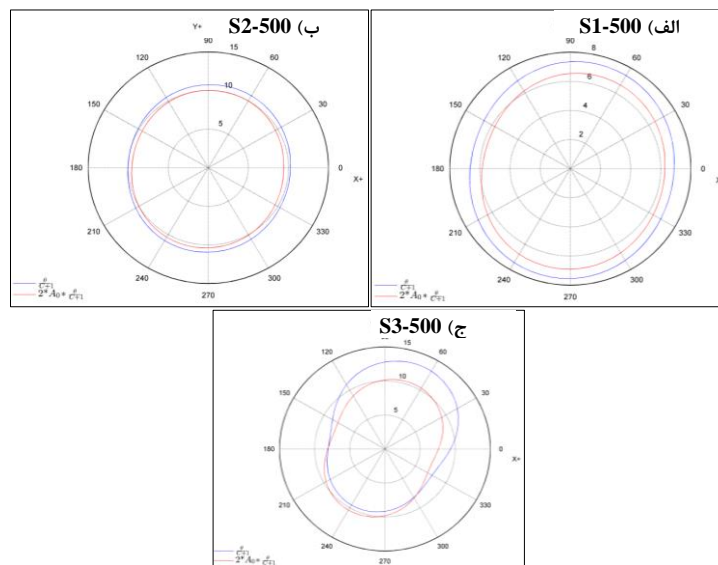
شکل ۶: سطوح به دست آمده در سه مقیاس از ابر نقاط برداشت شده پس از مثلث‌بندی (سطح  $S_3$ ) تاتن و گراسلی [۱۰] نشان دادند که تفکیک‌پذیری اندازه‌گیری، تأثیر زیادی بر روی مقادیر زبری اندازه‌گیری



شکل ۷: منحنی  $A_c$  نسبت به  $\theta^*$  [۲۲]

افزایش تعداد وجوه با زاویه شیب بیشتر مقادیر بزرگتری از زبری را نشان می‌دهد و معادل مساحت بزرگتری از سطح زیر منحنی رابطه (۱) و سطح زیر منحنی معادل  $2A_0\theta^*_{max}$  است. از آنجایی که  $A_0$  عموماً بسیار نزدیک به  $0.5$  است، شاخص زبری به عنوان  $\theta^*_{max}/C+1$  در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش  $2A_0\theta^*_{max}/C+1$  مستقیماً به عنوان شاخص زبری و مقادیر آن در جهت جابجایی برشی در آزمایش برش مستقیم در نظر گرفته شده است.

مقادیر این پارامتر برای سه سطح مذکور و در مقیاس  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  در شکل ۸ ارائه شده است. جهت برش در راستای محور Y است.



شکل ۸: مقادیر پارامتر زبری گراسلی در جهات مختلف برای سه سطح S1، S2 و S3 با ابعاد  $500 \times 500 \text{ mm}^2$

که چگونه زبری با مقیاس تغییر می‌کند و پارامتر دامنه A که پراکنش یا شیب سطح را در یک مقیاس مبنا مشخص می‌کند. فردین و همکاران [۷] پارامترهای فراکتالی را بر مبنای روش زبری طولی محاسبه کردند. روش زبری طولی در اصل برای محاسبه پارامترهای فراکتال پروفیل‌های دو

ادامه مقادیر محاسبه شده این پارامترها برای سطوح مورد مطالعه ارائه شده است.

### ۳-۲-۱- پارامتر زبری گراسلی $(2A_0\theta^*_{max}/C+1)$

تاتن و گراسلی [۲۱] پارامتر زبری  $\theta^*_{max}/C+1$  را پیشنهاد نمودند که مشخص کننده توزیع تجمعی شیب ظاهری وجوه مثلث‌های یک سطح مثلث‌بندی شده<sup>۱۸</sup> است. پارامتر  $\theta^*_{max}$  معادل شیب ظاهری پرشیب‌ترین وجوه مثلث‌ها در حالت سه‌بعدی نسبت به جهت برش و مقدار C یک پارامتر برازشی است که شکل توزیع تجمعی را مشخص می‌کند. کسری از مساحت سطح که شیب بیشتری نسبت به مقادیر زاویه ویژه آستانه یعنی  $\theta^*$  داشته باشد نسبت به مساحت سطح نرمالایز می‌شود. اگر مقادیر بیشتر از  $\theta^*$  تا حداکثر زاویه  $90^\circ$  در نظر گرفته شود، یک رابطه توانی به صورت زیر می‌تواند بین مساحت نرمال شده  $A_{\theta^*}$  و  $\theta^*$  برقرار شود [۲۱] (شکل ۷).

$$A_{\theta^*} = A_0 \left( \frac{\theta^*_{max} - \theta^*}{\theta^*_{max}} \right)^C \quad (1)$$

که در آن  $A_0$  مساحت نرمالایز شده متناظر با  $\theta^*$  است.

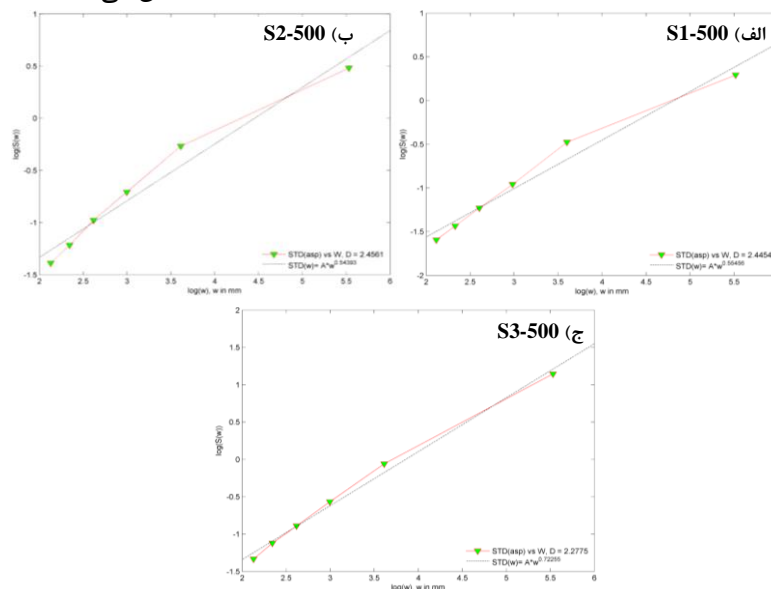
### ۳-۲-۲- روش زبری طولی سه بعدی<sup>۱۹</sup>

از آنجایی که سطوح درزه اجزای فراکتالی خود متشابه<sup>۲۰</sup> هستند، حداقل دو پارامتر برای مشخص نمودن سطح درزه مورد نیاز می‌باشد: بعد فراکتال D که طبیعتاً نشان می‌دهد

است). بعد فراکتال  $D$  می‌تواند از یک مقدار حداقلی ۲ برای یک سطح کاملاً صاف تا مقدار حداکثری ۳ برای یک سطح نامنظم و پیچیده تغییر کند. پارامتر  $S(w)$  به عنوان ریشه مربع میانگین  $RMS$  مقدار باقیمانده ارتفاع پروفیل از یک سطح برآزش شده بر نقاط نمونه در یک پنجره اندازه‌گیری با طول  $w$  و طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$S(w) = RMS(w) = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{m_i - 2} \sum (z_j - \bar{z})^2} \quad (3)$$

که در آن  $n_w$  مجموع تعداد پنجره‌های با طول  $w$ ، کمیت  $m$  برابر با تعداد نقاط در پنجره  $w_i$  و  $z_j$  باقیمانده از روند  $\bar{z}$  باقیمانده متوسط در پنجره  $w_i$  است. شکل ۹ مقادیر این دو پارامتر را برای سه سطح مورد مطالعه و در مقیاس  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقادیر پارامترهای فراکتالی  $D$  و  $A$  برای سه سطح  $S1$ ،  $S2$  و  $S3$  با ابعاد  $500 \times 500 \text{ mm}^2$

ناپیوستگی‌هایی با سطوح زبرتر، مقادیر تا دو را ناشی از افزایش موجداری و ناهمواری سطح خواهد داشت.

### ۳-۲-۴- زاویه متوسط سطح

در پژوهش‌های متعددی زاویه متوسط سطح به عنوان پارامتر کمی ساز سطح مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰، ۳۲]. با داشتن سطح مثلث‌بندی شده درزه، زاویه شیب  $(\alpha_k)$  بردار نرمال هر صفحه المانی (زاویه بین نرمال صفحه و محور قائم  $Z$ ) محاسبه شده و زاویه‌داری سه‌بعدی سطح  $(0 < \theta_s < 90)$  با استفاده از زاویای  $\alpha_k$  تمام صفحات المانی (مثلث‌ها) محاسبه می‌شود.

$$\theta_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\alpha_k)_i \quad (5)$$

بعدی [۲۳، ۲۴] ارائه شده بود. مزیت اصلی روش زبری طولی در مقایسه با دیگر روشها نظیر روش واریوگرام [۲۵] روش تابع ساختار [۲۶] و روش طیفی [۲۷] قابلیت این روش برای حذف روند کلی مسطح یک پروفیل است. برای یک پروفیل خود متشابه فراکتالی، یک رابطه توانی بین انحراف معیار ارتفاع‌های زبری پروفیل  $S(w)$  و طول پنجره اندازه‌گیری  $w$  به صورت رابطه (۲) برقرار است [۲۳]:

$$s(w) = A w^H \quad (2)$$

که  $A$  و  $H$  به ترتیب نشانگر هارست و ثابت تناسب هستند. نشانگر هارست بصورت  $H=E-D$  تعریف می‌شود که  $D$  و  $E$  به ترتیب بعد فراکتال و بعد اقلیدسی هستند (یعنی برای پروفیل دوبعدی  $E=2$  و برای یک سطح سه‌بعدی  $E=3$ )

### ۳-۲-۳- ضریب زبری $R_s$

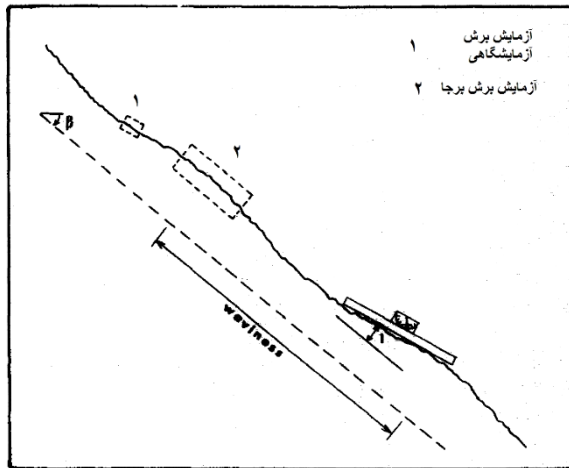
ضریب زبری  $R_s$  عموماً به خاطر سادگی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸-۳۱]. این پارامتر برای کمی سازی زبری سطح سنگ نیز استفاده شده است [۳۱، ۳۲]. تعریف زیر از ضریب زبری سطح  $R_s$  توسط السودانی ارائه شده است (رابطه (۴)) [۲۸]:

$$R_s = \frac{A_r}{A_n} \quad (4)$$

که  $A_r$  مساحت واقعی سطح و  $A_n$  مساحت اسمی سطح که برابر با تصویر مساحت واقعی سطح است. بر اساس این روش یک سطح کاملاً صاف مقداری معادل یک و برای



و باعث اتساع درزه می‌شوند (زبری مرتبه اول). ب- ناهمواری<sup>۲۶</sup> که به زبری‌های کوچک مقیاسی اطلاق می‌شود که بر روی زبری مرتبه اول قرار گرفته و در فرآیند برش برای آسیب مستعدتر هستند (زبری مرتبه دوم) (شکل ۱۰). مقاطع تهیه شده از سطوح مورد مطالعه و مفاهیم ذکر شده در شکل ۱۱ آمده است. هر سه مقطع از مرکز سطوح و در راستای جهت آزمایشات برش تهیه شده‌اند.



شکل ۱۰: مقیاس‌های مختلف زبری ناپیوستگی‌ها [۱۱]

سطوح مورد مطالعه در این پژوهش تقریباً سه حالت مختلف زبری را دارا هستند. در یک مقیاس مشخص سطح S1 دارای تموج کمتری بوده و بیشتر زبری‌های درجه دوم در سطح دیده می‌شود. سطح S2 هم دارای تموج و زبری مرتبه اول بوده و هم وجود زبری‌های درجه دوم به خوبی بر روی زبری مرتبه اول دیده می‌شود. این در حالی است که در سطح S3، بیشتر تموج و زبری نوع اول دیده می‌شود و زبری مرتبه دوم بر روی زبری‌های درجه اول کمتر دیده می‌شود. در شکل ۱۲ ابر نقاط سه سطح مذکور با مقیاس ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مربع نشان داده شده است و موارد فوق را می‌توان بر روی آنها مشاهده کرد.

پارامترهای زبری ذکر شده در بالا برای سه سطح ناپیوستگی، تا مقیاس ۴۰۰ cm<sup>2</sup> (مقیاس آزمایشگاهی) در نمودارهای شکل ۱۳ و تا مقیاس ۲۵۰۰ cm<sup>2</sup> در نمودارهای شکل ۱۴ ترسیم شده است. پنجره‌های در نظر گرفته شده جهت بررسی اثر مقیاس، به صورت هم مرکز و از ابعاد mm<sup>2</sup> ۵۰×۵۰ تا mm<sup>2</sup> ۵۰۰×۵۰۰ (شکل ۵) است.

در این رابطه m تعداد صفحات المانی (مثلث‌ها) است.

### ۳-۲-۵- پارامتر CLA

پارامتر CLA<sup>۲۴</sup> روش مشابهی برای تعیین زبری است که به عنوان میانگین خط (سطح) مرکزی شناخته می‌شود [۳۳].

$$CLA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (۶)$$

که در آن N تعداد نقاط اندازه‌گیری و y<sub>i</sub> ارتفاع هر نقطه از مقدار میانگین است.

### ۳-۲-۶- پارامتر Z<sub>2</sub>

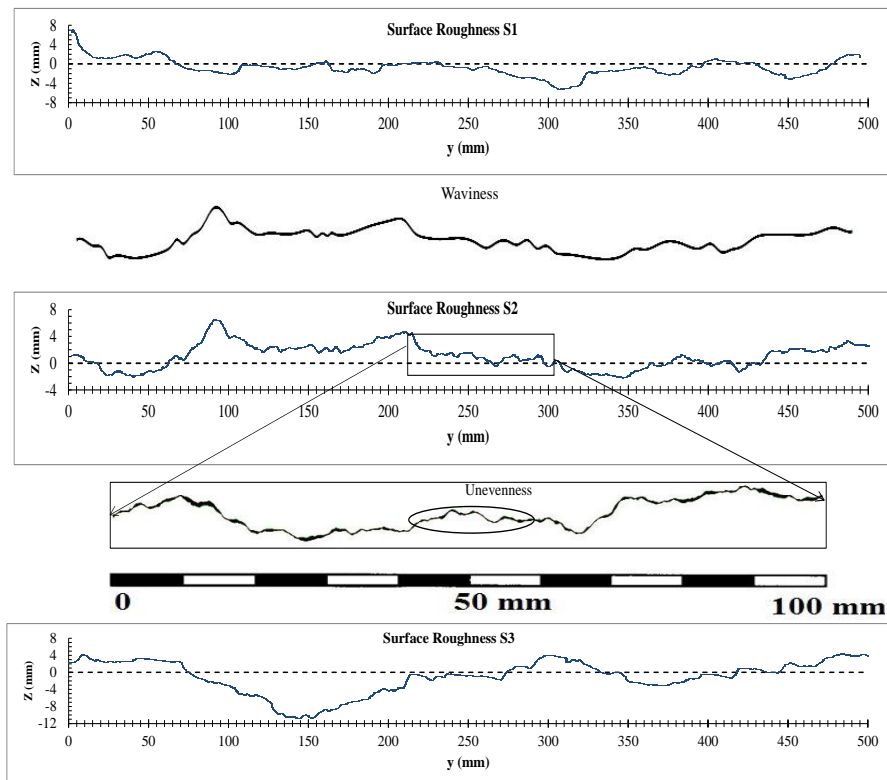
مایرز [۳۴] با استفاده از پارامتر RMS به عنوان خصوصیت زبری مبنا، سه پارامتر Z<sub>2</sub>، Z<sub>3</sub> و Z<sub>4</sub> را پیشنهاد نمود. که Z<sub>2</sub> مقدار از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه Z<sub>2</sub> به صورت خطی و برای پروفیل تعریف شده است، در اینجا سطوح به پروفیل‌هایی با فاصله‌داری ۰.۴ ابعاد هر سطح در جهت برش تبدیل شده و مقادیر Z<sub>2</sub> برای تمام پروفیل‌ها در هر مقیاس به صورت زیر محاسبه شده است.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} (z_{i+1} - z_i)^2}{\sum_{j=1}^M L_j}} \quad (۷)$$

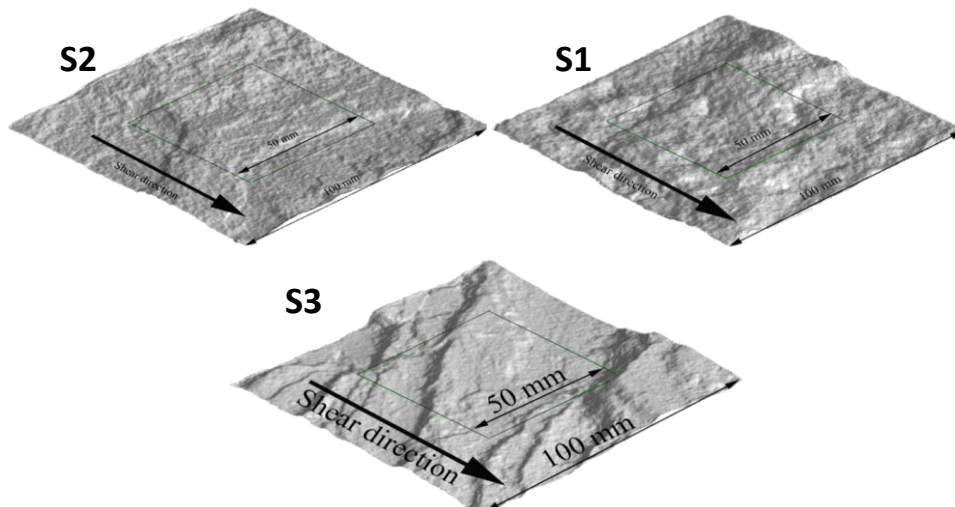
پارامترهای Z<sub>i</sub> و Z<sub>i+1</sub> ارتفاع دو نقطه مجاور بر روی یک پروفیل، N تعداد نقاط برداشت شده در هر پروفیل، x<sub>i</sub>، x<sub>i+1</sub> مختصات x دو نقطه مجاور و L طول هر پروفیل است. اندیس j نشان دهنده شماره پروفیل و M تعداد پروفیل‌ها است.

## ۴- بررسی اثر مقیاس بر زبری سطح درزه

جهت بررسی اثر مقیاس بر پارامترهای زبری اولاً باید خصوصیات سطوح مورد مطالعه به دقت بررسی شده و سپس ماهیت هر پارامتر در کمی سازی خصوصیات هندسی سطح تبیین گردد. بر اساس ISRM [۱۱]، زبری ناپیوستگی‌ها با توجه به مقیاس از دو جزء زبری تشکیل شده‌اند: الف- موج‌داری<sup>۲۵</sup> که به تموج‌های بزرگ مقیاسی اطلاق می‌شود که به خاطر ابعاد زیادتر در جابجایی‌های برشی بریده نشده



شکل ۱۱: مقاطع تهیه شده از سطوح S1، S2، S3 و تعیین اجزاء زبری موجداری و ناهمواری

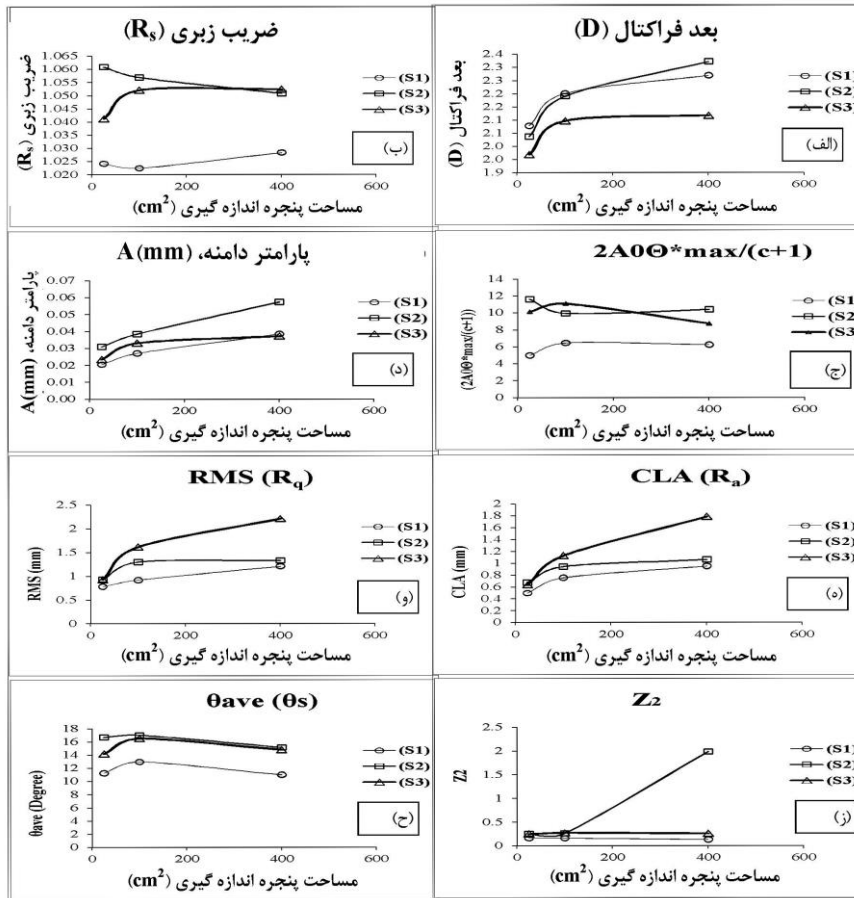


شکل ۱۲: ابر نقاط سطوح S1، S2 و S3 با مقیاس  $100 \times 100 \text{ mm}^2$

در مقیاس مذکور، مقادیر این پارامتر، برای سطوح S2 کاهش و برای سطح S3 افزایش را نشان می‌دهد. بعد از مقیاس  $400 \text{ cm}^2$  مقدار  $R_s$  برای هر سه سطح تقریباً ثابت می‌ماند. در مجموع مقیاس تأثیر زیادی بر روی  $R_s$  ندارد چون حداکثر تغییرات مقدار  $R_s$  برای سطوح S1 و S2 کمتر از یک درصد و برای S3 برابر با  $1/7$  درصد است. بنابراین می‌توان گفت پارامتر  $R_s$  تقریباً مستقل از مقیاس است.

#### ۴-۱- تغییرات ضریب زبری $R_s$

برای اندازه‌گیری پارامترهای زبری مختلف یک صفحه میانگین به طور جداگانه برای هر پنجره نمونه برداری در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارها، پارامتر زبری  $R_s$  سه رفتار متفاوت در مقیاس کمتر از  $400 \text{ cm}^2$  از خود نشان می‌دهد. مقادیر  $R_s$  در مورد زبری سطح S1 از مقیاس ۲۵ تا  $400$  سانتی‌متر مربع ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



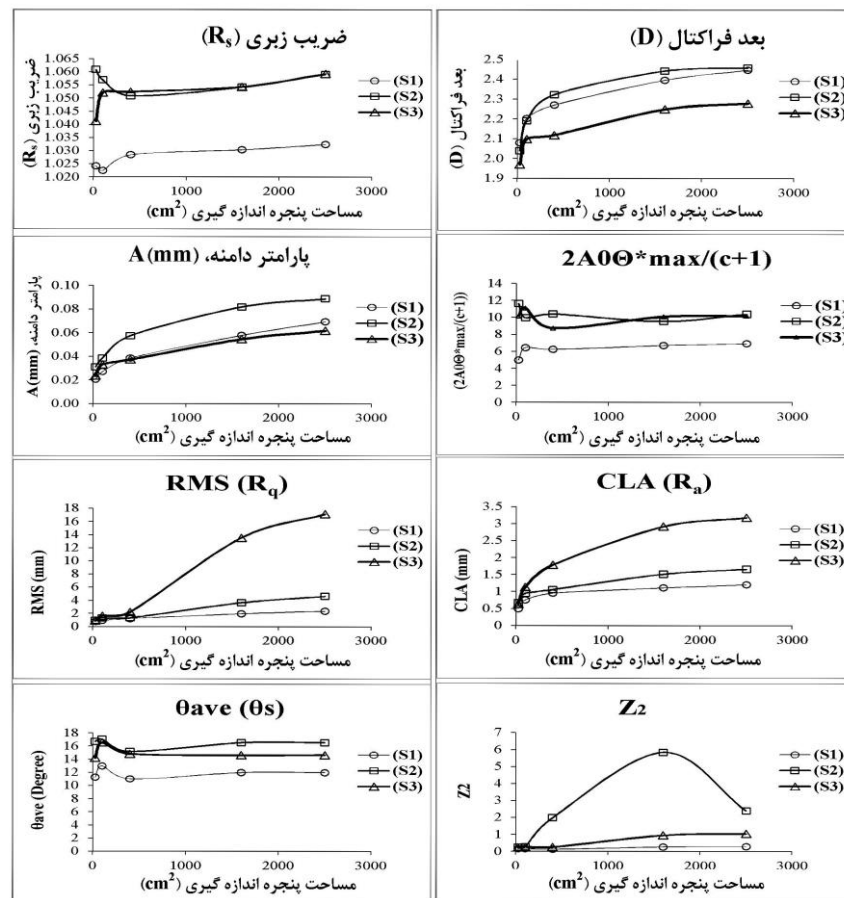
شکل ۱۳: تغییرات پارامترهای مختلف تعیین کننده زبری سطح نسبت به مقیاس آزمایشگاهی (تا مقیاس  $400\text{cm}^2$ ) برای سه سطح مورد مطالعه

#### ۴-۲- تغییرات پارامترهای فراکتالی D و A

با توجه به نمودارهای رسم شده مربوط به پارامترهای فراکتالی D و A در شکل ۱۳ و شکل ۱۴، اثر مقیاس بر این دو پارامتر مثبت بوده است. بعد فراکتال D برای هر سه سطح افزایش می‌یابد اما روند افزایشی این پارامتر تا مقیاس  $400\text{cm}^2$  برای سطوح مختلف متفاوت است. پس از این مقیاس تقریباً شیب منحنی‌ها به صفر می‌رسد. از مقیاس  $1600\text{cm}^2$  تا  $2500\text{cm}^2$  تغییرات مقدار بعد فراکتال D کمتر از ۲ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مقیاس‌های بالاتر از  $2500\text{cm}^2$  پارامتر D مستقل از مقیاس خواهد شد. پارامتر دامنه A نیز با افزایش مقیاس افزایش می‌یابد اما روند افزایش این پارامتر نشان می‌دهد حداقل در بازه مورد مطالعه این پارامتر مستقل از مقیاس نیست.

نتایج فردین [۷]، ثابت شدن مقادیر هر دو پارامتر D و A را پس از مقیاس  $1600\text{cm}^2$  نشان داده بود. اما در

پژوهش‌های وی مقیاس اثر منفی بر پارامترهای D و A داشته است. تناقض نتایج فردین با پژوهش حاضر را می‌توان ناشی از آن دانست که فردین در پژوهش‌های خود به خاطر محدودیت تجهیزات مجبور به کم کردن فاصله نقاط اندازه‌گیری با افزایش مقیاس شده است. با افزایش فاصله نقاط اندازه‌گیری عملاً زبری‌های با مقیاس کوچک‌تر، از محاسبات حذف شده و پارامترهای سطحی، با زبری کمتر از مقدار واقعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که منجر به اثر منفی مقیاس بر پارامترهای زبری خواهد شد. در پژوهش حاضر فاصله نقاط اندازه‌گیری برای تمام مقیاس‌ها  $0.25$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به خصوصیتی که برای این دو سطح ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت، زبری‌های درجه دوم در یک سطح بیشتر بر پارامتر بعد فراکتال D تاثیرگذار بوده و زبری‌های درجه اول بر پارامتر A تاثیرگذارند.



شکل ۱۴: تغییرات پارامترهای مختلف تعیین‌کننده زبری سطوح نسبت به مقیاس (تا مقیاس  $2500 \text{ cm}^2$ ) برای سه سطح مورد مطالعه

مشابه یکدیگر بوده و تا مقیاس  $400 \text{ cm}^2$  مقادیر این پارامترها افزایش می‌یابد. پس از این مقیاس مقادیر این دو پارامتر برای سطوح S1 و S2 مستقل از مقیاس خواهد بود. اما در سطح S3 با افزایش مقیاس مقادیر این دو پارامتر نیز افزایش می‌یابند. با توجه به ماهیت هندسی سطح S3 (غالب بودن زبری درجه اول نسبت به زبری‌های درجه دوم) و ماهیت پارامترهای RMS و CLA که پارامترهای ارتفاعی بوده و بیشتر منعکس‌کننده زبری درجه اول سطح درزه هستند، می‌توان نتیجه گرفت در سطوحی که زبری‌های درجه دوم (ریز مقیاس) در هندسه سطح آنها ناچیز باشد، مقادیر پارامترهای ارتفاعی در آنها نسبت به مقیاس افزایش خواهد یافت. اما در سطوحی که متشکل از زبری‌های درجه دوم (ریز مقیاس) باشد، پارامترهای ارتفاعی مانند RMS و CLA در مقیاسهای بیشتر از مقیاس آزمایشگاهی مستقل از مقیاس هستند.

پارامتر هندسی زاویه میانگین سطح ( $\theta_s$ ) یا ( $\theta_{ave}$ ) برای تمامی سطوح، از مقیاس  $25 \text{ cm}^2$  تا  $400 \text{ cm}^2$  ابتدا افزایش و سپس کاهش ناچیزی نشان می‌دهد و در مقیاس‌های

#### ۳-۴- تغییرات پارامتر زبری گراسلی

پارامتر زبری گراسلی ( $1/C+12A_0\theta^*_{max}$ ) در مقیاس کمتر از  $400 \text{ cm}^2$  بسته به نوع سطح رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهد. از مقیاس  $25 \text{ cm}^2$  تا  $100 \text{ cm}^2$ : پارامتر زبری گراسلی در این بازه برای سطح S1 و S3 افزایش و برای سطح S2 کاهش نشان می‌دهد.

از مقیاس  $100 \text{ cm}^2$  تا  $400 \text{ cm}^2$ : پارامتر زبری گراسلی در این بازه برای سطح S1 و S2 تقریباً ثابت بوده و برای سطح S3 کاهش نشان می‌دهد.

در مقیاس‌های بزرگتر از  $400 \text{ cm}^2$ : در سطح S1 که بیشتر متشکل از ناهمواری‌های درجه دوم است پارامتر زبری گراسلی مستقل از مقیاس می‌شود. این پارامتر در سطوح S2 و S3 تا مقیاس  $1600 \text{ cm}^2$  تغییرات ناچیزی (کمتر از ۱۵ درصد) داشته و پس از آن مستقل از مقیاس می‌شود.

#### ۴-۴- تغییرات دیگر پارامترهای زبری

بررسی دیگر پارامترهای هندسی سطح نشان می‌دهد، تغییرات پارامترهای RMS و CLA نسبت به مقیاس تقریباً

بزرگتر از  $400 \text{ cm}^2$  تقریباً مستقل از مقیاس می‌شود. این رفتار تقریباً مشابه رفتار پارامتر زبری گراسلی است. بنابراین می‌توان گفت پارامترهای هندسی زاویه ای سطح که بیشتر بیان کننده چگونگی توزیع زبری‌های درجه دوم هستند، برای تمامی سطوح، در مقیاس‌های بزرگتر از مقیاس آزمایشگاهی مستقل از مقیاس می‌شوند.

در مورد پارامتر  $Z_2$  با توجه به اینکه این پارامتر به صورت خطی و برای پروفیل تعریف شده‌است، سطوح درزه به پروفیل‌هایی با فاصله داری ۴٪ ابعاد هر سطح در جهت برش تبدیل شده و از مقادیر  $Z_2$  پروفیل‌ها میانگین‌گیری شده است. در واقع در پژوهش حاضر تنها پارامتری است که به صورت دوبعدی محاسبه شده و به سه‌بعد تعمیم داده شده است. به طور کلی مقادیر پارامتر مذکور برای سطوح  $S_1$  و  $S_3$  مستقل از مقیاس بوده و برای سطح  $S_2$  تا مقیاس  $1600 \text{ cm}^2$  افزایش و پس از آن کاهش یافته است. پارامتر  $Z_2$  ریشه میانگین مجذور مشتق اول پروفیل یا به عبارتی میانگین شیب دو نقطه مجاور در پروفیل است. بنابراین با تعمیم آن به سطح انتظار می‌رود رفتاری مانند پارامترهای هندسی زاویه‌ای سطح داشته باشد. برای سطوح  $S_1$  و  $S_3$  این فرضیه صادق است و برای سطح  $S_2$  نیز انتظار می‌رود پس از مقیاس  $2500 \text{ cm}^2$  این پارامتر مستقل از مقیاس شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت اثر مقیاس بر رفتار برشی درزه‌های سنگی در این پژوهش به بررسی اثر مقیاس بر پارامترهای هندسی سطوح درزه، رفتار برشی درزه‌ها و میزان آسیب ایجاد شده در سطوح درزه حین برش پرداخته شده است.

بررسی مطالعات انجام شده در زمینه اثر مقیاس بر رفتار برشی درزه‌ها نشان می‌دهد پارامترهای هندسی و مکانیکی درزه با مقیاس تغییر می‌کنند. اما به خاطر گستردگی و پیچیدگی این حوزه مطالعاتی نتایجی که در این زمینه ارائه شده متفاوت بوده و بعضاً در تضاد با یکدیگر هستند. برخی از مطالعات کاهش در مقاومت و زبری را با افزایش ابعاد ناپیوستگی نشان داده‌اند. مطالعات دیگر وجود اثر مثبت مقیاس را نشان داده‌اند و برخی دیگر ترکیبی از اثرات مثبت و منفی و یا حتی عدم تأثیر مقیاس را نشان داده‌اند. بعلاوه در بیشتر این مطالعات، هندسه درزه‌ها به صورت دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است که منجر به خطاهایی در

ارزیابی اثر مقیاس بر رفتار درزه‌ها شده است. بنابراین در این پژوهش به بررسی دقیق‌تر اثر مقیاس بر پارامترهای سه بعدی تعیین کننده هندسه درزه پرداخته شده است. یکی از عوامل مهمی که در ارزیابی اثر مقیاس بر پارامترهای سطح درزه تأثیرگذار می‌باشد فاصله نقاط اندازه‌گیری است. در برخی از مطالعات به خاطر بالا رفتن حجم محاسبات در مقیاس‌های بزرگ، فاصله نقاط اندازه‌گیری سطح بیشتر در نظر گرفته شده است که منجر به از دست دادن زبری‌های کوچک مقیاس در محاسبات و در نتیجه خطا در اندازه‌گیری پارامترهای هندسی و تغییرات آنها نسبت به مقیاس شده است. در پژوهش حاضر فاصله نقاط اندازه‌گیری برای تمام مقیاس‌ها ثابت و برابر با  $0.25$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به علاوه در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه اثر مقیاس، یک سطح در مقیاس‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در این پژوهش سه سطح با ماهیت‌های هندسی متفاوت با ابعاد بیشتر از  $50 \times 50 \text{ cm}^2$  در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه سطوح در مقیاس‌های مختلف فراهم شود. براساس مطالعات صورت گرفته در این تحقیق می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

- پارامتر هندسی  $R_s$  در مقیاس‌های کمتر از  $400 \text{ cm}^2$  بسته به هندسه سطح رفتار متفاوتی را با تغییر مقیاس نشان می‌دهد. اما بعد از مقیاس  $400 \text{ cm}^2$  مقدار  $R_s$  برای هر سه سطح تقریباً ثابت بوده و مستقل از مقیاس است.
- اثر مقیاس بر پارامترهای فراکتالی  $D$  (بعد فراکتال) و  $A$  (پارامتر دامنه) مثبت می‌باشد. در مورد پارامتر  $D$ ، با توجه به روند نمودارها برای سه سطح انتظار می‌رود در مقیاس‌های بیشتر از  $2500 \text{ cm}^2$  این پارامتر مستقل از مقیاس باشد. پارامتر دامنه  $A$  نیز با افزایش مقیاس افزایش می‌یابد اما روند افزایش این پارامتر نشان می‌دهد حداقل در بازه مورد مطالعه این پارامتر مستقل از مقیاس نیست. نتایج فردین (۲۰۰۱)، اثر منفی مقیاس را همراه با ثابت شدن مقادیر هر دو پارامتر  $D$  و  $A$  پس از مقیاس  $1600 \text{ cm}^2$  نشان داده بود. تناقض نتایج فردین با پژوهش حاضر را می‌توان ناشی از آن دانست که فردین در پژوهش‌های خود به خاطر محدودیت تجهیزات مجبور به کم کردن فاصله نقاط اندازه‌گیری با افزایش مقیاس شده است. با



ارتفاعی مانند RMS و CLA در مقیاس‌های بیشتر از مقیاس آزمایشگاهی مستقل از مقیاس هستند.

- پارامتر هندسی زاویه میانگین سطح ( $\theta_s$ ) یا ( $\theta_{ave}$ ) برای تمامی سطوح، از مقیاس  $25 \text{ cm}^2$  تا  $400 \text{ cm}^2$  ابتدا افزایش و سپس کاهش ناچیزی نشان می‌دهد و در مقیاس‌های بزرگتر از  $400 \text{ cm}^2$  تقریباً مستقل از مقیاس می‌شود. این رفتار تقریباً مشابه رفتار پارامتر زبری گراسلی است. بنابراین می‌توان گفت پارامترهای هندسی زاویه ای سطح که بیشتر بیان کننده چگونگی توزیع زبری‌های درجه دوم می‌باشند، برای تمامی سطوح، در مقیاس‌های بزرگتر از مقیاس آزمایشگاهی تقریباً مستقل از مقیاس می‌شوند.

- پارامتر  $Z2$  ریشه میانگین مجذور مشتق اول پروفیل یا به عبارتی میانگین شیب دو نقطه مجاور در پروفیل است. این پارامتر به صورت خطی و برای پروفیل تعریف شده است بنابراین با تعمیم آن به سطح انتظار می‌رود رفتاری مانند پارامترهای هندسی زاویه ای سطح داشته باشد. نتایج نیز نشان می‌دهد مقادیر پارامتر مذکور برای سطوح  $S1$  و  $S3$  مستقل از مقیاس بوده و برای سطح  $S2$  نیز انتظار می‌رود پس از مقیاس  $2500 \text{ cm}^2$  این پارامتر مستقل از مقیاس شود.

- در مجموع می‌توان گفت پارامترهای زاویه ای که بیان کننده زبری‌های درجه دوم هستند در مقیاس آزمایشگاهی (کمتر از  $400 \text{ cm}^2$ ) بسته به نوع هندسه سطح، تغییراتی نسبت به مقیاس از خود نشان می‌دهند اما در مقیاس‌های بزرگتر از مقیاس آزمایشگاهی مستقل از مقیاس می‌باشند. اما پارامترهای هندسی ارتفاعی که بیشتر متاثر از زبری‌های درجه اول سطح می‌باشند، در سطوحی که دارای زبری‌های درجه اول سطح (ناهمواری‌های بزرگ مقیاس) هستند همواره با افزایش مقیاس افزایش می‌یابند. روند افزایش این پارامترها نشان می‌دهد، تغییرات این پارامترها در مقیاس‌های بزرگتر از  $2500 \text{ cm}^2$  مستقل از مقیاس است. البته نتیجه گیری‌های دقیق تر در این زمینه مستلزم بررسی مقیاس‌هایی بزرگتر از  $2500 \text{ cm}^2$  است.

افزایش فاصله نقاط اندازه‌گیری عملاً زبری‌های با مقیاس کوچکتر از محاسبات حذف شده و پارامترهای سطحی با زبری کمتر از مقدار واقعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که منجر به اثر منفی مقیاس بر پارامترهای زبری خواهد شد. در پژوهش حاضر فاصله نقاط اندازه‌گیری برای تمام مقیاس‌ها  $0.25$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

- مقایسه نمودارهای مربوط به پارامترهای  $D$  و  $A$  نشان می‌دهد مقدار پارامتر  $D$  برای سطح  $S3$  کمتر از سطح  $S1$  بوده و پارامتر  $A$  این سطح بیشتر از سطح  $S1$  است. با توجه به خصوصیتی که برای این دو سطح ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت، زبری‌های درجه دوم در یک سطح بیشتر بر پارامتر بعد فراکتال  $D$  تاثیرگذار بوده و زبری‌های درجه اول بر پارامتر  $A$  تاثیرگذارند.

- پارامتر زبری گراسلی ( $2A_0\theta_{max}^*/C+1$ ) در مقیاس کمتر از  $400 \text{ cm}^2$  بسته به نوع سطح رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهد. مقادیر این پارامتر برای سطح  $S1$  پس از مقیاس  $400 \text{ cm}^2$  ثابت می‌شود. در سطوح  $S2$  و  $S3$  پس از مقیاس  $1600 \text{ cm}^2$  مقادیر این پارامتر ثابت می‌شود. به طور کلی تغییرات پارامتر زبری گراسلی نسبت به مقیاس برای تمام سطوح کمتر از ۱۵ درصد است.

- بررسی دیگر پارامترهای هندسی سطح نشان می‌دهد، تغییرات پارامترهای RMS و CLA نسبت به مقیاس تقریباً مشابه یکدیگر بوده و تا مقیاس  $400 \text{ cm}^2$  مقادیر این پارامترها افزایش می‌یابد. پس از این مقیاس مقادیر این دو پارامتر برای سطوح  $S1$  و  $S2$  مستقل از مقیاس خواهد بود. اما در سطح  $S3$  با افزایش مقیاس مقادیر این دو پارامتر نیز افزایش می‌یابند. با توجه به ماهیت هندسی سطح  $S3$  (غالب بودن زبری درجه اول نسبت به زبری‌های درجه دوم) و ماهیت پارامترهای RMS و CLA که پارامترهای ارتفاعی بوده و بیشتر منعکس کننده زبری درجه اول سطح درزه می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت در سطوحی که زبری‌های درجه دوم (ریز مقیاس) در هندسه سطح در آنها ناچیز باشد، مقادیر پارامترهای ارتفاعی در آنها نسبت به مقیاس افزایش خواهد یافت. اما در سطوحی که بیشتر متشکل از زبری‌های درجه دوم (ریز مقیاس) باشد، پارامترهای

مراجع

rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis.” *Eng Geol* 72(3-4):181-199.

[13] Lee H-S, Ahn K-W. 2004. “A prototype of digital photogrammetric algorithm for estimating roughness of rock surface.” *Geosci J* 8(3):333-341.

[14] Haneberg W. 2007. “Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds.” In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T (eds) *Rock mechanics: meeting society’s challenges and demands; proceedings of the 1st Canada-US rock mechanics symposium, Vancouver, Canada, 27-31 May 2007*. Taylor and Francis, London, pp 101-106.

[15] Baker BR, Gessner K, Holden E-J, Squelch AP. 2008. “Automatic detection of anisotropic features on rock surfaces.” *Geosph* 4(2): 418-428.

[16] Grasselli G, Wirth J, Egger P. 2002. “Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing.” *Int J Rock Mech Min Sci* 39(6):789-800.

[17] Hong ES, Kwon TH, Song KI, Cho GC. 2006. “Observation of the Degradation Characteristics and Scale of Unevenness on Three-dimensional Artificial Rock Joint Surfaces Subjected to Shear.” *Rock Mech Rock Eng* 49:3-17.

[18] Nasserri MHB, Tatone BSA, Grasselli G, Young RP. 2009. “Fracture toughness and fracture roughness interrelationship in thermally treated Westerly granite.” *Pure Appl Geophys* 166(5): 801-822.

[19] Lanaro F. 2000. “A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures.” *Int J Rock Mech Min Sci* 37:1195-210.

[20] Belem T, Homand-Etienne F, Souley M. 1997. “Fractal analysis of shear joint roughness.” *Int J Rock Mech Min Sci* 34: (3-4), Paper No. 130.

[21] Tatone, B.S.A., Grasselli, G., 2009. “A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials. *Rev. Sci. Instrum.* 80, 1-10.

[22] Grasselli G. 2001. “Shear strength of rock joints based on quantified surface description.” Ph.D. thesis, Univ. Polytechnique Federale de Lausanne.

[23] Malinverno, A., 1990. “A simple method to estimate the fractal dimension of a self-affine series.” *Geophys. Res. Lett.* 17, 1953-1956. Mas Ivars, D., Pierce, M.E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D.O., Young, R.P.,.

[24] Kulatilake PHSW, Um J. 1999. “Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method.” *Int J Rock Mech Min Sci* 36(1):5-18.

[1] Barton N, Choubey V. 1977. “The shear strength of rock joints in theory and practice”. *Rock Mech and rock engineering*.10:1-54.

[2] Bandis S, Lumsden AC, Barton NR. 1981. “Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints”. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18(1):1-21.

[3] Hencher, S. R., Toy, J.P., Lumsden, A.C., 1993. “Scale dependent shear strength of rock joints.” *Second International Workshop on Scale Effects in Rock Masses*. Taylor & Francis, Lisbon, Portugal, pp. 233-240.

[4] Cravero M, Iabichino G, Piovano V. 1995. “Analysis of large joint profiles related to rock slope instabilities”. In: 8th ISRM congress, Tokyo, Japan, 25-29 September 1995. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 423-428.

[5] Cravero M, Iabichino G, Ferrero AM. 2001. “Evaluation of joint roughness and dilatancy of schistosity joints”. In: Sarkka P, Eloranta P (Eds) *Rock mechanics—a challenge for society; proceedings of Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001*.

[6] Leal Gomes, M.J.A., 2003. “Some new essential questions about scale effects on the mechanics of rock mass joints.” *10th ISRM Congress: Technology Roadmap for Rock Mechanics*. South African Institute of Mining and Metallurgy, Vila Real, pp. 721-728.

[7] Fardin, N., Stephansson, O., Jing, L., 2001. “The scale dependence of rock joint surface roughness.” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 659-669.

[8] Fardin, N., Feng, Q., Stephansson, O., 2004. “Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness.” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 329-335.

[9] Fardin N. 2008. “Influence of structural non-stationarity of surface roughness on morphological characterization and mechanical deformation of rock joints”. *Rock Mech Rock Eng*.

[10] Tatone, B.S.A., Grasselli, G., 2012. “An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high-resolution surface measurements. *Rock Mech. Rock. Eng.* 1-25.

[11] ISRM, 1978. International Society for Rock Mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: “suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses.” *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 15(6): 319-368.

[12] Chae BG, Ichikawa Y, Jeong GC, Seo YS, Kim BC. 2004. “Roughness measurement of

- [30] Gokhale, A. M. Underwood E. E. 1990. "A general method for estimation of fracture surface roughness: Part I. Theoretical aspects." Mechanical Behavior Metallurgical Transactions A. Volume 21, Issue 5, pp 1193-1199.
- [31] Lee, H. S. & Ahn, K. W. 2004. "A Prototype of Digital Photogrammetric Algorithm for Estimating Roughness of Rock Surface. Geosciences, 8/3: 333-341.
- [32] Belem T, Homand-Etienne F, Souley M. 2000. "Quantitative parameters for rock joint surface" roughness. Rock Mech Rock Eng 33(4):217-242.
- [33] American standard Association. 1955. "Surface roughness, waviness and lay," ASA B46.1.
- [34] Myers M. O. 1962. "Characterization of surface roughness." Wear 5, P 182-189.
- [25] Orey S. 1970. "Gaussian simple functions and Hausdorff dimension of level crossing." Z. Wahrscheinlichkeitstheor. Verw Gebiete ;15:249-56.
- [26] Odling NE. 1994. "Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficient." Rock Mech Rock Eng;27:135-53.
- [27] Berry MV, Lewis ZV. 1980. "On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function." R Soc London Proc Ser A;370:459-84.
- [28] El Soudani, S. M. 1978. "Profilometric analysis of fractures." Metallography, 11, 247-336.
- [29] Lange D. A., Jennings H. M. & Shah S. P. 1993. "Relationship between fracture surface roughness and fracture behaviour of cement paste and mortar." J. Am. Ceram. Soc., 3, 589-597.

15 phase measurement technique

16 [www.shining3d.com](http://www.shining3d.com)

17 Standard Tessellation Language

18 - Triangular irregular networks

19 - 3D Roughness-Length Method

20 - Self-affine

21 - Structure function method

22 - Spectral method

23 Root-Mean-Square

24 - Center Line Average

25 - Waviness

۲۶ - Unevenness

1 - Cravero et al.

2 - Leal-Gomes

3 - Self-affine

4 - Stationary threshold

5 - Smooth planar

6 - Planar, Undulating and Stepped

7 laser ranging devices

8 close-range terrestrial photogrammetric systems

9 structured light projection (Optical 3D scanner)

10 stereo-topometric cameras

11 slit scanners (laser scanners)

12 -resolution

13 structured light technique

14 stereo vision technique