

(مقاله پژوهشی)

ارایه روشی جدید برای شبیه‌سازی هندسی آماری زبری ناپیوستگی‌ها

عین‌الله عامری^۱، سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}، محمدرضا ربیعی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: تیر ۱۳۹۹، پذیرش: بهمن ۱۳۹۹)

چکیده

شبیه‌سازی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی توده‌سنگ، همواره یکی از مهم‌ترین اهداف در مهندسی سنگ بوده است. زبری یکی از ویژگی‌های مهم هندسی ناپیوستگی به شمار می‌آید. پستی‌وبلندی‌های ناپیوستگی عامل تمایز زبری ناپیوستگی‌ها از یکدیگر است. اختصاص دادن مقدار عددی به هر زبری در عمل ناممکن است؛ بنابراین به ناپیوستگی‌هایی که پستی بلندی آن‌ها شبیه به هم باشند، مقدار زبری یکسانی اختصاص داده می‌شود. در تحلیل این‌گونه مسائل، از میان تعداد زیاد ناپیوستگی‌ها با زبری‌های مشابه یک زبری (ناپیوستگی) با یک نیم‌رخ هندسی مشخص انتخاب می‌شود. در روش شبیه‌سازی زبری ناپیوستگی (DRS) برای مقدار مشخصی از زبری، حالت‌های مختلف ناهمواری ناپیوستگی شبیه‌سازی می‌شود. در این روش، زبری به صورت چند زوج پاره خط متصل به هم مدل‌سازی می‌شود به گونه‌ای که هر زوج دارای یک ناهمواری کوژ یا کاو باشد. به این ترتیب یک سطح ناپیوستگی با زبری مثلثی ایجاد می‌شود. روش DRS با استفاده از چیدمان‌های متفاوت از زوج پاره خط‌ها، می‌تواند ناپیوستگی‌های متفاوتی تولید کند که مقدار زبری آن‌ها تقریباً یکسان باشد. نتایج بررسی اعتبار سنجی روش DRS برای JRC‌های مختلف نشان می‌دهد مقدار شاخص میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) برای قسمت‌های مختلف یک سطح ناپیوستگی شبیه‌سازی شده، همواره کمتر از ده درصد است. همچنین مقدار MAPE به ازای صدمبار تکرار روش DRS، برای قسمتی از سطح شبیه‌سازی شده که به صورت تصادفی تعیین می‌شود کمتر از شش درصد است. این روش اساس اضافه شدن ویژگی زبری در شبکه شکستگی مجزا (DFN) را فراهم می‌کند و کمک شایانی در راستای دقیق‌تر شدن شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های مکانیک سنگی خواهد بود.

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی، زبری ناپیوستگی و JRC

*عهده‌دار مکاتبات: jalalime@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و بیان زبری در مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی پردازند.

۲-۱- اندازه‌گیری زبری ناپیوستگی

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری زبری ارائه شده است؛ که اساس همه‌ی آن‌ها مشخص نمودن مقدار پستی و بلندی‌های سطح است. از آن‌جا که مقدار زبری وابسته به مقیاس است روش‌های اندازه‌گیری به دودسته آزمایشگاهی و صحرایی تقسیم می‌شود

۲-۱-۱- روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری زبری

روش ارائه شده توسط بارتون برای اندازه‌گیری زبری سطح ناپیوستگی یکی از ساده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری است در این روش از ابزاری موسوم به شانه بارتون استفاده می‌شود. شانه بارتون متشکل از مجموعه سوزن‌هایی است که در راستای عمود بر سطح ناپیوستگی نسبت به محور شانه قابلیت لغزش دارند. با جای گرفتن این ابزار بر روی سطح ناپیوستگی و حرکت سوزن‌ها، هندسه سطح ناپیوستگی توسط سوزن‌ها تعیین می‌شود. پس از ترسیم سطح ناپیوستگی، مقدار زبری سطح از طریق مقایسه آن با نیم‌رخ‌های استاندارد ده‌گانه ارائه شده توسط بارتون تعیین می‌شود [۹].

یکی دیگر از این روش‌ها، روش نیم‌رخ پیمای نوک سوزنی است. دوپلی^۲ و همکاران، در این روش به منظور ایجاد و تعیین هندسه ناپیوستگی، سیستم اندازه‌گیری رایانه‌ای را توسعه داده‌اند که شامل قسمت‌های مکانیکی، واحد کنترل و واحد پردازش رایانه‌ای است. در این روش نگارنده‌ای بر روی سطح نمونه حرکت می‌کند و میزان جابه‌جایی عمودی را نسبت به یک معیار ثابت اندازه‌گیری می‌کند. با حرکت سوزن بر روی کل سطح، داده‌های زبری تمامی نقاط ناپیوستگی به دست می‌آید [۲].

روش دیگر، روش اندازه‌گیری توپوگرافی^۳ (ATS) بر پایه تهیه تصویر از سطح، در دو جهت با مقیاس‌های رنگی، متفاوت است. در این روش الگوهای مختلف نور سفید به سطح تابیده می‌شود و انعکاس آن‌ها توسط دو دوربین که در دو طرف سطح مورد نظر قرار گرفته، ثبت می‌شود. با پردازش تصاویر حاصل از دو دوربین، الگوی دوبعدی از سطح با دقت بالا حاصل می‌شود [۳].

ناپیوستگی‌های توده‌سنگ دارای ویژگی‌هایی همچون جهت‌داری، فاصله‌داری، پایایی، بازشدگی و زبری است. به جز مقادیر پایایی و زبری در فضای سه‌بعدی، مقدار عددی دیگر ویژگی‌ها با اندازه‌گیری مستقیم قابل بیان هستند و اختلاف بین مقدار واقعی و اندازه‌گیری شده بستگی به خطاهای اندازه‌گیری دارد. مقدار عددی زبری که نشان‌دهنده‌ی پستی و بلندی‌های سطح ناپیوستگی است با روش‌های غیرمستقیم تعیین می‌شود. تحقیقات زیادی توسط عده‌ای از پژوهشگران همچون بارتون و چوبی [۱]، دوپلی و همکاران [۲]، گراسلی و همکاران [۳] و هردا [۴] در مورد برداشت زبری در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی و در مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده است. همچنین توسط پژوهشگران سایر زمینه‌های مهندسی مختلف روش‌هایی برای بیان زبری ارائه شده است. در مهندسی سنگ، روش ضریب زبری ناپیوستگی (JRC^1) بارتون متداول‌تر است، به طوری که پژوهشگران زیادی همچون تسه و کوردن [۵]، یو و وایساده [۶]، تاتون و گراسلی [۷]، جانگ و همکاران [۸] به ارائه رابطه بین JRC و دیگر روش‌های بیان زبری پرداخته‌اند. در این مقاله منظور از بیان مقدار زبری مقدار JRC آن است. موضوع تحقیق این مقاله با پژوهش‌های گذشته تفاوت اساسی دارد. در پژوهش‌های پیشین به اندازه‌گیری دقیق و بیان درست زبری پرداخته شده است ولی این تحقیق با فرض مشخص بودن مقدار زبری، به دنبال شبیه‌سازی سطح ناپیوستگی آن است. در واقع هدف این پژوهش نوعی تحلیل برگشتی از بیان زبری است به عبارت دیگر در این تحقیق قرار است با معلوم بودن مقدار JRC ، سطح ناپیوستگی آن شبیه‌سازی شود. از آن‌جا که چندین ناپیوستگی با پستی و بلندی‌های مختلف می‌توانند دارای مقدار زبری یکسانی باشند، بنابراین برای یک مقدار زبری مشخص نیز می‌توان ناپیوستگی‌های با پستی و بلندی‌های مختلفی فرض کرد.

۲- مروری بر روش‌های اندازه‌گیری و کمی‌سازی زبری

مقدار زبری ناپیوستگی وابسته به مقیاس است و در بیشتر روش‌ها، قضاوت مهندسی نیز بر مقدار عددی آن تأثیر دارد. این موارد موجب شده است پژوهشگران به ارائه

با استفاده از روش‌های مختلف تجربی، آزمایشگاهی و تحلیلی است.

۲-۲-۱- روش‌های آزمایشگاهی کمی‌سازی زبری

روش مقایسه چشمی، اولین و پرکاربردترین روش کمی‌سازی زبری ناپیوستگی است. در این روش بارتون به‌منظور بیان زبری ناپیوستگی، پس از انجام آزمایش‌های زیاد پیشنهاد مقایسه نیم‌رخ به طول ۱۰ سانتی‌متر از زبری ناپیوستگی را با نیم‌رخ‌های استاندارد ده‌گانه داده است. این اساس، ضریب زبری ناپیوستگی (JRC) متناسب با نیم‌رخ‌ها که بیشترین شباهت را با زبری ناپیوستگی داشته باشد، انتخاب می‌شود [۱، ۱۱]. لیو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ با دقت بالایی طول‌های استاندارد آزمایشگاهی بارتون (۱۰ سانتی‌متر) را رقمی کردند و با حرکت برشی لبه‌های بالا و پایین، مناطقی از درزه که از هم جدا می‌شوند و مناطقی که بر روی هم قرار می‌گیرند را مشخص نمودند و با استفاده از پارامترهای آماری روابطی بین مناطق جدا شده و روی هم قرار گرفته با JRC در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی ارایه دادند.

علاوه بر این روش، برای تبدیل کردن نمایش زبری به یک مقدار عددی، پژوهشگران در رشته‌های مختلف مهندسی روش‌هایی ارایه داده‌اند؛ که از بین آن‌ها می‌توان به روش ریشه میانگین مربعات^۲ (RMS) روش متوسط خط مرکزی^۱ (CLA)، روش مایرز^۳ Z_2 و Z_3 که مشتق اول و دوم RMS است. روش SF^{10} و شاخص نیم‌رخ زبری^{۱۱} (R_p) اشاره کرد [۵، ۸] از آن‌جا که JRC از عمومیت بیشتری در مسائل مکانیک سنگی برخوردار است، اغلب روش‌های بیان شده توسط رابطه‌ای به JRC تبدیل می‌شوند. تعدادی از روابط در جدول ۱ آورده شده است.

تعدادی از رابطه‌های بین JRC و دیگر روش‌های تعیین زبری سطوح

ردیف	ارایه‌دهنده	عامل کمی‌سازی زبری	توصیف	رابطه	شماره مرجع
۱	Tse & Cruden DM	Z_2	مجذور میانگین	$JRC = 32.20 + 32.47 \log Z_2$	[۵]
۲	Yu & Vayssade	Z_2	مربعیات مشتق اول	$JRC = 61.79Z_2 - 3.47$	[۶]
۳	Tatone & Grasselli	Z_2	نیم‌رخ زبری	$JRC = 51.85(Z_2)^{0.60} - 10.37$	[۷]
۴	Jang & Jang	Z_2		$JRC = 51.16(Z_2)^{0.531} - 11.44$	[۱۳]
۵	Tse & Cruden DM	SF	تابع ساختاری	$JRC = 37.28 + 16.58 \log SF$	[۵]
۶	Yu & Vayssade	SF		$JRC = 121.13\sqrt{SF} - .28$	[۶]
۷	Yu & Vayssade	RP	شاخص نیم‌رخ زبری	$JRC = 92.07\sqrt{R_p - 1} - 3.28$	[۶]

یکی دیگر از روش‌ها، پردازش لیزری زبری سطح است که از طریق تابش پرتو لیزر بر سطح ناپیوستگی و بررسی پرتو بازگشتی تحت زاویه‌ای مشخص، به حسگر تحلیل می‌شود. با تغییر فاصله میان منبع و سطح، بسته به ارتفاع دندان‌های زبری، موقعیت نور منعکس شده به حسگر تغییر می‌کند. حسگرها با ایجاد امواج الکتریکی وابسته به فاصله، ارتفاع دندان‌های زبری را تعیین می‌کنند. در این روش با توجه به برداشت پیوسته و تمرکز زیاد نقاط و به کمک درون‌یابی، ارتفاع زبری سطح با دقت بالا تعیین می‌شود [۴].

۲-۱-۲- روش‌های صحرایی اندازه‌گیری زبری

یکی از روش‌های متداول اندازه‌گیری زبری در مقیاس بزرگ روش اندازه‌گیری استریوتاومتری است که در هر دو مقیاس صحرایی و طبیعی کاربرد دارد. اساس این روش استفاده از سیستم اندازه‌گیری دیجیتال نوری^۴ است. در این روش سطح ناپیوستگی سنگ به‌صورت رقمی^۵ برداشت می‌شود. سپس به‌طور سیستماتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و زبری سطح تعیین می‌شود [۹].

روش دیگر، روش نقشه‌برداری دقیق^۶، روشی بدون تماس با سطح ناپیوستگی در مقیاس بزرگ است که در آن زبری سطح ناپیوستگی توسط اسکنر لیزری نقطه‌ای، به‌صورت خودکار از فاصله چند ده متری اندازه‌گیری می‌شود [۱۰].

۲-۲- کمی‌سازی زبری ناپیوستگی

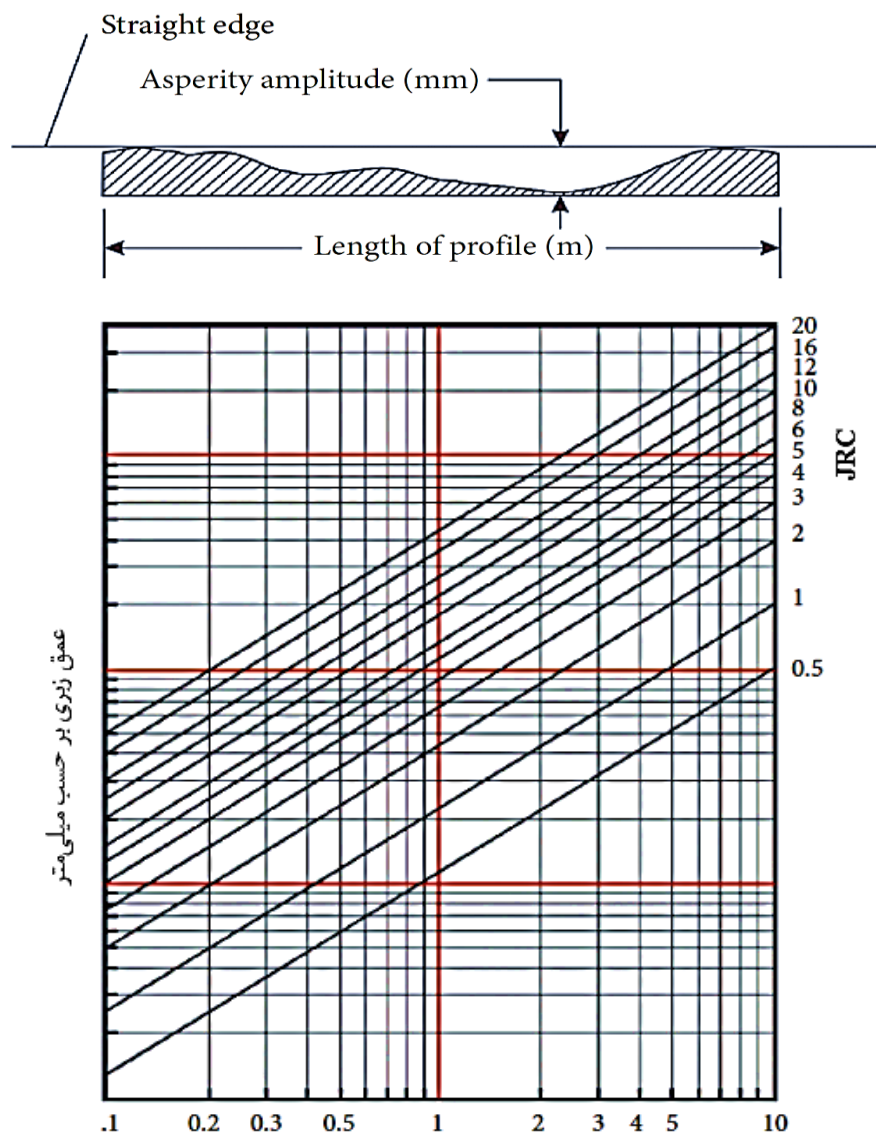
زبری یک ویژگی هندسی است که پستی‌وبلندی‌های سطح ناپیوستگی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صحرایی را نشان می‌دهد. کمی‌سازی، زبری در واقع تبدیل نمودن تصویر هندسی پستی‌وبلندی‌های سطح ناپیوستگی به مقدار عددی

بر اساس پیشنهاد بارتون، در رابطه با ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس، می‌توان JRC را با یک روش ساده مبتنی بر نمودار و با اندازه‌گیری طول نیم‌رخ پیمای صحرایی و فاصله میان بیشینه و کمینه پستی بلندی‌های آن تعیین کرد. در این روش، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا طول مشخصی از ناپیوستگی برحسب متر و بیشترین فرورفتگی آن برحسب میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و با پیاده کردن این اعداد بر روی نمودار شکل ۱، مقدار JRC متناسب با زبری سطح ناپیوستگی به دست می‌آید.

گذشته از موارد پیش‌گفته لی^{۱۳} و همکاران [۱۴] در سال ۱۹۹۰، واکابایاشی^{۱۴} و فوکوشیگ^{۱۵} [۱۵] در سال ۱۹۹۵، جانگ^{۱۶} و همکاران [۱۶، ۸] در سال ۲۰۰۶ و سپس ۲۰۱۴ به بررسی تعیین بعد برخال نیم‌رخ‌های JRC بارتون پرداخته‌اند و رابطه‌ای را بین بعد برخال و JRC ارائه داده‌اند.

۲-۲-۲- روش صحرایی کمی‌سازی زبری

در مکانیک سنگ، اندازه‌گیری مقدار زبری در محل و به‌صورت بزرگ‌مقیاس و درک اثر مقیاس بر زبری ناپیوستگی که تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر شکل توده‌سنگ و رفتار هیدرومکانیک آن دارد، بسیار مهم است [۱۷].



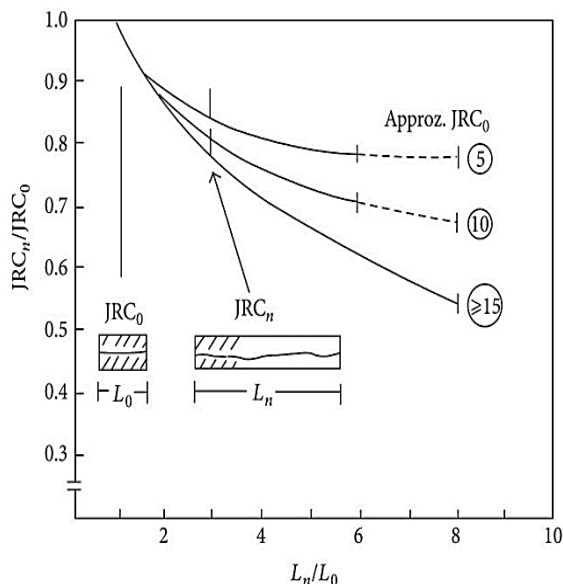
شکل ۱- نمودار تعیین JRC پیشنهادی بارتون در مقیاس صحرایی [۱۱، ۱۸]

طول واقعی ناپیوستگی و JRC_n ضریب زبری اصلاح‌شده است [۲۰].

یانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ به بررسی و تأثیر آنیزوتروپی درزه‌های صحرایی بر روی زبری پرداخته‌اند و خاطرنشان کردند با افزایش نمونه ضریب صافی زبری افزایش می‌یابد و مقدار آن در جهات مختلف به هم نزدیک می‌شود. هدف، اندازه‌گیری زبری و درنهایت، کمی‌سازی آن است. از آنجاکه کمی‌سازی زبری نیاز، به تحلیل و قضاوت مهندسی دارد، پژوهش‌های زیادی در زمینه اندازه‌گیری و کمی‌سازی زبری ناپیوستگی باهدف ارابه یک مقدار عددی که نماینده درستی از ناهمواری سطح باشد، انجام‌شده است. ولی هدف این تحقیق که به توسعه روش DRS^{17} پرداخته است عکس پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون است. در روش DRS مقدار JRC زبری مشخص است و هدف شبیه‌سازی ناهمواری سطح ناپیوستگی است به طوری که ناهمواری شبیه‌سازی‌شده نماینده درستی از مقدار JRC زبری مشخص باشد.

۳- روش پیشنهادی DRS

امروز در اغلب کارهای مهندسی سنگ ساخت مدل هندسی توده‌سنگ به‌منظور مدل‌سازی عددی توده‌سنگ یک ضرورت است و این مستلزم تعریف دقیق شبکه ناپیوستگی است.



شکل ۳- اثر مقیاس بر روی مقدار JRC_0 در مقیاس آزمایشگاهی [۲۰]

یکی از ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، زبری سطح آن‌ها است که شبیه‌سازی آن گامی در جهت ساخت دقیق‌تر

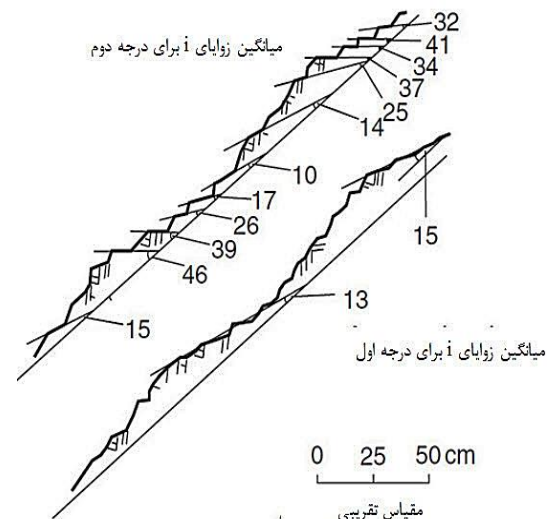
از آن‌جا که مقدار JRC درزه تحت تأثیر مقیاس نمونه است. با افزایش اندازه ناپیوستگی‌ها مقدار JRC کاهش می‌یابد زیرا بسته به ابعاد ناپیوستگی، زبری یک سطح کوچک نسبت به موج‌داری در یک سطح بزرگ، از اهمیت کمتری برخوردار است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده است، زبری‌های درجه اول که مربوط به موج‌های اصلی سطح لایه‌بندی است نسبت به زبری‌های درجه دوم که مربوط به برآمدگی و تورفتگی‌های کوچک سطح است، از هم‌خوانی بهتری برخوردار هستند [۱۹]. تأثیر مقیاس را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) نشان داد.

$$JRC_n = JRC_0 (L_n/L_0)^{-0.02/JRC_0} \quad (1)$$

که در آن؛ L_0 ، طول نیم‌رخ پیمای بارتون - بندیس؛ JRC_0 ، مقدار ضریب زبری ناپیوستگی برگرفته از نیم‌رخ پیمای بارتون - بندیس؛ L_n ، طول واقعی ناپیوستگی و JRC_n ، ضریب زبری اصلاح‌شده است [۱۹].

هم‌چنین تحلیل‌های انجام‌شده برای مقادیر JRC ناپیوستگی سنگ با توجه به آزمون مدل مشترک، بارتون و بندیس^{۱۶}، نشان می‌دهد با افزایش طول نمونه، به دلیل اثر مقیاس، مقدار JRC کاهش می‌یابد. در شکل ۳، مقدار اصلاح‌شده JRC با در نظر گرفتن اثر مقیاس نشان داده‌شده است [۲۰]. بعد برخال برای JRC با توجه به اثر مقیاس از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{\log [JRC_n/JRC_0]}{1 - \log(L_n)} \quad (2)$$



شکل ۴- اندازه‌گیری زوایای زبری برای ناهمواری‌های درجه اول و دوم بر روی سطوح سنگی ناهموار در مقیاس صحرایی [۱۹]

که در آن؛ D ، بعد برخال؛ JRC_0 ، مقدار ضریب زبری ناپیوستگی برگرفته از نیم‌رخ پیمای بارتون - بندیس؛ L_n ،

رابطه (۳) از ساده کردن رابطه (۴) به دست می‌آید و رابطه (۴) از معادله خطوط شکل ۱، استنتاج شده است.

$$\text{Log JRC} = \text{Log } a - \text{Log} \left(\frac{20}{\sqrt{80}} \times L^{\log \sqrt{80}} \right) \quad (4)$$

رابطه (۳) یک معادله دو مجهولی است که می‌توان با L و JRC متفاوت به مقادیر یکسان a دست یافت. به منظور برقراری رابطه یک‌به‌یک بین مقدار a و مقدار JRC ، در عمل از طول نیم‌رخ پیمای صحرائی با طول ثابت L استفاده می‌شود.

از آن‌جا که سطوح مختلف ناپیوستگی با پستی‌وبلندی‌های متفاوت می‌تواند مقدار JRC یکسان داشته باشد؛ بنابراین هدف این تحقیق آن است که با داشتن یک JRC معین یکی از سطوح ناپیوستگی پرشمار را که بیان‌گر JRC مدنظر باشد، شبیه‌سازی کند. در روش DRS ، فرض بر این است که طول ناپیوستگی در فضای دوبعدی از اتصال چندین قطعه تشکیل شده است به طوری که طول هر قطعه کمتر از مقدار L و دارای یک ناهمواری به اندازه بیشینه عمق ناهمواری a باشد.

بدون آن‌که از کلیت مسئله کاسته شود نقطه شروع یا ابتدایی ناپیوستگی در حالت دوبعدی به مرکز مختصات انتقال داده می‌شود. سپس به اندازه زاویه بین محور x ها و محور ناپیوستگی دوران داده می‌شود به طوری که ناپیوستگی در دستگاه مختصات و بر روی محور x ها قرار داده شود. پس از اعمال زبری بر روی آن، ناپیوستگی از مرکز مختصات به نقطه شروع ناپیوستگی منتقل می‌شود و به اندازه‌ای دوران داده می‌شود که ناپیوستگی به حالت قبلی خود برگردانده شود.



ب- سطوح ناپیوستگی متفاوت با مقدار a برابر در طول

مدل هندسی توده‌سنگ است. با توجه به این‌که شکل ناپیوستگی اعم از این‌که چندضلعی، بیضوی، یا شکل دیگری باشد بر نفوذپذیری ناپیوستگی‌ها و مقاومت، تغییر شکل‌پذیری و نفوذپذیری توده‌سنگ تأثیر دارد [۲۱-۲۳] غیرمسطح بودن ناپیوستگی با اعمال ویژگی زبری نیز می‌تواند بر تمام خواص گفته‌شده تأثیر داشته باشد. با استفاده از روش DRS می‌توان هر یک از ناپیوستگی‌های مدل دوبعدی را با زبری خود ناپیوستگی به صورت آماری شبیه‌سازی کرد.

۳-۱- تشریح روش DRS

روش ارایه شده در این تحقیق، با عنوان شبیه‌سازی زبری به روش DRS ، برای اندازه‌گیری زبری در مقیاس صحرائی کاربرد دارد. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود قسمتی از ناپیوستگی که زیر نیم‌رخ پیمای صحرائی قرار دارد در چندین نقطه با نیم‌رخ پیمای صحرائی در تماس است، ولی آنچه در این روش مانند روش صحرائی بارتون مهم است، بیشینه فاصله بین سطح ناپیوستگی تا نیم‌رخ پیمای صحرائی (a) است بنابراین، ساده‌سازی زبری به گونه‌ای که در شکل ۴-ب نشان داده شده است تأثیری بر مقدار زبری ناپیوستگی روش صحرائی ندارد.

در روش صحرائی بارتون، مقدار بیشینه عمق ناهمواری (a) برحسب میلی‌متر از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{20JRC L^{\log \sqrt{80}}}{\sqrt{80}} \quad (3)$$

که در آن JRC ، ضریب زبری ناپیوستگی و L ، طول نیم‌رخ پیمای صحرائی برحسب متر است.



الف- اندازه‌گیری صحرائی با شاخص به طول L [۱۱]

شکل ۴- ساده‌سازی زبری ناپیوستگی

$$d_i = \sqrt{(x_{P_i} - x_{P_{i-1}})^2 + (y_{P_i} - y_{P_{i-1}})^2} \quad (6)$$

$i = 1, \dots, n$

شایان ذکر است از آنجایی که مقدار a بر روی JRC تأثیرگذار است و این که چه مقدار از a سهم برآمدگی شود تأثیری بر مقدار JRC ندارد مگر آن که تعداد برآمدگی‌های زیر نیم‌رخ پیمای صحرایی بیشتر از دو تا باشد که در آن صورت مقدار JRC افزایش می‌یابد و خطا به وجود می‌آید که قابل محاسبه است به همین دلیل عددی تصادفی بین صفر تا a انتخاب می‌شود.

(ب) از آنجایی که موقعیت طولی نقطه فرورفتگی‌ها تأثیری بر مقدار JRC ندارد برای تعیین مکان هندسی نقاط فرورفتگی T_i ها با مختصات (x_{T_i}, y_{T_i}) ، مقدار x_{T_i} از رابطه $x_{T_i} = x_{P_{i-1}} + e_i$ به دست می‌آید که در آن عددی تصادفی بین صفر تا $x_{P_i} - x_{P_{i-1}}$ (تصویر d_i بر روی محور x) است. هم‌چنین مقدار y_{T_i} از رابطه (Y) محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{|k_1 x_{T_i} + k_2 y_{T_i} + k_3|}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

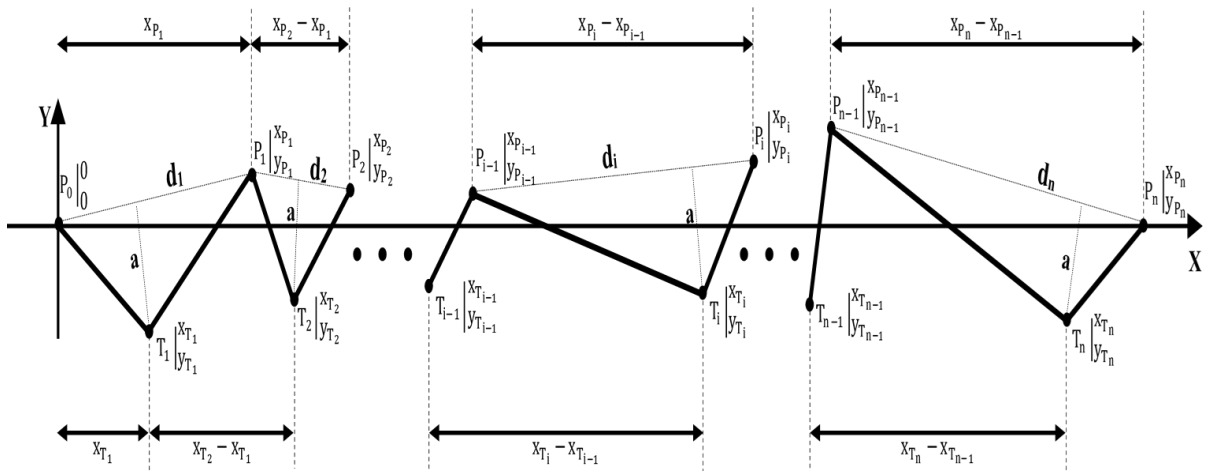
که در آن؛ a ، مقدار بیشینه عمق ناهمواری؛ k_1 ، k_2 و k_3 ضرایب معادله خط است. پرواضح است که رابطه (Y) فاصله‌ی نقطه‌ی T_i تا پاره‌خط $P_{i-1}P_i$ است.

همان‌طور که در شکل ۵، دیده می‌شود فرض می‌شود که $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$ نقاط برآمدگی و d_1, d_2, \dots, d_n و ... اندازه پاره‌خط‌های $P_0P_1, P_1P_2, \dots, P_{i-1}P_i, \dots, P_{n-1}P_n$ باشند. از آنجایی که مقدار JRC متأثر از L است و مقادیر d_i ها $(i=1, 2, \dots, n-1)$ تأثیری بر مقدار JRC ندارد بنابراین d_i ها اعداد تصادفی بین صفر تا L در نظر گرفته می‌شوند که با تعیین آن‌ها می‌توان تصاویر پاره‌خط‌های $P_{i-1}P_i$ $(i=1, 2, \dots, n-1)$ را بر روی محور x ها با اندازه‌ی $x_{P_i} - x_{P_{i-1}}$ مشخص کرد. تعداد نقاط برآمدگی (n) و به تبع آن d_n از شرط مذکور در رابطه (Δ) به دست می‌آید که در آن D ؛ اندازه طول ناپیوستگی P_0P_n است.

$$x_{P_1} + (x_{P_2} - x_{P_1}) + \dots + (x_{P_{n-1}} - x_{P_{n-2}}) + (x_{P_n} - x_{P_{n-1}}) = D \quad (8)$$

در روش DRS، ابتدا مکان هندسی نقاط برآمدگی و سپس نقاط فرورفتگی به دست می‌آید. بدین منظور به صورت زیر عمل می‌شود:

(الف) فرض می‌شود نقاط ابتدا (P_0) و انتهای ناپیوستگی (P_n) به‌عنوان برآمدگی باشند. با توجه به شرط مذکور در رابطه (Δ) تعداد $n-1$ برآمدگی بین این دونقطه به صورت $P_i = (x_{P_i}, y_{P_i})$ $(i=1, 2, \dots, n-1)$ انتخاب می‌شوند به طوری که عددی تصادفی بین صفر تا a باشد و x_{P_i} از رابطه (6) که فاصله اقلیدسی بین دونقطه‌ی x_{P_i} و x_{P_i} است، به دست آید.



شکل ۵- ترسیم شبیه‌سازی زبری ناپیوستگی به روش DRS

بر اساس آنچه گفته شد، مراحل انجام کار را می‌توان به صورت الگوریتم جدول ۲ بیان کرد:

الگوریتم روش DRS به منظور شبیه‌سازی زبری سطح ناپیوستگی

مقدار JRC و مقدار طول نیم‌رخ پیمای صحرایی (L) علاوه بر طول، شیب و نقطه شروع خط اثر، مشخص شود.	گام اول
مقدار بیشینه عمق ناهمواری (a) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شود.	گام دوم
با انتقال نقطه شروع ناپیوستگی در حالت دوبعدی به مرکز مختصات و دوران ناپیوستگی به اندازه منفی شیب، ناپیوستگی بر روی محور X ها در دستگاه مختصات قرار داده می‌شود.	گام سوم
با توجه به شرط مذکور در رابطه (۵)، طول ناپیوستگی به n قطعه تقسیم شود به طوری که طول هر قطعه کمتر از مقدار L و هر قطعه دارای یک ناهمواری به اندازه a باشد.	گام چهارم
با در نظر گرفتن یک عدد تصادفی بین صفر و a به عنوان ارتفاع برآمدگی و مقداری تصادفی بین صفر و L به عنوان فاصله بین دو برآمدگی مجاور و استفاده از رابطه (۶) می‌توان مکان هندسی نقاط برآمدگی ناپیوستگی در حالت دوبعدی را تعیین کرد.	گام پنجم
با تعیین فاصله افقی نقطه فرورفتگی از برآمدگی مجاورش که عددی تصادفی بین صفر و فاصله افقی دو برآمدگی مجاور فرورفتگی است و مقدار a، به کمک رابطه (۷) می‌توان مکان هندسی نقاط فرورفتگی را تعیین کرد.	گام ششم
برعکس گام سوم، با انتقال ناپیوستگی به نقطه شروع و دوران آن به اندازه شیب، ناپیوستگی به حالت اولیه خود برگردانده می‌شود.	گام هفتم

۳-۲- اعتبارسنجی روش DRS

به منظور آزمون درستی روش پیشنهادی، ضروری است روایی^{۱۸} و پایایی^{۱۹} آن بررسی شود.

برای بررسی روایی روش پیشنهادی، باید مقدار JRC در سراسر سطح ناپیوستگی شبیه‌سازی شده نزدیک به JRC مبنا (JRC) که شبیه‌سازی ناپیوستگی برای تأمین آن صورت گرفته است) باشد. برای محاسبه‌ی روایی کافی است با استفاده از رابطه (۸)، m بار مقدار JRC برای سطح ناپیوستگی شبیه‌سازی شده با استفاده از روش صحرایی بارتون با طول L مطرح شده در روش DRS اندازه‌گیری شود به طوری که اندازه‌گیری از ابتدای ناپیوستگی شروع و با همپوشانی L-1 در هر بار اندازه‌گیری تا انتهای ناپیوستگی ادامه یابد.

$$m = \text{int}\left(\frac{D-L}{l}\right) + 1 \quad (8)$$

که در آن؛ D، طول ناپیوستگی، L، طول نیم‌رخ پیمای صحرایی و l فاصله نقاط اندازه‌گیری JRC از هم که همگی بر حسب متر هستند.

سپس برای محاسبه‌ی میزان خطای آن از شاخص میانگین درصد خطای مطلق (MAPE²⁰) که در رابطه (۹) بیان شده است استفاده می‌شود.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|JRC - \widehat{JRC}_i|}{JRC} \quad (9)$$

که در آن؛ JRC، مقدار زبری مبنا، \widehat{JRC}_i ($i=1,2,\dots,m$) مقدار زبری تعیین شده در قسمت i ام است.

به منظور بررسی پایایی (قابلیت اعتماد) روش پیشنهادی، باید مطمئن شد که با هر بار تکرار روش DRS مقدار JRC زبری شبیه‌سازی شده نزدیک به JRC مبنا می‌شود. برای محاسبه‌ی پایایی کافی است روش DRS، به تعداد m بار به طور تصادفی تکرار شود و مقدار \widehat{JRC}_i (JRC زبری شبیه‌سازی شده‌ی i ام $i=1,2,\dots,m$) به ازای یک نقطه تصادفی در طول ناپیوستگی شبیه‌سازی شده به روش صحرایی بارتون با طول L مطرح شده در روش DRS، محاسبه شود؛ و برای سنجش دقت آن، از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

۴- مثال عددی

در این بخش، برای تشریح روش DRS به بیان یک مثال عددی پرداخته شده است. به این منظور ابتدا یک برنامه کامپیوتری برای انجام محاسبات تهیه شده است. در برنامه‌نویسی الگوریتم شبیه‌سازی زبری به روش DRS از نرم‌افزار آماری R استفاده شده است. R یک زبان برنامه‌نویسی و یک محیط نرم‌افزاری رایگان برای محاسبات آماری و گرافیک است که توسط بنیاد R پشتیبانی می‌شود. R و کتابخانه‌های آن طیف گسترده‌ای از روش‌ها و الگوریتم‌های آماری و گرافیکی، از جمله مدل‌سازی خطی و غیرخطی، آزمون‌های آماری کلاسیک، آنالیز سری زمانی، طبقه‌بندی، خوشه‌بندی و موارد دیگر را پشتیبانی می‌کنند. بسیاری از کارکردهای استاندارد R در خود R نوشته شده است، به طوری که کاربران را از تدوین الگوریتم بی‌نیاز می‌کند. همچنین R این قابلیت را دارد که برای امور محاسباتی فشرده، کدهای C، C++ و Fortran را فراخوانی کند [۲۴].

نقاط برآمدگی (y_{Pi}) ، مکان هندسی نقاط برآمدگی (x_{Pi}, y_{Pi}) مشخص می‌شود. مختصات این نقاط در ستون دوم جدول ۳ آورده شده است.

برای تعیین موقعیت سیزده نقطه فرورفتگی بین نقاط برآمدگی، ابتدا طول آن‌ها را محاسبه می‌شود. طول اولین فرورفتگی عددی تصادفی بین صفر و تصویر d_1 بر روی محور x است و طول دیگر فرورفتگی‌ها به ترتیب از اضافه شدن عدد تصادفی بین صفر و تصویر d_i متناسب آن، با طول فرورفتگی قبلی به دست می‌آید. مختصات این نقاط در ستون سوم جدول ۳ آورده شده است.

ستون چهارم و پنجم جدول ۳ از انتقال نقطه P_0 به نقطه شروع ناپیوستگی $(2m, 2.5m)$ و دوران 60° درجه‌ای ناپیوستگی حاصل می‌شود.

با مشخص شدن مکان هندسی زبری سطح ناپیوستگی که در ستون چهارم و پنجم جدول ۳ آورده شده است، می‌توان آن را در صفحه مختصات، به صورتی که در شکل ۶ نشان داده شده ترسیم نمود.

برای مثال یک ناپیوستگی با طول خط اثر 560 سانتیمتر و شیب 60° درجه و نقطه شروع، به مختصات $(2m, 2.5m)$ در نظر گرفته شده است.

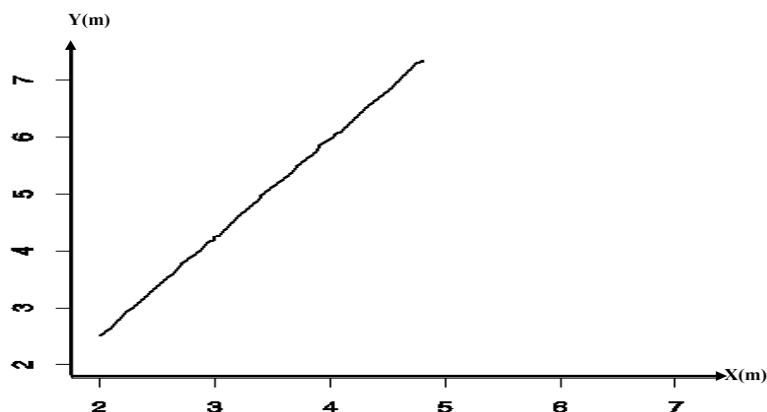
هدف شبیه‌سازی زبری سطح ناپیوستگی به روش DRS به ازای $JRC=10$ و $L=1m$ است. برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۴) مقدار بیشینه عمق ناهمواری $a=0.2236m$ به دست می‌آید. سپس با انتقال نقطه شروع به مرکز مختصات $(0,0)$ و دوران ناپیوستگی به اندازه منفی 60° درجه، ناپیوستگی در دستگاه مختصات و بر روی محور x ها قرار داده می‌شود.

با تولید اعداد تصادفی بین صفر و یک متر، معادل طول نیم‌رخ پیمای صحرائی (که در ستون ششم جدول ۳ آورده شده است) و با توجه به شرط مذکور در رابطه (۵)، تعداد 7 نقطه برآمدگی (بدون احتساب نقطه‌ی ابتدا و انتها) به دست می‌آید.

با توجه به رابطه (۶) و تولید دوازده عدد تصادفی بین صفر و 0.335 متر (بیشینه عمق ناهمواری) به عنوان ارتفاع

مختصات مکان هندسی زبری سطح ناپیوستگی به ازای $JRC=10$

شماره i	برآمدگی بر روی محور مختصات $P_i(x_{Pi}, y_{Pi})$	فرورفتگی بر روی محور مختصات $T_i(x_{Ti}, y_{Ti})$	برآمدگی در موقعیت واقعی $P_i(x_{Pi}, y_{Pi})$	فرورفتگی در موقعیت واقعی $T_i(x_{Ti}, y_{Ti})$	فاصله بین دو برآمدگی مجاور d_i
۰	(۰, ۰)		(۲, ۲.۵)		---
۱	(۰.۵۰۷, ۰.۱۰)	(۰.۱۵۶, -۰.۱۹)	(۲.۲۴۵, ۲.۹۴۴)	(۲.۰۹۵, ۲.۶۲۵)	۰.۵۰۷
۲	(۱.۲۰۰, ۰.۰۰۵)	(۰.۵۶۶, -۰.۱۳)	(۲.۵۹۶, ۳.۵۴۲)	(۲.۲۹۵, ۲.۹۸۴)	۰.۶۹۳
۳	(۱.۴۷۵, ۰.۱۴)	(۱.۲۷۵, -۰.۱۵)	(۲.۷۲۶, ۳.۷۸۴)	(۲.۶۵۱, ۳.۵۹۷)	۰.۲۷۵
۴	(۱.۹۰۵, ۰.۱۳)	(۱.۷۵۵, -۰.۰۹)	(۲.۹۴۱, ۴.۱۵۶)	(۲.۸۸۶, ۴.۰۱۵)	۰.۴۳۰
۵	(۲.۰۱۸, ۰.۰۸)	(۱.۹۷۲, -۰.۱۲)	(۳.۰۰۲, ۴.۲۵۲)	(۲.۹۹۷, ۴.۲۰۲)	۰.۱۱۴
۶	(۲.۴۴۷, ۰.۰۰۶)	(۲.۰۴۱, -۰.۱۴)	(۳.۲۱۸, ۴.۶۲۲)	(۳.۰۳۳, ۴.۲۶)	۰.۴۲۹
۷	(۲.۸۴۵, ۰.۱۰)	(۲.۷۸۱, -۰.۰۵)	(۳.۴۰۶, ۴.۹۷۴)	(۳.۳۹۵, ۴.۹۰۵)	۰.۳۹۹
۸	(۳.۴۶۱, ۰.۱۰)	(۳.۳۲۳, -۰.۱۲)	(۳.۷۲۳, ۵.۵۰۱)	(۳.۶۷۲, ۵.۳۷۲)	۰.۶۱۵
۹	(۳.۸۶۶, ۰.۱۰)	(۳.۷۴۸, -۰.۰۷)	(۳.۹۱۷, ۵.۸۵۸)	(۳.۸۸, ۵.۷۴۳)	۰.۴۰۶
۱۰	(۴.۱۰۶, ۰.۱۰)	(۴.۰۵۲, -۰.۱۲)	(۴.۰۴۶, ۶.۰۶)	(۴.۰۳۶, ۶.۰۰۳)	۰.۲۴۰
۱۱	(۴.۶۴۱, ۰.۱۰)	(۴.۱۵۷, -۰.۱۵)	(۴.۳۱۷, ۶.۵۲۱)	(۴.۰۹۱, ۶.۰۹۲)	۰.۵۳۶
۱۲	(۵.۵۴۱, ۰.۱۰)	(۵.۰۲۳, -۰.۱۳)	(۴.۷۵۶, ۷.۳۰۷)	(۴.۵۲۳, ۶.۸۴۳)	۰.۹۰۰
۱۳	(۵.۶, ۰.۱۰)	(۵.۵۹۷, -۰.۲۲)	(۴.۸, ۷.۳۵)	(۴.۸۱۸, ۷.۳۳۶)	۰.۰۶۱

شکل ۶- ترسیم زبری $JRC=10$ در صفحه مختصات

به منظور بررسی بیشتر، شبیه‌سازی برای JRC های ۱، ۲، ... و ۲۰ انجام شده است و مقادیر مربوط به اعتبارسنجی آن‌ها در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد خطای مطلق به ازای بررسی روایی و پایایی روش DRS ، برای تمامی مقادیر JRC کمتر از ده درصد است که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

برای بررسی روایی روش DRS ، مقدار JRC برای ۴۷ نقطه به فاصله ده سانتیمتر از یکدیگر روی سطح ناپیوستگی شبیه‌سازی شده، تعیین شده است. در این شرایط، مقدار شاخص $MAPE$ از رابطه (۸) برابر ۱/۱۱ درصد به دست می‌آید. همچنین به منظور بررسی پایایی (قابلیت اعتماد) سطح ناپیوستگی، شبیه‌سازی شده مقدار شاخص $MAPE$ به ازای صدبار تکرار شبیه‌سازی برابر با ۱/۸۹ درصد محاسبه می‌شود که از دقت خوبی برخوردار است.

بررسی روایی و مقایسه مقدار JRC به ازای ۵۰ نقطه روی زبری ناپیوستگی شبیه‌سازی شده با JRC مبنا

JRC مبنا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$MAPE$ (%)	۳/۵۱	۹/۵۹	۱	۳/۰۱	۸/۷۳	۲/۵۰	۱/۳۶	۰/۰۰	۶/۴۸	۱/۱۱
JRC مبنا	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
$MAPE$ (%)	۱/۷۶	۰/۰۹	۳/۸۸	۱/۸۶	۰/۰۰	۳/۲۲	۰/۰۰	۳/۲۵	۰/۵۰	۶/۰۶

بررسی پایایی مقایسه مقدار JRC زبری ناپیوستگی شبیه‌سازی شده با JRC مبنا به ازای صدبار اجرا

JRC مبنا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$MAPE$ (%)	۱/۵۱	۲/۳۹	۱/۲۴	۱/۲۲	۲/۱۴	۲/۵۳	۲/۴۷	۱/۰۵	۲/۹۰	۱/۸۹
JRC مبنا	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
$MAPE$ (%)	۲/۱۵	۶/۱۲	۳/۰۵	۳/۱۷	۱/۴۵	۱/۹۶	۱/۳۳	۲/۳۰	۲/۹۳	۱/۵۸

سطح ناپیوستگی را با مقدار زبری یکسان، شبیه‌سازی و تولید کرد. به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت نتایج حاصل از کاربرد روش DRS ، برای تمامی JRC های ممکن روایی و پایایی روش بررسی شده است. نتایج بررسی روایی برای JRC های مختلف حاکی از آن است که مقدار شاخص

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

ساخت مدل هندسی توده‌سنگ، مستلزم شبیه‌سازی ویژگی‌های هندسی توده‌سنگ است. یکی از این ویژگی‌ها زبری سطوح ناپیوستگی‌های توده‌سنگ است. با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق، DRS ، می‌توان تعداد زیادی

- [6] Yu XB, Vayssade B. Joint profiles and their roughness parameters. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1991; 28:333–6.
- [7] Tatone BSA, Grasselli G. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *Int J Rock Mech Min Sci* 2010; 47:1391–400.
- [8] Jang, H. S., Kang, S. S., & Jang, B. A. (2014). Determination of joint roughness coefficients using roughness parameters. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(6), 2061-2073.
- [9] Tatone, B. S. A., & Grasselli, G. (2009). Use of a stereo-topometric measurement system for the characterization of rock joint roughness in-situ and in the laboratory. *Rock Engineering in Difficult Conditions*.
- [10] Feng, Q., Fardin, N., Jing, L., & Stephansson, O. (2003). A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(1), 3-25.
- [11] Palmström, A., Sharma, V. I., & Saxena, K. (2001). In-situ characterization of rocks. *BALKEMA Publ*, 1-40.
- [12] Liu, X., Zhu, W., Yu, Q., Chen, S., & Guan, K. (2019). Estimating the joint roughness coefficient of rock joints from translational overlapping statistical parameters. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(3), 753-769.
- [13] Jang, H. S., & Jang, B. A. (2015). New method for shear strength determination of unfilled, unweathered rock joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1515-1534.
- [14] Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J., & Haas, C. J. (1990, December). The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 27, No. 6, pp. 453-464). Pergamon.
- [15] Wakabayashi, N., & Fukuhige, I. (2002). Experimental study on relation between fractal dimension and shear strength. In *Fractured and jointed rock masses* (pp. 119-124).

میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) برای قسمت‌های مختلف یک سطح ناپیوستگی شبیه‌سازی‌شده، همواره کمتر از ده درصد است این بدان معنا است که اگر قرار باشد با استفاده از روش DRS یک سطح ناپیوستگی به‌منظور تولید مقدار زبری $JRC=10$ شبیه‌سازی شود مقدار JRC به ازای تمامی قسمت‌های سطح شبیه‌سازی‌شده مقادیری بین ۹ تا ۱۱ می‌شود. همچنین بررسی پایایی روش DRS نیز برای JRC های مختلف انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار MAPE به ازای صدمبار تکرار روش DRS، برای قسمتی از سطح شبیه‌سازی‌شده که به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود کمتر از شش درصد است که مقدار قابل قبولی و تأییدی بر صحت روش DRS برای شبیه‌سازی و تولید زبری سطح ناپیوستگی است. نتایج مربوط به بررسی روایی و پایایی روش DRS، برای JRC های مختلف به‌صورت جداول جداگانه در بخش ۴ آورده شده است. در انتها شایان‌ذکر است که روش DRS این قابلیت و توانمندی را دارد تا با برخورداری از ماهیت تصادفی بودن، زمینه اضافه شدن ویژگی زبری به شبکه ناپیوستگی مجزا را فراهم نماید و گامی در جهت توسعه آن باشد.

مراجع

- [1] Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10(1), 1-54.
- [2] Develi, K., Babadagli, T. T., & Comlekci, C. (2001). A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness. *Computers & geosciences*, 27(3), 265-277.
- [3] Grasselli, G., Wirth, J., & Egger, P. (2002). Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 789-800.
- [4] Herda, H. H. W. (2006). An algorithmic 3D rock roughness measure using local depth measurement clusters. *Rock mechanics and rock engineering*, 39(2), 147-158.
- [5] Tse R, Cruden DM. Estimating joint roughness coefficients. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1979; 16:303–7.

rock joints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

[21] Petit, J. P., Massonat, G., Pueo, F., & Rawnsley, K. (1994). Rapport de forme des fractures de mode 1 dans les roches stratifiées: une Étude de cas dans le bassin permien de Lodève (France). *Bulletin des centres de recherches exploration-Production Elf-Aquitaine*, 18(1), 211-229.

[22] Zhang, L. (2016). *Engineering properties of rocks*. Butterworth-Heinemann.

[23] Dershowitz, W. S., Curran, B., Einstein, H., LaPointe, P., Shuttle, D., & Klise, K. (2002). Discrete feature approach for heterogeneous reservoir production enhancement (No. DOE/BC/15102-2). National Petroleum Technology Office, Tulsa, OK (US).

[24] Rizzo, M. L. (2007). *Statistical computing with R*. Chapman and Hall/CRC.

[16] Jang, B. A., Jang, H. S., & Park, H. J. (2006). A new method for determination of joint roughness coefficient. *IAEG, paper*, (95).

[17] Feng, Q., Fardin, N., Jing, L., & Stephansson, O. (2003). A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(1), 3-25.

[18] Yong, R., Huang, L., Hou, Q., & Du, S. (2020). Class Ratio Transform with an Application to Describing the Roughness Anisotropy of Natural Rock Joints. *Advances in Civil Engineering*, 2020.

[19] Hoek, E., & Bray, J. D. (2014). *Rock slope engineering*. CRC Press.

[20] Du, S., Gao, H., Hu, Y., Huang, M., & Zhao, H. (2015). A new method for determination of joint roughness coefficient of

¹¹ Roughness Profile

¹² Lee

¹³ Wakabayashi

¹⁴ Fukushige

¹⁵ Jang

¹⁶ Barton and Bandis

¹⁷ Discontinuity Roughness Simulation

¹⁸ Validy

¹⁹ Reliability

²⁰ Mean Absolute Percentage Error

¹ Joint Roughness Coefficients

² Develi

³ Advanced Topometric Sensor

⁴ Optical

⁵ Digital

⁶ Total Station

⁷ Root Mean Square

⁸ Centre Line Average

⁹ Myers

¹⁰ Structure function