

مقاله پژوهشی

طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه با روش بردار پشتیبان

حجت نسب^۱، سعید کریمی نسب^{۲*}، حسین جلالی فر^۳، مسعود شمس الدین سعید^۴

۱. دکتری مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، nasab.hojat@gmail.com

۲. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، kariminasab@uk.ac.ir

۳. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، jalalifar@uk.ac.ir

۴. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، masoud_shams90@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

زبری یکی از خصوصیات هندسی درزه‌ها است که بیان آن از طریق روش‌های مختلف امکان پذیر است. در این مطالعه از ۸ پارامتر مختلف برای تخمین ضریب زبری درزه (JRC) برای ۱۱۲ پروفیل زبری مختلف استفاده شده است. با توجه به محدوده تغییرات نسبتاً زیاد این پارامترها در یک کلاس زبری مشخص و هم‌پوشانی این محدوده‌ها با کلاس‌های مجاور زبری، به منظور استفاده همزمان از دو پارامتر برای تخمین JRC ماتریس تأثیر متقابل این پارامترها بر مقدار JRC ایجاد شد. تفکیک پذیری کلاس‌های مختلف زبری در سناریوهای مختلف با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و استفاده از قضاوت مهندسی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که حالت‌هایی با ضریب همبستگی در حدود ۰/۸ برای کلاس‌بندی JRC مناسب هستند. به دلیل وجود مرزهای نسبتاً مشخص بین دو کلاس زبری متوالی نسبت به سایر حالت‌ها و داشتن مفهوم مهندسی مشخص از پارامترهای انحراف معیار ارتفاع دندان‌ها و انحراف معیار زاویه دندان‌ها برای طبقه‌بندی JRC استفاده شد. اگرچه با استفاده از پارامترهای دو بعدی گراسلی، Z2 و انحراف معیار اختلاف ارتفاع دندان‌ها نیز می‌توان برای طبقه‌بندی JRC استفاده کرد. با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان، مرز بین کلاس‌های مختلف زبری مشخص شد. نتایج طبقه‌بندی انجام‌شده با انجام ۲۰ آزمایش برش مستقیم بر روی سطوح درزه طبیعی اعتبار سنجی شد. بیش از ۷۰ درصد نتایج پیش‌بینی با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد و حدود ۲۰ درصد نتایج مقدار پیش‌بینی‌شده با مقدار واقعی یک کلاس فاصله دارد. با این وجود تخمین زبری با استفاده از پروفیل‌ها دوبعدی همواره با محدودیت روبرو است.

کلمات کلیدی

طبقه‌بندی زبری، ضریب زبری درزه، ماشین بردار پشتیبان، آزمایش برش مستقیم.

علائم اختصاری

Z_2	پارامتر معرف زبری: متوسط زاویه دندانها
Z_3	پارامتر معرف زبری: معرف انحناي دندانها
Z_4	پارامتر معرف زبری: نسبت سطوح در تماس برش
R_p	پارامتر معرف زبری: نسبت سطح حقیقی به سطح تصویر شده زبری
SD_H	انحراف معیار ارتفاع دندانها
SD_A	انحراف معیار زاویه دندانها
SD_{PHV}	انحراف معیار اختلاف ارتفاع دندانها
SR_v	پارامتر زمین آماری معرف زبری
CA	پارامتر زمین آماری زبری
C	حد آستانه
a	شعاع تاثیر ارتفاع دندانها
e	عدد نپر
SVM	روش بردار پشتیبان
JRC	ضریب زبری درزه
θ_{max}	حداکثر زاویه دندانها در جهت برش
c	ثابت گراسلی
SCJRC	طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه
n	تعداد آرگومانها
PCC	ضریب همبستگی پیرسون
Grasselli _{2D}	پارامتر دو بعدی گراسلی

۱- مقدمه

زبری سطوح درزه یکی از پارامترهای مؤثر در رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ محسوب می‌شود. زبری درزه به بخش زبری‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس یا موج‌داری تقسیم می‌شود [۱، ۲]. محققان به دلیل محدودیت ابعاد نمونه و وجود زبری‌های تصادفی هموار با چالش روبرو بوده‌اند.

استفاده از ضریب زبری درزه (JRC) در تخمین زبری سطح درزه استفاده گسترده‌ای دارد. از طرفی تعداد زیادی از محققین JRC را به‌عنوان روشی مناسب برای بیان زبری درزه معرفی نمی‌کنند. اما با توجه به وجود تغییرات زیاد پروفیل‌های زبری

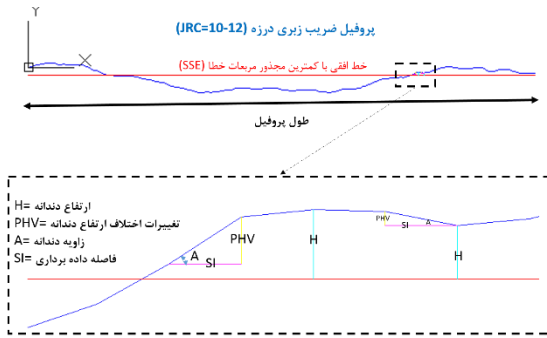
در پروژه‌های معدنی و عمرانی و امکان تخمین سریع و نتایج نسبتاً قابل قبول در فازهای اولیه طراحی، از این پارامتر به‌صورت گسترده در پروژه‌ها استفاده می‌شود. از این رو در این مقاله به دلیل تواتر استفاده و عملیاتی بودن JRC، این پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

روش‌های متعددی همچون، روش‌های زمین‌آماری، آزمایشگاهی، آماری و فرکتالی برای ارزیابی زبری درزه ارائه شده است [۳-۸]. برای دهه‌ها کمی کردن پروفیل‌های استاندارد بارتن مورد توجه محققان بوده است. پارامترهای آماری و زمین‌آماری زیادی برای تعریف زبری ارائه شده است.

پارامترهای آماری همچون Z_2 ، Z_3 ، Z_4 ، R_p Grasselli_{2D}، انحراف معیار ارتفاع دندانها (SD_H)، انحراف معیار زاویه دندانها (SD_A) و انحراف معیار اختلاف ارتفاع دندانها (SD_{PHV}) و از بین پارامترهای زمین‌آماری می‌توان به شعاع تأثیر (a) و حد آستانه (C) اشاره کرد [۹-۱۲]. این پارامترها در جدول ۱ تعریف شده‌اند. در پارامترهای تعریف شده همواره زاویه دندانها یک پارامتر مؤثر بوده است. پارامترهای Z_2 ، Z_3 و Z_4 به زاویه دندانها وابسته هستند. Z_2 به‌عنوان متوسط زاویه دندانها تعریف می‌شود. Z_3 میزان انحناي دندانها را نشان می‌دهد و Z_4 اختلاف طول تصویر شده دندانها با شیبی در جهت برش با دندانها با شیبی در خلاف جهت برش را نشان می‌دهد [۱۳].

یافته‌های اسدی و رسولی نشان می‌دهد، در صورتیکه میانگین زاویه دندانها صفر باشد انحراف معیار زاویه دندانها معیار مناسبی برای تعریف زبری محسوب می‌شود [۱۴، ۱۵]. زاویه دندانها به فاصله افقی دو نقطه متوالی از یک پروفیل زبری سطح درزه وابسته است. خان لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ بیان کردند که اختلاف ارتفاع دندانها از یک توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار مشخص تبعیت می‌کند. این محققان نشان دادند که با افزایش انحراف معیار اختلاف ارتفاع دندانها مقدار زبری افزایش می‌یابد [۱۶].

رویکرد زمین‌آمار یک روش دیگر در ارزیابی زبری محسوب می‌شود. روش‌های زمین‌آماری بر پایه محاسبه واریانس ارتفاع دندانها در فواصل مختلف استوار هستند. در این روش ارتفاع دندانها غالباً به‌عنوان متغیر ناحیه‌ای تعریف می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش تعیین مدل مقاومت برشی است که به ابعاد نمونه وابسته نیست [۱۷]. چن و همکاران در سال ۲۰۱۶ شاخص زمین‌آماری SR_v را برای تعریف زبری ارائه کردند [۱۸]. لی‌هنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با ارزیابی

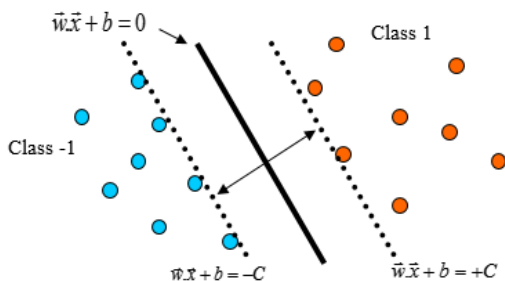


شکل ۱- متغیرهای تأثیرگذار در پارامترهای معرف زبری

۲- روش کار

۱-۲ ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان^۱ یکی از روش‌هایی است که از آن برای طبقه‌بندی در هر مسئله‌ای که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص باشد، استفاده می‌شود. این روش از جمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی نسبت به روش‌های قدیمی‌تر برای طبقه‌بندی داشته و به‌عنوان یکی از بهترین تکنیک‌های دسته‌بندی و پیش‌بینی مرز شناخته می‌شود. مبنای کار دسته‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان، دسته‌بندی خطی داده‌ها است. در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌کند خطی را انتخاب کند که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. بدین ترتیب که مرز دارای بیشترین حاشیه اطمینان است را به‌عنوان مرز بین دو گروه انتخاب می‌کند. در این الگوریتم ابتدا دو صفحه مرزی موازی با صفحه دسته‌بندی رسم شده و آن دو صفحه آن قدر از هم دور می‌شوند که به داده‌ها برخورد نکنند. سپس صفحه‌ای که بیشترین فاصله را از صفحات مرزی داشته باشد، بهترین جداکننده و صفحه مرزی خواهد بود (شکل ۲).



شکل ۲- اصول روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان [۱۹]

هدف این روش پیدا کردن بهترین خط یا اُبر صفحه^۲ است که دو دسته را از هم جدا کند. معادله این خط به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود. رابطه ۲ معادله اُبر صفحه در حالت n بعدی را

واریوگرام‌های مختلف شاخص CA را برای تعیین زبری درزه تعریف کردند [۸]. تعریف این دو شاخص در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۱ متغیرهای تأثیرگذار در پارامترهای معرف زبری را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای آماری معرف زبری

پارامتر	منبع
$Grasselli_{2D} = \frac{\theta_{max}^*}{[C + 1]}$	[۱۰]
θ_{max}^* : حداکثر زاویه دندانها	
$Z_2 = \left[\frac{1}{M(D_x)^2} \sum_{i=1}^M (Z_{i+1} - Z_i)^2 \right]^{0.5}$ and $Dx = x_{i+1} - x_i$	[۹]
$Z_3 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=N}^1 \left(\frac{Z_{i-1} - 2Z_i + Z_{i+1}}{\Delta x^2} \right)^2}$	[۹]
$Z_4 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{i+} - \sum_{i=1}^N x_{i-}}{L}$	[۱۳]
$R_p = \frac{[\sum_{i=1}^{n-1} [(Z_{i+1} - Z_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2]^{0.5}]}{L}$	[۹]
$SD_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
$SD_{PHV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	[۱۶]
$SD_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	[۱۴]

جدول ۲- پارامترهای زمین آماری معرف زبری

پارامتر	توضیحات
$SR_v = \frac{\sqrt{2C}}{a}, SR_v \in (0, \infty)$	a: شعاع تأثیر
$CA = \sqrt{\frac{2}{e} \cdot \frac{C}{a}}$	C: حد آستانه e: عدد نپر

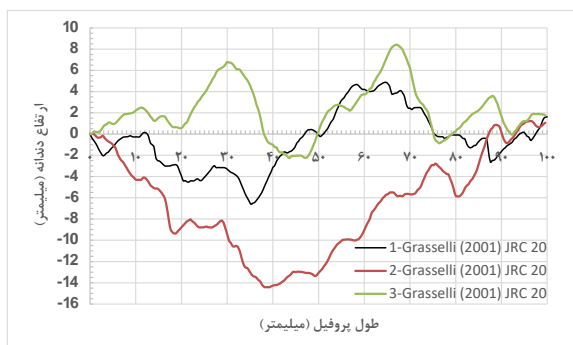
این دو معادله نشان می‌دهند که ارتفاع دندانها یک پارامتر زمین آماری است و کمیتی آماری محسوب نمی‌شود. متداول‌ترین پروفیل‌ها برای ارزیابی زبری، ۱۰ پروفیل استاندارد بارتن است [۳]. این پروفیل‌ها پایه اکثر مطالعات انجام‌شده برای کمی کردن زبری محسوب می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که تعداد زیادی پروفیل دوبعدی درزه وجود دارد که مورفولوژی مختلفی دارند اما مقدار زبری یکسانی دارند. در این مطالعه با بررسی ۸ پارامترها مختلف تعریف زبری برای ۱۱۲ پروفیل یک طبقه‌بندی آماری برای زبری درزه ارائه شده است. درنهایت با استفاده از روش بردار پشتیبان مرزها کلاس‌های مختلف زبری تعیین شده است.

محاسبه شد. نتایج در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول هر ستون معرف یکی از ۱۰ کلاس زبری بارتن است. برای هر یک از هشت پارامتر موردنظر مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط پارامتر مربوطه در ردیفها مجزا نشان داده شده است. تعداد داده در هر کلاس زبری متفاوت است حتی در کلاسهای صفر تا ۲ و ۱۲ تا ۱۴ تنها یک پروفیل زبری وجود دارد. روند تغییرات متوسط هر پارامتر در ستون سمت راست جدول ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در اکثریت موارد (به غیر از پارامتر شعاع تأثیر) با افزایش JRC^۳ مقدار متوسط هر یک از این پارامترها افزایش می یابد. در تعیین مقدار شعاع تأثیر یک پارامتر قضاوت مهندسی بسیار تأثیرگذار است و از این رو تعیین مقدار این پارامتر با عدم قطعیت هایی در مقیاس آزمایشگاهی روبرو است. بنابراین شعاع تأثیر پروفیل زبری نمی تواند به تنهایی معرف زبری درزه باشد.

محدوده تغییرات (تفاضل مقدار حداکثر با حداقل) در هر کلاس زبری متفاوت است که در شکل های ۴ تا ۱۱ نشان داده شده است. محور افقی در شکل های ۴ تا ۱۱ کلاس زبری است و محور قائم در این هشت شکل یکی از پارامترهای زبری است. تقریباً روند کلی این پارامترها با افزایش مقدار JRC افزایش می یابد. همان گونه که در قبل اشاره شد برای کلاس های صفر تا ۲ و ۱۲ تا ۱۴ به دلیل وجود تنها یک داده محدوده تغییرات صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- پارامترهای پروفیل های زبری گراسلی (JRC=20)

پارامتر	1-Grasselli (2001), JRC 20	2-Grasselli (2001), JRC 20	3-Grasselli (2001), JRC 20
$Grasselli_2$	۲۱,۵۸	۲۴,۵۲	۲۴,۶۴
Z_2	۰,۶۲	۰,۶۴	۰,۶۷
R_p	۱,۱۵	۱,۱۶	۱,۱۸
SD_H	۲,۷۷	۴,۶۸	۲,۵۱
SD_{PHV}	۰,۲۴	۰,۲۵	۰,۲۷
SD_A	۲۶,۸۹	۲۷,۸۴	۲۹,۵۹



شکل ۳- پروفیل های زبری گراسلی با ضریب زبری ۲۰

نشان می دهد. با فرض اینکه کلاس ها به صورت خطی جداپذیر باشند، ابرصفحه هایی با حداکثر حاشیه به دست می آید که کلاس ها را جدا می کنند [۱۹].

$$w_1 X_1 + w_2 X_2 + b = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^n w_i . x_i + b = 0 \quad (2)$$

این روش بر مبنای انتخاب دورترین مرز بین دو کلاس مجاور ارائه شده است. به منظور استفاده از این روش برای یافتن مرز کلاس های متوالی زبری، در ابتدا کلاس های متوالی زبری درزه به صورت دوه دو مشخص می شوند. در ادامه با معرفی کلاس های زبری در الگوریتم بردار پشتیبان (این الگوریتم در نرم افزار متلب تعریف شده است) مرز تفکیک کلاس های مختلف زبری مشخص می شود.

۲-۲- خصوصیات پروفیل های زبری

در این مطالعه ۸ پارامتر زبری درزه برای ۱۱۲ پروفیل زبری مختلف محاسبه شد. نتایج در جدول ۳ نمایش داده شده است. این پارامترها آماری و زمین آماری شامل Z_2 , R_p , $Grasselli_{2D}$, SD_H , SD_A , SD_{PHV} و a و C می شوند. این ۱۱۲ پروفیل زبری توسط لی در سال ۲۰۱۵ از منابع معتبر و محققان مشهوری همچون، بارتن، بندیس و گراسلی جمع آوری شده است. داده های جمع آوری شده از طریق لینک موجود در این مرجع در دسترس محققان قرار دارند [۲۰].

انتخاب پروفیل معرف یکی از چالش های مهم در تحلیل دو بعدی پروفیل های زبری محسوب می شود که توسط تعدادی از محققان مورد ارزیابی قرار گرفته است. ۱۱۲ پروفیل استفاده شده در این مقاله توسط لی و همکاران با فاصله داده برداری ۰,۴ میلی متر از روی پروفیل های موجود در مقالات منتشر شده برداشت شده است. این محققان از روش های مختلفی برای برداشت پروفیل سطح درزه استفاده کرده اند. بارتن و بندیس با استفاده از برداشت پروفیل های مرکزی سطوح درزه با استفاده از شانه زمین شناسی و گراسلی با تحلیل پروفیل ها مختلف در سطح برداشت شده با اسکن سه بعدی نتایج خود را تحلیل کرده اند.

به عنوان نمونه شکل ۳، سه عدد پروفیل درزه با ضریب زبری ۲۰ که توسط گراسلی ارائه شده را نشان می دهد. پارامترهای محاسبه شده برای این پروفیل ها در جدول ۳ گزارش شده است.

مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط برای هر یک از این پارامترها

جدول ۴- خصوصیات آماری و زمین‌آماری پارامترهای معرف زبری در کلاس‌های مختلف JRC

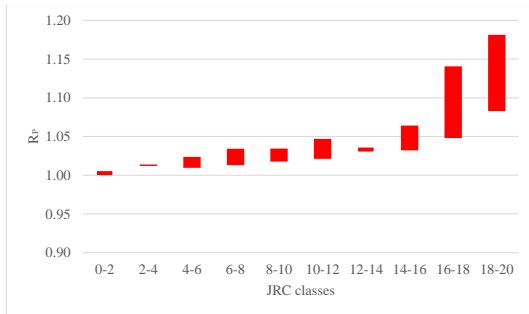
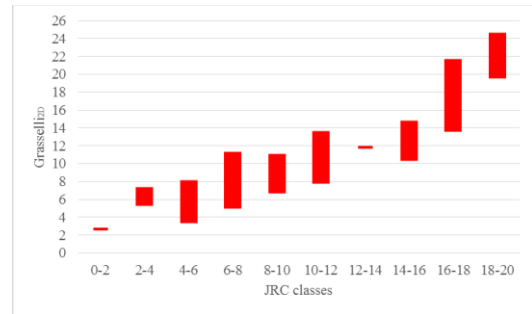
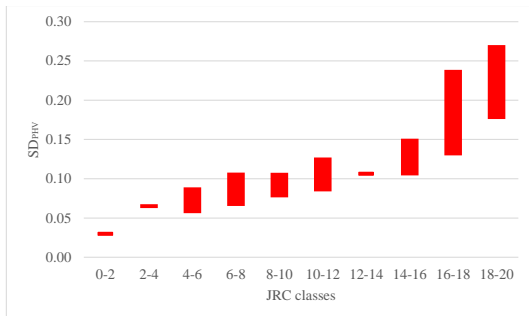
پارامتر	JRC	شما تیک									
		۱۸-۲۰	۱۶-۱۸	۱۴-۱۶	۱۲-۱۴	۱۰-۱۲	۸-۱۰	۶-۸	۴-۶	۲-۴	۰-۲
a (mm)	حداقل	۱۲,۲۰	۱۳,۲۰	۲۰,۰۰	۵۵,۶۰	۱۱,۶۰	۱۳,۲۰	۴,۸۰	۵,۲۰	۸,۰۰	
	حداکثر	۴۱,۸۹	۴۱,۶۰	۵۰,۰۰	۵۵,۶۰	۵۰,۰۰	۴۹,۶۰	۴۲,۸۰	۴۰,۴۰	۱۸,۰۰	۲۲,۴۰
	میانگین	۲۵,۰۷	۲۴,۶۹	۳۶,۶۰	۵۵,۶۰	۲۳,۹۵	۲۴,۱۲	۱۷,۷۰	۱۸,۸۳	۱۳,۰۰	
C (mm)	حداقل	۱,۳۷	۱,۱۶	۲,۴۴	۴,۹۵	۰,۲۴	۰,۱۹	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۴	
	حداکثر	۴۱,۸۹	۲۵,۶۰	۱۵,۱۱	۴,۹۵	۶,۶۹	۲,۳۲	۱,۰۶	۰,۵۴	۰,۰۸	۰,۰۳
	میانگین	۱۶,۹۵	۸,۹۵	۷,۳۲	۴,۹۵	۱,۸۳	۰,۷۹	۰,۳۰	۰,۱۸	۰,۰۶	
SD _A (درجه)	حداقل	۲۱,۰۷	۱۶,۶۴	۱۴,۰۴	۱۴,۰۵	۱۱,۵۶	۱۱,۲۷	۹,۱۰	۷,۷۳	۸,۶۸	
	حداکثر	۲۹,۵۹	۲۶,۲۳	۱۹,۰۸	۱۴,۰۵	۱۶,۷۱	۱۴,۴۹	۱۴,۳۳	۱۱,۹۹	۹,۳۷	۴,۲۴
	میانگین	۲۶,۳۴	۲۱,۲۴	۱۵,۷۸	۱۴,۰۵	۱۴,۲۳	۱۲,۵۸	۱۱,۳۹	۹,۹۹	۹,۰۲	
SD _H (mm)	حداقل	۱,۰۷	۱,۶۱	۱,۱۹	۱,۶۱	۰,۵۵	۰,۴۲	۰,۲۱	۰,۲۱	۰,۳۶	
	حداکثر	۴,۶۸	۲,۷۳	۲,۷۶	۱,۶۱	۱,۸۴	۱,۰۹	۰,۸۵	۰,۷۹	۰,۳۹	۰,۱۳
	میانگین	۲,۷۶	۲,۰۹	۱,۹۰	۱,۶۱	۱,۰۶	۰,۷۵	۰,۴۶	۰,۴۰	۰,۳۷	
Z ₂	حداقل	۰,۴۴	۰,۳۲	۰,۲۶	۰,۲۷	۰,۲۱	۰,۱۹	۰,۱۶	۰,۱۴	۰,۱۶	
	حداکثر	۰,۶۷	۰,۶۰	۰,۳۸	۰,۲۷	۰,۳۲	۰,۲۷	۰,۲۷	۰,۲۲	۰,۱۷	۰,۰۷
	میانگین	۰,۵۹	۰,۴۳	۰,۳۰	۰,۲۷	۰,۲۷	۰,۲۳	۰,۲۱	۰,۱۸	۰,۱۶	
R _p	حداقل	۱,۰۸۳	۱,۰۴۸	۱,۰۳۲	۱,۰۳۳	۱,۰۲۱	۱,۰۱۸	۱,۰۱۳	۱,۰۱۰	۱,۰۱۲	
	حداکثر	۱,۱۸۱	۱,۱۴۱	۱,۰۶۴	۱,۰۳۳	۱,۰۴۷	۱,۰۳۴	۱,۰۳۴	۱,۰۲۴	۱,۰۱۴	۱,۰۰۳
	میانگین	۱,۱۴۳	۱,۰۸۵	۱,۰۴۲	۱,۰۳۳	۱,۰۳۴	۱,۰۲۵	۱,۰۲۲	۱,۰۱۶	۱,۰۱۳	
Grasselli _{2D}	حداقل	۱۹,۵۴	۱۳,۵۵	۱۰,۳۳	۱۱,۸۵	۷,۷۷	۶,۷۰	۴,۹۷	۳,۳۰	۵,۳۱	
	حداکثر	۲۴,۶۴	۲۱,۶۸	۱۴,۸۵	۱۱,۸۵	۱۳,۶۴	۱۱,۰۹	۱۱,۳۴	۸,۱۵	۷,۳۹	۲,۶۴
	میانگین	۲۲,۵۷	۱۸,۲۶	۱۲,۲۲	۱۱,۸۵	۱۰,۸۴	۸,۸۴	۷,۸۲	۵,۸۷	۶,۳۵	
SD _{PHV}	حداقل	۰,۱۷۶	۰,۱۳۰	۰,۱۰۴	۰,۱۰۶	۰,۰۸۴	۰,۰۷۶	۰,۰۶۵	۰,۰۵۶	۰,۰۶۳	
	حداکثر	۰,۲۷۰	۰,۲۳۹	۰,۱۵۱	۰,۱۰۶	۰,۱۲۷	۰,۱۰۸	۰,۱۰۸	۰,۱۰۸۹	۰,۱۰۶۸	۰,۰۳۰
	میانگین	۰,۲۳۷	۰,۱۷۴	۰,۱۲۰	۰,۱۰۶	۰,۱۰۶	۰,۰۹۲	۰,۰۸۴	۰,۰۷۳	۰,۰۶۵	

تغییرات این پارامتر با افزایش JRC افزایش می‌یابد و مقادیر مشترک در بین کلاس‌های مختلف زبری یافت می‌شود. شکل ۶ نشان می‌دهد که پارامتر شعاع تاثیر به هیچ عنوان نمی‌تواند به تنهایی معرف زبری باشد.

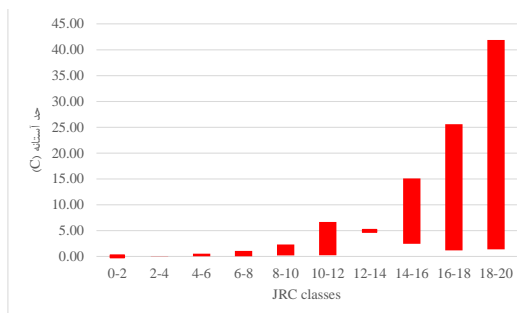
محدوده تغییرات پارامترهای SD_{PHV}، Z₂ و SD_A در شکل‌های ۷، ۱۰ و ۱۱ روند مشابهی را نشان می‌دهند. شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات دو پارامتر حد آستانه و SD_H را نشان می‌دهند. این دو پارامتر از لحاظ تعریف ریاضی شبیه به هم هستند با این تفاوت که حد آستانه، انحراف معیار نقاط ارتفاعی دندان‌های را در فاصله ای مشخص (شعاع تاثیر) نشان می‌دهد. روند تقریباً مشابه این دو شکل صحت محاسبات در تعیین

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است مقادیری از پارامتر گراسلی وجود دارد که در محدوده تغییرات چند کلاس متوالی قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال مقدار عدد ۱۰ پارامتر Grasselli_{2D} (شکل ۴) در محدوده کلاس‌های ۶ تا ۸، ۸ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۲ قرار می‌گیرد. این اتفاق برای سایر پارامترها در مقادیر خاص دیگری اتفاق می‌افتد.

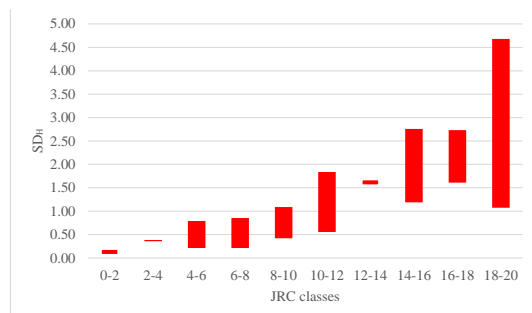
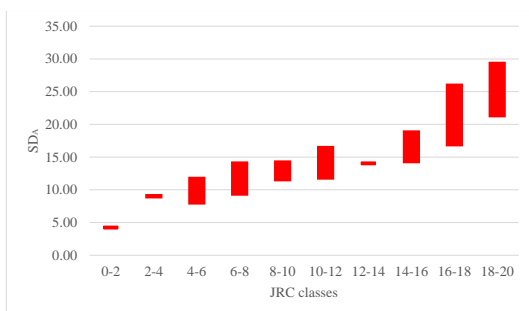
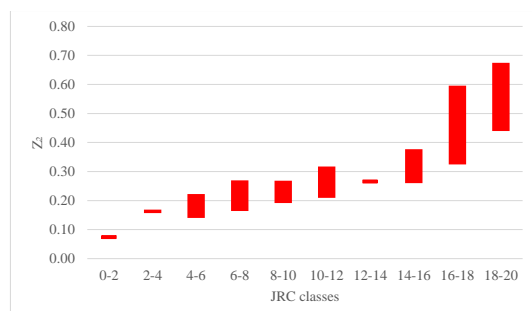
لازم به ذکر است که محدوده تغییرات نشان داده شده برای این ۱۱۲ پروفیل معتبر است و با تغییر پروفیل‌های زبری و تعداد آن‌ها این محدوده تغییر خواهد کرد. این امر برای شکل‌های ۵ تا ۹ نیز صدق می‌کند. شکل ۵ تغییرات پارامتر R_p را در کلاس‌های مختلف زبری نشان می‌دهد. محدوده

شکل ۵- تغییرات R_p در کلاس‌های مختلف JRCشکل ۴- تغییرات $Grasselli_{2D}$ در کلاس‌های مختلف JRCشکل ۷- تغییرات SD_{PHV} در کلاس‌های مختلف JRC

شکل ۶- تغییرات شعاع تأثیر در کلاس‌های مختلف JRC



شکل ۹- تغییرات حد آستانه در کلاس‌های مختلف JRC

شکل ۸- تغییرات SD_H در کلاس‌های مختلف JRCشکل ۱۱- تغییرات SD_A در کلاس‌های مختلف JRCشکل ۱۰- تغییرات Z_2 در کلاس‌های مختلف JRC

پروفیل‌های با زبری زیاد نسبت به پروفیل‌ها با زبری کم مشکل‌تر است. با توجه به محدوده تغییرات نسبتاً زیاد این پارامترها در یک کلاس زبری مشخص و هم‌پوشانی این محدوده‌ها با کلاس‌های مجاور زبری، به‌منظور استفاده هم‌زمان از دو پارامتر برای تخمین JRC، ماتریس تأثیر متقابل این پارامترها بر مقدار JRC ایجاد شد. شایان ذکر است که تمامی پارامترهای محاسبه شده در ابتدا بر روی پروفیل‌های بارتن محاسبه شد و نتایج و با

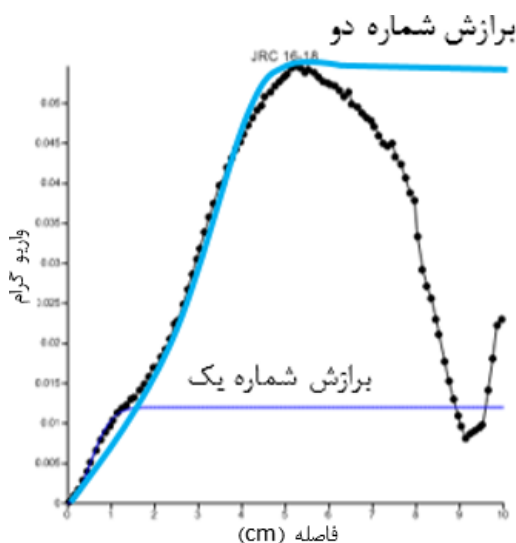
مقدار حد آستانه را نشان می‌دهد. پارامتری امکان تعریف مناسب زبری را دارد که مقادیر مشترکی در بین کلاس‌ها مختلف زبری نداشته باشد یا در حداقل ممکن باشد. بدین معنی که محدوده تغییرات یک پارامتر مختص فقط یک کلاس از زبری باشد و با سایر کلاس‌ها زبری هم‌پوشانی نداشته باشد. غالباً محدوده تغییرات پروفیل‌ها زبرتر بیش از پروفیل‌های با زبری کمتر است. این روند نشان می‌دهد که تعیین مقدار JRC برای

در تعیین حد آستانه و شعاع تأثیر با استفاده از واریوگرام ارتفاع دندانها در شکل ۱۳ نشان داده شده است به علت وجود روند در پروفیل تعیین دقیق مقدار حدآستانه و شعاع تأثیر برای پروفیل زبری به قضاوت مهندسی بستگی دارد. در صورتی که هریک از واریوگرام ها برازش داده شده انتخاب شود مقادیر مربوط به پارامترهای زمین‌آماری درزه تغییر می‌کند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در اکثر موارد استفاده از مدل‌های تجربی به‌منظور تخمین مقدار زبری به نوع نمونه و فرآیند انجام آزمایش برش مستقیم دارد. بنابراین استفاده از طبقه‌بندی زبری درزه شبیه به روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ همچون RMR، Q و GSI می‌تواند یک راه مناسب برای ارزیابی زبری درزه با در نظر گرفتن محدوده تغییرات آن‌ها باشد.

در این مطالعه تأثیر همزمان دو پارامتر معرف زبری درزه بر مقدار JRC مورد بررسی قرار گرفت. از این‌رو یک ماتریس ۸ در ۸ ایجاد شد. ماتریس تأثیر متقابل پارامترهای معرف زبری در جدول ۵ نشان داده شده است. عوامل اصلی بر روی قطر اصلی قرار گرفته‌اند. تمامی این هشت پارامتر در بخش مقدمه تعریف شده‌اند.

در مجموع تأثیر ۲۸ حالت مختلف بر مقدار JRC مورد بررسی قرار گرفت. برای تمامی این ۲۸ حالت مقدار ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد (PCC) و در سلول متناظر در ماتریس تأثیر متقابل نوشته شد. به‌طور مثال سلول مربوط به سطر دوم و ستون سوم با ضریب همبستگی ۰/۶۵ مربوط به تأثیر متقابل دو پارامتر SD_A و C است. همچنین شماره این حالت (۳) در سطر سوم و ستون دوم ماتریس مشخص شده است. شماره اختصاص داده شده به هر حالت در سلول متناظر آن در پایین قطر اصلی ماتریس نوشته شده است.

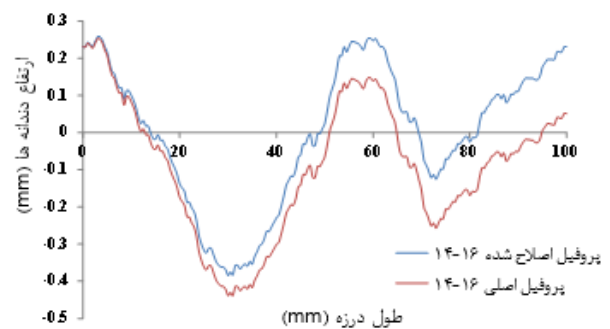


شکل ۱۳- واریوگرام پروفیل زبری ۱۶ تا ۱۸ بارتن

نتایج ارائه شده در مقالات مقایسه شد. پس از صحت سنجی نتایج، پارامترهای مذکور برای سایر پروفیل‌ها محاسبه شد. وجود مقادیر مشترک در کلاس‌های مختلف زبری دلایلی بر ناتوانی پارامترهای معرف زبری در تعیین مقدار دقیق ضریب زبری درزه محسوب می‌شود. با توجه به وجود ناهمسانگردی زبری و ماهیت سه‌بعدی زبری استفاده از پارامترهای دوبعدی همواره با محدودیت روبرو خواهد بود. در این‌گونه مسائل با افزایش تعداد پارامترها و بررسی تأثیر متقابل پارامترها بر مقدار JRC می‌توان تخمین مناسب‌تری از مقدار JRC داشت.

۳- نتایج و بحث

محققان زیادی بر روی پروفیل‌های دوبعدی درزه‌های سنگی مطالعه کرده‌اند. در اغلب موارد آن‌ها با استفاده از انجام آزمایش برش مستقیم و انجام تحلیل برگشتی مقدار JRC را تعیین می‌کنند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد پروفیل‌های زبری با مورفولوژی مختلف وجود دارد که JRC یکسانی دارند. از طرف دیگر عوامل مختلفی در تعیین مقدار JRC تأثیرگذار هستند. از این عوامل می‌توان به انتخاب نوع روش ارزیابی دوبعدی یا سه‌بعدی زبری، وجود نمونه‌ها درزه با شکل و ابعاد مختلف، استفاده از روش‌های مختلف برداشت مورفولوژی درزه در آزمایشگاه‌های مختلف، دقت و صحت دستگاه‌های مورد استفاده. افقی بود یا نبود سطح درزه در زمان انجام آزمایش برش مستقیم، اشاره کرد. نمونه‌ای از سطح افقی و غیر افقی در زمان برداشت پروفیل سطح در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- پروفیل اصلی و اصلاح شده ۱۴ تا ۱۶ بارتن

مقادیر پارامترهای معرف زبری، همچون گراسلی، Z_2 شعاع تأثیر و حد آستانه به روند پروفیل زبری وابسته هستند. از این‌رو در تحقیقات جدید پیشنهاد شده است از پروفیل‌های اصلاح‌شده برای بررسی زبری درزه استفاده شود (شکل ۱۲).

در آخر وجود قضاوت مهندسی مختلف در انتخاب برخی از پارامترها تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال تأثیر قضاوت مهندسی

- ۱- ضریب همبستگی پیرسون در حدود ۰/۸ باشد تا قابلیت تفکیک بین کلاس‌های مختلف زبری میسر باشد.
- ۲- در بین پارامترهایی با ضریب همبستگی یکسان پارامتری مناسب‌تر است که دارای مفهوم مهندسی مشخص باشد و محاسبه و تعیین آن‌ها ساده باشد.

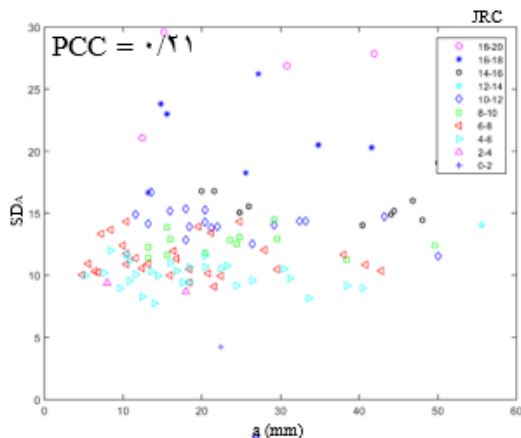
جدول ۵- تأثیر متقابل پارامترهای معرف JRC

i, j	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	a	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۲۲
۲	(۱)	C	۰/۶۵	۰/۸۶	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۳
۳	(۲)	(۳)	SD _A	۰/۸۱	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۵
۴	(۴)	(۵)	(۶)	SD _H	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۸۰
۵	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)	SD _{PHV}	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶
۶	(۱۱)	(۱۲)	(۱۳)	(۱۴)	(۱۵)	Z ₂	۰/۹۸	۰/۹۱
۷	(۱۶)	(۱۷)	(۱۸)	(۱۹)	(۲۰)	(۲۱)	R _P	۰/۹۳
۸	(۲۲)	(۲۳)	(۲۴)	(۲۵)	(۲۶)	(۲۷)	(۲۸)	Grsseli _{2D}

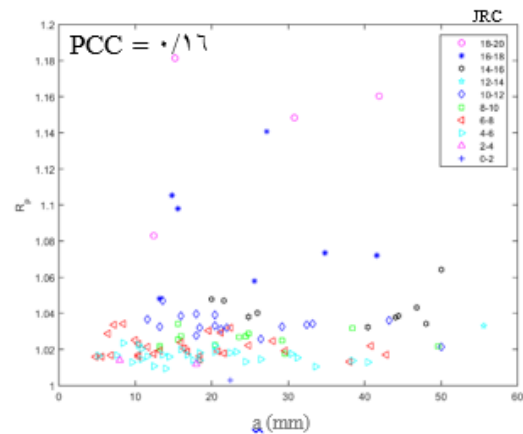
حالت‌های a-SD_{PHV} و a-R_P با شماره حالت‌های ۷ و ۱۶ به ترتیب با مقادیر ۰/۱۸ و ۰/۱۹ کمترین مقدار PCC را دارند. از طرفی حالت‌های SD_{PHV}-Z₂، SD_{PHV}-R_P و Z₂-R_P با شماره حالت‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۱ به ترتیب با مقادیر ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۸ PCC بیشترین همبستگی را در تعیین JRC دارند.

شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ پراکندگی کلاس‌های مختلف JRC برای کمترین و بیشترین مقادیر PCC را نشان می‌دهد. هر چه مقدار PCC کمتر باشد پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌شود و با افزایش مقدار PCC میزان پراکندگی کلاس‌های زبری کمتر می‌شود. از طرفی در مقادیر حداقل و حداکثر PCC تفکیک‌پذیری کلاس‌های مختلف زبری دشوارتر می‌شود. تجزیه و تحلیل ۲۸ حالت نشان می‌دهد که حالت‌هایی با مقادیر ضریب همبستگی خیلی کم و خیلی زیاد برای انجام طبقه‌بندی مناسب نیستند.

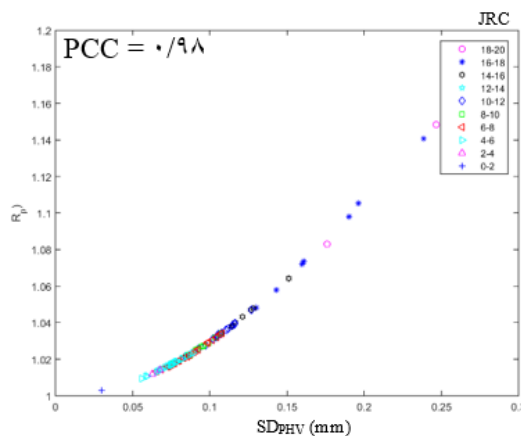
بر طبق مقایسه و تجزیه و تحلیل ضریب همبستگی حالت‌های مختلف دو معیار برای انتخاب حالت مناسب برای طبقه‌بندی زبری تعیین شد که به شرح زیر است:



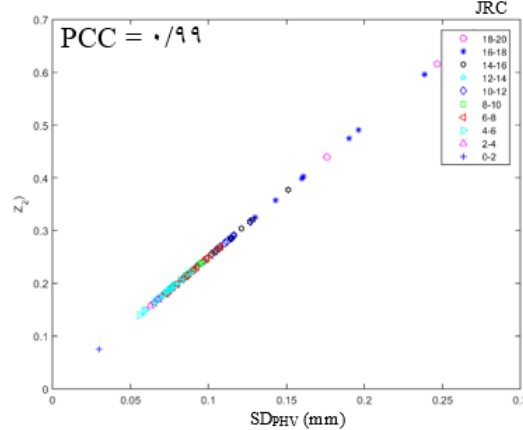
شکل ۱۵- تأثیر متقابل a-SD_A (حالت ۲) بر پراکندگی JRC



شکل ۱۴- تأثیر متقابل a-R_P (حالت ۱۶) بر پراکندگی JRC

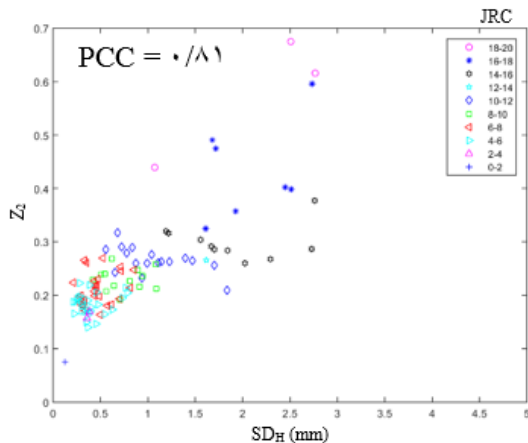


شکل ۱۷- تأثیر متقابل R_P-SD_{PHV} (حالت ۲۰) بر پراکندگی JRC



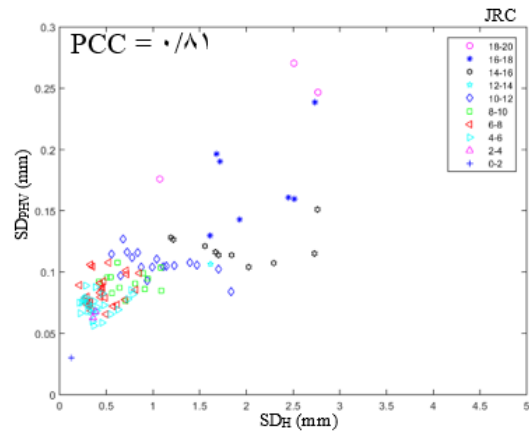
شکل ۱۶- تأثیر متقابل Z₂-SD_{PHV} (حالت ۱۵) بر پراکندگی JRC

بر اساس قضاوت مهندسی و مقایسه بصری ۲۸ سناریوی مورد ارزیابی، انتخاب شده است. همان‌گونه که بیان شده است ضریب همبستگی الزاماً نشانگر قابلیت تفکیک مناسب JRC نیست. شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ پراکندگی JRC برای حالت‌هایی با ضریب همبستگی در حدود ۰/۸۰ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است تمایز کلاس‌های JRC درزه در این حالت‌ها نسبت به سایر حالت‌ها قابل مشاهده‌تر است.

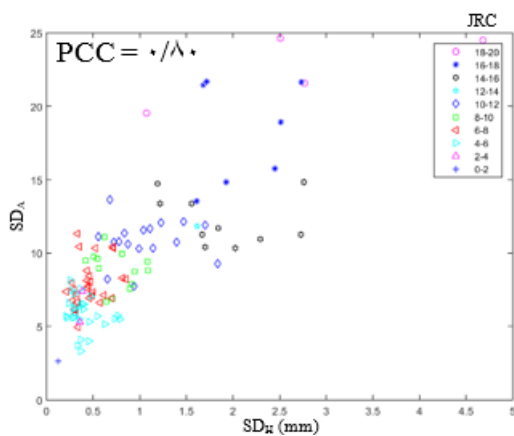


شکل ۱۹- تأثیر Z_2 - SD_H (حالت ۱۴) بر پراکندگی JRC

حالت‌های نامناسب با داشتن خط‌زیر^۵ و رنگ قرمز در جدول ۵ مشخص شده‌اند. در نتیجه مقایسه ۲۸ حالت، حالت‌هایی برای طبقه‌بندی مناسب شناخته شد که مقدار ضریب همبستگی آن در حدود ۰/۸ باشد. از آنجاکه استفاده از تأثیر متقابل پارامترهای معرف زبری روش جدیدی برای بررسی ضریب زبری درزه محسوب می‌شود. ضریب همبستگی ۰/۸ که به‌عنوان یک معیار در انتخاب بهترین سناریو، انتخاب شده است

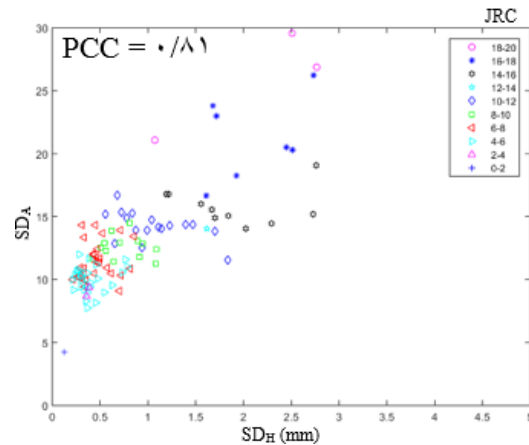


شکل ۱۸- تأثیر SD_{PHV} - SD_H (حالت ۱۰) بر پراکندگی JRC



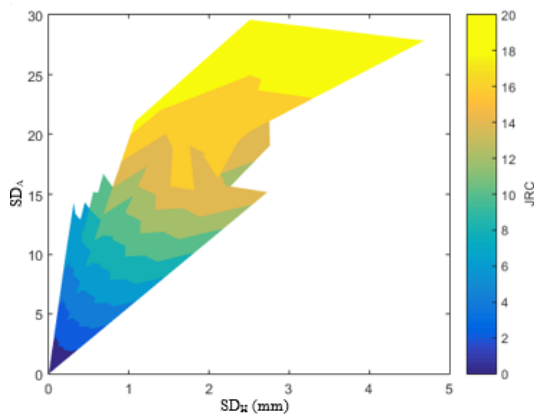
شکل ۲۱- تأثیر $Grasselli_{2D}$ - SD_H (حالت ۲۵) بر پراکندگی JRC

رنگ آبی در جدول ۵ مشخص شده‌اند. همچنین بین حالت شماره ۶ SD_A - SD_H با PCC برابر با ۰/۸۱ و حالت شماره ۲۷ با مقدار PCC برابر با ۰/۹۱ رابطه‌ای با PCC نزدیک‌تر به ۰/۸ برای طبقه‌بندی زبری مناسب‌تر است. از این رو بین حالت‌های SD_{PHV} - SD_H (حالت شماره ۱۰)، Z_2 - SD_H (حالت شماره ۱۴)، SD_A - SD_H (حالت شماره ۶) و $Grasselli_{2D}$ - SD_H (حالت شماره ۲۵) به ترتیب با مقادیر PCC برابر با ۰/۸۱، ۰/۸۱، ۰/۸۱ و ۰/۸، با توجه به دو معیار ذکر شده حالت شماره ۶ به‌عنوان مناسب‌ترین حالت برای طبقه‌بندی زبری درزه انتخاب شد. پراکندگی این چهار حالت در شکل‌های ۱۸ تا

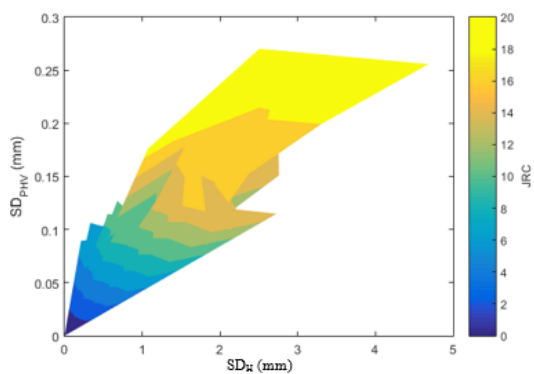


شکل ۲۰- تأثیر SD_A - SD_H (حالت ۶) بر پراکندگی JRC

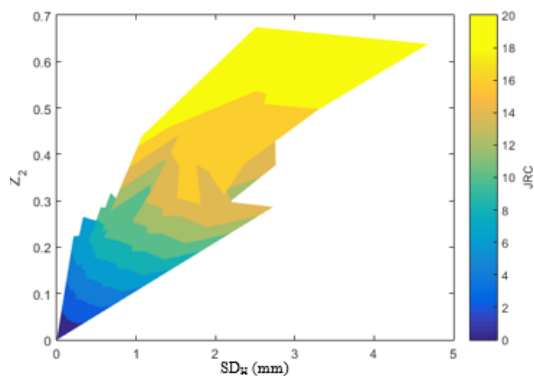
در این مطالعه حالت‌های مناسب برای طبقه‌بندی با قلم برجسته^۶ و رنگ سبز در جدول ۵ مشخص شده است. از طرفی برای انتخاب مناسب‌ترین حالت در بین حالت‌هایی که ضریب همبستگی یکسانی دارند معیار دوم طبقه‌بندی که در بالا توضیح داده شده است مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین به‌منظور طبقه‌بندی زبری درزه در بین حالت‌های شماره ۲۶ SD_{PHV} - $Grasselli_{2D}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۶ نسبت به حالت شماره ۲۷ $Grasselli_{2D}$ - Z_2 با ضریب همبستگی ۰/۹۱ حالت شماره ۲۷ انتخاب مناسب‌تری است. حالت‌ها نسبتاً مناسب برای طبقه‌بندی JRC با قلم مورب^۷ و



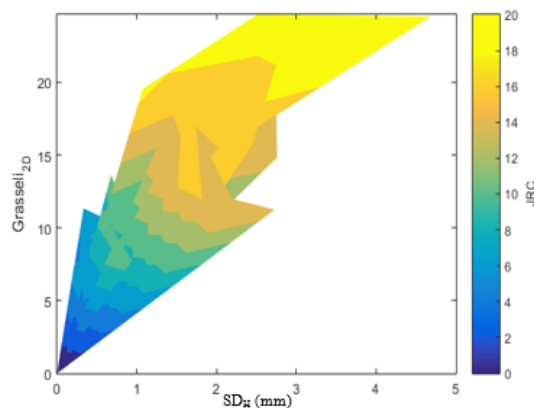
شکل ۲۲- کنتور دیاگرام JRC در حالت ۶



شکل ۲۳- کنتور دیاگرام JRC در حالت ۱۰



شکل ۲۴- کنتور دیاگرام JRC در حالت ۱۴



شکل ۲۵- کنتور دیاگرام JRC در حالت ۲۵

۲۱ نشان داده شده است. انتخاب بهترین سناریو از بین شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ کار بسیار دشواری است. از آنجا که در علوم مهندسی درک زیادی از انحراف معیار پارامترها وجود دارد در این مقاله سعی شده است با انتخاب یک سناریو که از تأثیر متقابل دو پارامتر انحراف معیار زاویه و ارتفاع دندانها تشکیل شده است برای طبقه‌بندی استفاده شود. البته انتخاب سایر سناریوها نیز نمی‌تواند اشتباه باشد. درک فیزیکی از دو پارامتر SD_A و SD_H بالا است و همچنین محاسبه و تعیین این دو پارامتر نسبت به سایر پارامترها قابل دسترس‌تر و ساده‌تر است. انتظار می‌رود با افزایش انحراف معیار زاویه دندانها مقدار زبری افزایش یابد. همچنین شکل دندانها تا حدودی با انحراف معیار ارتفاع دندانها ارتباط دارد. از این رو با افزایش SD_H دندانهایی تیزتر ایجاد می‌شود. در عمل تیزتر شدن دندانها می‌تواند هم تا حدی باعث افزایش مقاومت برشی درزه و از طرفی باعث شکننده‌تر شدن دندانها شود. از این رو ترکیب این دو پارامتر می‌تواند در تعریف زبری نواقص یکدیگر را در تعیین JRC تا حدودی برطرف کند. چون این دو پارامتر ماهیت آماری دارند طبقه‌بندی ارائه شده با استفاده از این دو پارامتر به‌عنوان طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه^۷ (SCJRC) نام‌گذاری شده است.

۴- نتایج

۴-۱- طبقه‌بندی آماری JRC

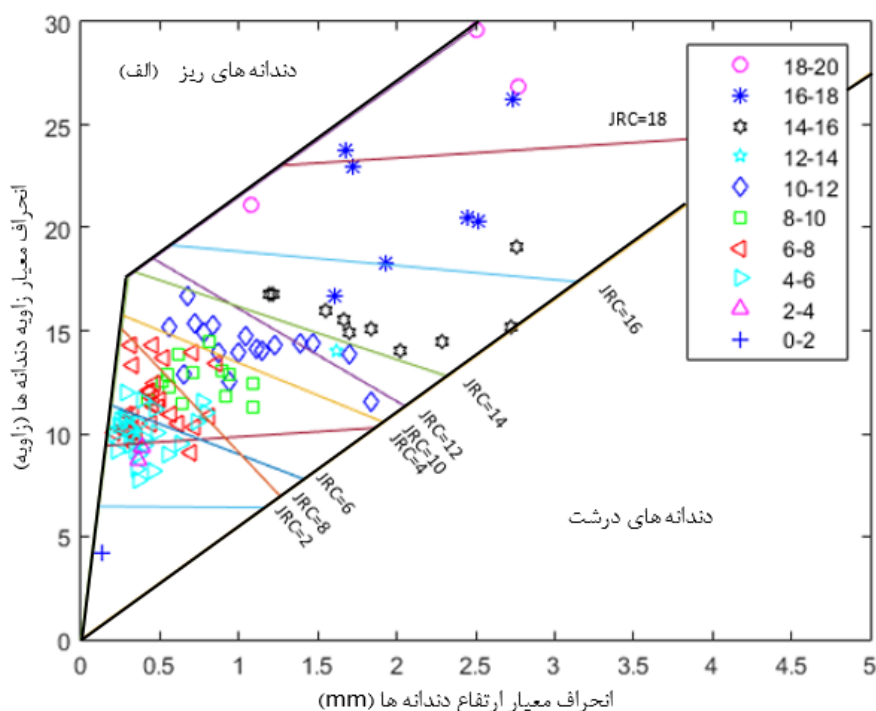
به منظور ارزیابی حالت‌های مناسب برای طبقه‌بندی (حالت‌های ۶، ۱۴، ۱۰، ۲۵) کنتور دیاگرام JRC برای هر یک از چهار حالت‌ها ترسیم شد. نتایج در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ نشان داده شده است. در هر چهار کنتور دیاگرام محور افقی انحراف معیار ارتفاع دندانها است و محور قائم در هر کنتور دیاگرام بسته به حالتی موردنظر متفاوت است. این کنتور دیاگرام‌ها با استفاده از پارامترهای ۱۱۲ پروفیل زبری ترسیم شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهد در اعداد مشخصی بر روی محورهای قائم Z_2 ، SD_A و SD_{PHV} و $Grasselli_{2D}$ بسته به مقدار انحراف معیار ارتفاع دندانها مقدار JRC مختلفی وجود دارد. کنتور دیاگرام JRC در مقادیر مختلف از SD_A و SD_H در شکل ۲۲ نشان داده شده است. هر دو محور افقی قائم در این شکل پارامتر آماری هستند که به راحتی قابل محاسبه هستند.

شکل ۲۳ تغییرات پارامتر $Grasselli_{2D}$ در انحراف معیارهای مختلف را نشان می‌دهد. پارامتر گراسلی به جهت

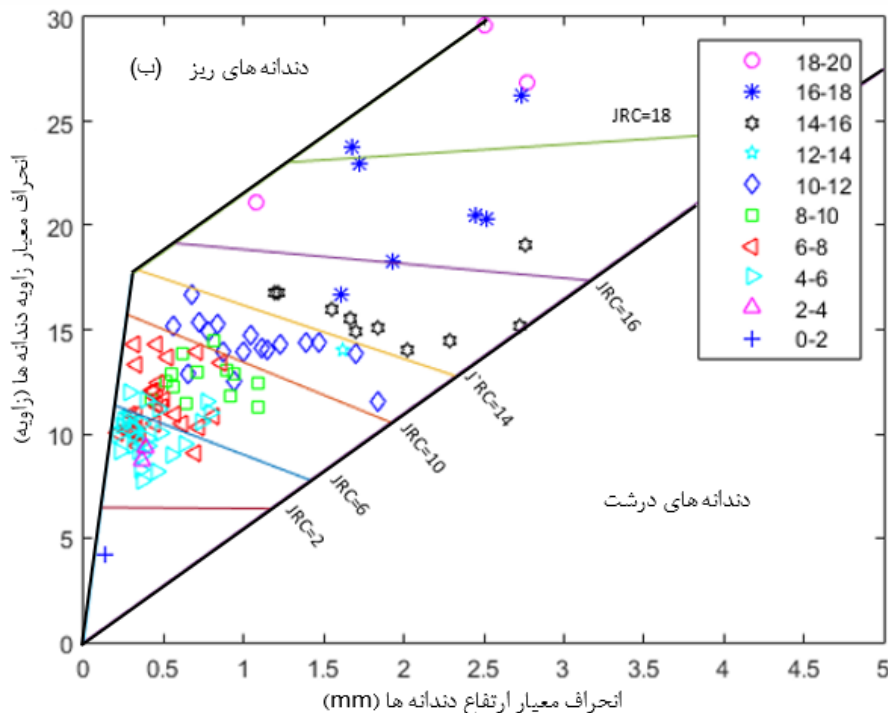
طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه (SCJRC) تعریف شده است. مرز دو کلاس متوالی JRC با استفاده از SVM تعیین شده است. با توجه به پراکندگی داده‌ها مرزهای بیرونی طبقه‌بندی آماری مشخص شد. مرز پایین یک خط مستقیم است و مرز بالایی داده‌ها از دو خط با شیب متفاوت تشکیل شده است. شکل ۲۶ نشان می‌دهد که تعدادی از مرزها تعریف شده برای کلاس‌های متوالی JRC باهم تقاطع دارند. این امر می‌تواند ناشی از محدودیت‌ها موجود در تعداد پروفیل مورد استفاده و یا وجود مرزهای غیرخطی در بین کلاس‌ها مختلف JRC باشد.

همان‌طور که در بررسی محدوده تغییرات پارامترها مشخص شد در پروفیل‌های دوبعدی تفکیک زبری در کلاس‌های ده‌گانه بارتن در اکثر موارد امکان پذیر نیست. از اینرو در این مطالعه از برخی از این مرزهای متقاطع صرف‌نظر شده است که نتایج در شکل ۲۷ نشان داده شده است. شکل ۲۷، طبقه ضریب زبری درزه را بدون وجود هرگونه تداخل مرز نشان می‌دهد. در این طبقه‌بندی ۷ محدوده با استفاده از ۶ مرز مشخص تعریف شده است. نقطه شروع مرز بین دو کلاس مختلف زبری با افزایش انحراف معیار ارتفاع دندانها افزایش می‌یابد. تقریباً شیب مرز بین کلاس‌های مختلف JRC با افزایش انحراف معیار ارتفاع دندانها کاهش می‌یابد.

برش وابسته است از این‌رو قابلیت تعیین ناهمسانگردی پروفیل زبری را دارد اما تعیین این پارامتر نسبتاً پیچیده است و درک فیزیکی از این پارامتر دشوار است و خروجی نتایج با حالت شماره ۶ تفاوت چندانی ندارد. مقادیر SD_{PHV} به فاصله داده‌برداری از پروفیل درزه بسیار حساس است. با توجه به این مطلب که ۱۱۲ پروفیل مورد بررسی با فاصله داده‌برداری ۰/۴ میلی‌متر از منابع استخراج شده‌اند شکل ۲۳ تنها برای این فاصله داده‌برداری اعتبار دارد. Z_2 یکی از پرکاربردترین پارامترهای مورد استفاده در تعریف زبری محسوب می‌شود که تأثیر متقابل آن بر مقدار JRC در شکل ۲۴ نشان داده شده است. به علت پراکندگی داده‌ها مرز بین کلاس‌های مختلف زبری منظم نیست و این امر در زبری‌های بیش از ۱۴ بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. نمای کلی شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ نسبتاً شبیه به یکدیگر هستند. همان‌طور که در مطالب قبلی اشاره شد حالت شماره ۶ به‌عنوان مناسب‌ترین حالت برای طبقه‌بندی JRC انتخاب شد. مرز بین کلاس‌های مختلف JRC با استفاده از روش بردار پشتیبان بر روی نتایج حاصل از این حالت محاسبه شد. روش طبقه‌بندی بردار پشتیبان یک روش مناسب برای تعیین مرز بین کلاس‌ها مختلف زبری محسوب می‌شود. طبقه‌بندی JRC با استفاده از طبقه بندی SVM انجام شد. که نتایج در شکل ۲۶ گزارش شده است. شکل ۲۶ به‌عنوان



شکل ۲۶- طبقه بندی آماری ضریب زبری درزه (SCJRC)



شکل ۲۷- طبقه‌بندی اصلاح شده آماری ضریب زبری درزه

گذار است. از اینرو کیفیت ارزیابی انجام گرفته در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶: تخمین کلاس‌های مختلف زبری با استفاده از SCJRC

کل	تخمین نادرست		تخمین صحیح		JRC
	تعداد	درصد (%)	تعداد	درصد (%)	
۱	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	JRC 0-2
۳۰	۲۰	۶	۸۰	۲۴	JRC 2-6
۴۲	۱۹	۸	۸۱	۳۴	JRC 6-10
۱۸	۱۱	۲	۸۹	۱۶	JRC 10-14
۱۰	۱۰	۱	۹۰	۹	JRC 14-16
۷	۴۳	۳	۵۷	۴	JRC 16-18
۴	۲۵	۱	۷۵	۳	JRC 18-20
۱۱۲	۱۹	۲۱	۸۱	۹۱	کل

۲-۴- اعتبار سنجی طبقه‌بندی آماری JRC

نتایج نشان می‌دهد که تعیین دقیق مقدار JRC با استفاده از پروفیل‌های دوبعدی درزه بسیار دشوار است و با محدودیت‌هایی روبرو است. اما در اغلب پروژه‌های معدنی استفاده از پروفیل‌های دوبعدی زبری برای انجام مطالعات استفاده می‌شود.

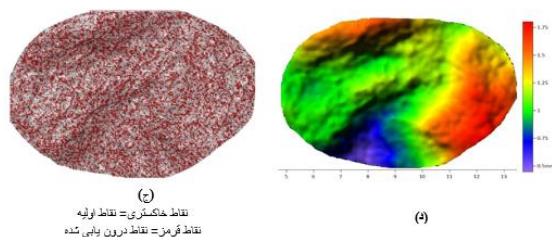
مقدار شیب مرز بین کلاس‌های JRC با افزایش JRC کاهش می‌یابد و حتی در مرز JRC برابر با ۱۸، شیب خط مثبت می‌شود. این بدین معنی است که در یک کلاس مشخص JRC در صورتی که مقدار انحراف معیار ارتفاع دندانها افزایش یابد به صورت کلی مقدار تغییرات زاویه دندانها کاهش می‌یابد. هر چه شیب مرز بین دو کلاس زبری بیشتر باشد تأثیر انحراف معیار ارتفاع دندانها بر پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌شود. با این وجود همواره با افزایش JRC نقطه شروع انحراف معیار ارتفاع دندانها افزایش می‌یابد. محدوده تغییرات SD_H با افزایش مقدار JRC تغییر می‌کند.

همچنین در پروفیل‌هایی با دندانهای نسبتاً درشت نسبت به پروفیل‌هایی با دندانهای نسبتاً ریز تغییرات ارتفاع دندانها بیشتر است. از اینرو پروفیل‌های زبری درزه‌ای که به مرز بالایی طبقه‌بندی نزدیک هستند دندانهای نسبتاً ریزتری دارند و بالعکس پروفیل‌هایی که تقاطع پارامترهای آماری آنها نزدیک به مرز پایینی طبقه‌بندی ارائه شده قرار می‌گیرند غالباً دندانهای درشت‌تری دارند. از اینرو ناحیه پایین SCJRC به عنوان ناحیه دندانهای درشت تعریف شده است. و همچنین ناحیه بالایی SCJRC به عنوان ناحیه دندانهای ریز تعریف شده است.

تعداد پروفیل‌های مورد بررسی و درصد وزنی این پروفیل‌ها در کلاس‌ها مختلف زبری بر ارزیابی صورت گرفته تأثیر

جدول ۷: نتایج حاصل از آزمون برش مستقیم

نوع سنگ	شناسه	سطح مقطع (mm ²)	تنش نرمال (MPa)	درزه (MPa)	مقاومت فشاری سطح (درجه)	زاویه اصطکاک مینا (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	JRC (تحلیل برگشتی)
گنایس	S1	۴۰۱۷	۱٫۷	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۱	۱۳٫۲	
	S2	۳۵۲۱	۱٫۸	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۲	۱۳٫۵	
	S3	۳۳۱۸	۱٫۹۶	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۳	۱۴٫۲	
	S4	۳۷۹۳	۲٫۲۶	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۵	۱۴٫۴	
	S5	۵۵۴۱	۲٫۰۸	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۴	۱۴٫۶	
	S6	۴۱۱۱	۲٫۵	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۷	۱۷٫۷	
	S7	۳۴۷۴	۳٫۳۳	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۶	۵٫۱	
	S8	۴۷۶۹	۳٫۵	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۷	۶٫۲	
	S9	۲۵۰۸	۳٫۸۷	۲۸٫۴	۲۲٫۷	۱٫۹	۶٫۲	
	S10	۳۴۲۰	۲٫۳۶	۳۹٫۸	۲۳٫۳	۱٫۳	۶٫۴	
شپست	S11	۴۱۶۳	۲٫۸۲	۳۹٫۸	۲۳٫۳	۱٫۵	۶٫۵	
	S12	۴۹۱۶	۲٫۰	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۳	۷٫۰	
	S13	۳۲۴۸	۱٫۸	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۲	۷٫۳	
	S14	۳۸۶۶	۲٫۳۵	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۵	۸٫۵	
	S15	۳۲۴۸	۱٫۸	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۲	۸٫۷	
	S16	۳۸۶۶	۲٫۳۵	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۵	۹٫۱	
	S17	۴۴۰۸	۳٫۵	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۲٫۱	۹٫۴	
	S18	۴۷۰۲	۳٫۰	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۹	۹٫۹	
	S19	۴۷۰۲	۳٫۰	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۱٫۹	۱۰٫۸	
	S20	۲۰۴۴	۴٫۰	۲۳٫۳	۲۷٫۴	۲٫۵	۱۲٫۶	



شکل ۲۹: انجام عملیات فتوگرامتری کوتاه‌برد
الف: دوربین مورد استفاده، ب: نقاط نشانه،
ج: نقاط اولیه و درون‌یابی شده، د: سطح تولید شده

به‌منظور اعتبار سنجی طبقه‌بندی ارائه‌شده پروفیل مرکزی ۲۰ نمونه درزه طبیعی با استفاده از عملیات فتوگرامتری برداشت شد. و مقادیر دو پارامتر آماری SD_H و SD_A برای تک‌تک پروفیل‌ها محاسبه شد. درنهایت با استفاده از دستگاه آزمایش برش مستقیم مرکز تحقیقات ژئومکانیک کاشیگر (KGMC)، آزمایش برش مستقیم انجام شد (شکل ۲۸). ظرفیت بازوی نرمال و برشی این دستگاه به ترتیب ۱۰ و ۱۵ تن است و امکان انجام آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌هایی با حداکثر ابعاد ۱۴ در ۱۴ سانتی‌متر در این دستگاه وجود دارد. تمامی جابجایی‌های نرمال و برشی در حین آزمایش برش مستقیم توسط جابجایی سنج برداشت می‌شود.

آزمون‌های برش مستقیم بر روی درزه‌های طبیعی حاصل از مغزه‌های حفاری‌شده بر روی سه جنس مختلف سنگ (گنایس، کوارتز شپست و میکا شپست)، با استفاده از دستگاه برش مستقیم مرکز ژئومکانیک کاشیگر انجام شده است. قبل از انجام هر آزمایش برش مستقیم سطوح درزه با استفاده از عملیات فتوگرامتری کوتاه‌برد به‌صورت سه‌بعدی برداشت‌شده است. در این روش پس از قالب‌ریزی نمونه‌های درزه دارد، نقاط نشانه بر روی قالب برش مشخص شد و با استفاده از انجام عملیات فتوگرامتری کوتاه‌برد سطح سه‌بعدی درزه حاصل شد و پروفیل مرکزی به‌عنوان پروفیل معرف انتخاب‌شده است (شکل ۲۹). آزمون برش مستقیم با نرخ یک میلی‌متر بر دقیقه انجام‌شده است. ضریب زبری درزه با استفاده از تحلیل برگشتی محاسبه‌شده است. جدول ۷ نتایج حاصل از آزمون برش مستقیم را نشان می‌دهد.

خروجی آزمایش برش مستقیم به‌صورت مستقیم با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه بر روی کامپیوتر قابل‌مشاهده است. مقدار JRC با استفاده از روش آنالیز معکوس تعیین شد. درنهایت پس از مقایسه نتایج حاصل از تخمین مقدار JRC با دو پارامتر SD_H و SD_A با استفاده از SCJRC انجام شد و نتایج با خروجی آزمون‌های برش مستقیم اعتبار سنجی شد. مقایسه نتایج در شکل ۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۸- دستگاه آزمایش برش مستقیم KGMC

- مقدار ضریب همبستگی پیرسون 0.8 برای طبقه‌بندی زبری مناسب است.
- حالت‌های $SD_{PHV}-SD_H$ ، Z_2-SD_H ، SD_A-SD_H و $Grasselli_{2D}-SD_H$ برای طبقه‌بندی زبری درزه مناسب هستند.
- طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه یک روش مناسب برای تخمین مقدار JRC است
- تخمین JRC با استفاده از پروفیل‌های دوبعدی همواره با محدودیت همراه است.

تشکر و قدردانی

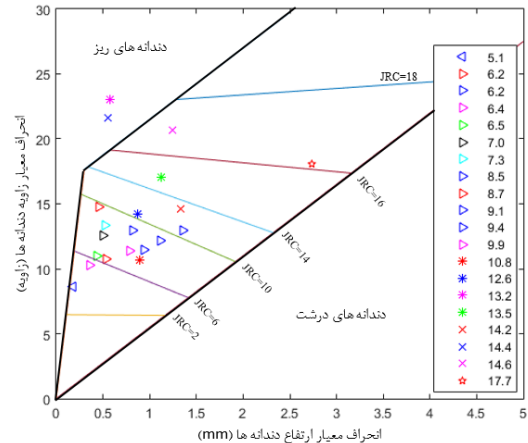
تشکر و قدردانی می‌کنم از مدیریت مرکز ژئومکانیک کاشی گر که شرایط را برای انجام این مطالعه فراهم نمودند.

پی‌نوشت

- 1- Support Vector Machine
- 2- hyper plane
- 3- Joint roughness coefficient
- 4- Pearson Correlation Coefficient
- 5- Underline
- 6- Bold
- 7- Italic
- 8- Statistical Classification of Joint Roughness Coefficient

منابع

1. Wittke, W; 2014; "Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM)"; John Wiley & Sons. ISBN: 978-3-433-03079-0.
2. ISRM, I.; 1978; "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on the standardization of Laboratory and Field Tests in Rock Mechanics"; ISRM.
3. Barton, N. & V. Choubey; 1977; "The shear strength of rock joints in theory and practice"; Rock mechanics 10(1-2): 1-54.
4. Babanouri, N. & S. Karimi-Nasab & S. Sarafrazi; 2013; "A hybrid particle swarm optimization and multi-layer perceptron algorithm for bivariate fractal analysis of rock fractures roughness"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 60: 66-74.
5. Park, J.-W., Y.-K. Lee, J.-J. Song & B.-H. Choi; 2013; "A constitutive model for shear behavior of rock joints based on three-dimensional quantification of joint roughness"; Rock mechanics and rock engineering 46(6): 1513-1537.
6. Babanouri, N. & S. Karimi-Nasab; 2015; "Modeling spatial structure of rock fracture



شکل ۳۰- اعتبار سنجی طبقه‌بندی آماری JRC

نتایج نشان می‌دهد که طبقه‌بندی SCJRC از اعتبار مناسب برای تخمین مقدار زبری برخوردار است. بیش از ۷۰ درصد نتایج پیش‌بینی طبقه‌بندی SCJRC با نتایج آزمایشگاهی طبق دارد و حدود ۲۰ درصد نتایج مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی یک کلاس فاصله دارد. وجود داده‌ها خارج از محدوده نشان می‌دهد که تخمین زبری با استفاده از پروفیل‌ها دوبعدی همواره با محدودیت‌هایی روبرو است. وجود دندانهای تصادفی یا زبری ثانویه و انتخاب پروفیل معرف از این دسته محدودیت‌ها محسوب می‌شود. با توجه به تغییرات زیاد زبری در پروژه‌های عملیاتی و با حجم کاری بالا تخمین زبری با استفاده از طبقه‌بندی SCJRC می‌تواند در مراحل ابتدای کار طراحی جوابگوی نیاز مهندسان باشد و به‌منظور صحت سنجی برداشت‌های میدانی در مطالعات ژئوتکنیک استفاده شود.

۵- نتیجه‌گیری

- این مطالعه با استفاده از ۱۱۲ پروفیل زبری یک طبقه‌بندی آماری ضریب زبری درزه تعریف شد و نتایج با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبار سنجی شد نتایج نشان می‌دهد که
- با افزایش متوسط پارامترهای آماری Z_2 ، R_p ، $Grasselli_{2D}$ ، SD_A ، SD_H و SD_{PHV} مقدار JRC افزایش می‌یابد.
 - با افزایش مقدار JRC محدودیت تغییرات زبری افزایش می‌یابد.
 - با افزایش مقدار JRC دقت تخمین آن توسط پارامترهای آماری و زمین‌آماری کاهش می‌یابد.
 - پروفیل‌ها زبری متعددی وجود دارد که مورفولوژی مختلف دارند ولی مقدار JRC آن‌ها یکسان است.
 - حالت‌های Z_2-R_p و $SD_{PHV}-R_p$ و $SD_{PHV}-Z_2$ بیشترین ضریب همبستگی پیرسون را دارند.

- bonded particle model simulation of shear strength and asperity degradation for rough rock fractures*"; Rock Mechanics and Rock Engineering 45(5): 649-675.
15. Rasouli, V. & J. Harrison; 2010; "Assessment of rock fracture surface roughness using Riemannian statistics of linear profiles"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 47(6): 940-948.
 16. Lê, H. K., W.-C. Huang, M.-C. Liao & M.-C. Weng; 2018; "Spatial characteristics of rock joint profile roughness and mechanical behavior of a randomly generated rock joint"; Engineering Geology 245: 97-105.
 17. Fecker, E. (1978). "Geotechnical description and classification of joint surfaces"; Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur 18(1): 111-120.
 18. Chen, S., W. Zhu, Q. Yu & X. Liu; 2016; "Characterization of anisotropy of joint surface roughness and aperture by variogram approach based on digital image processing technique"; Rock Mechanics and Rock Engineering 49(3): 855-876.
 19. Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. ;1992; "A training algorithm for optimal margin classifiers"; In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory (pp. 144-152).
 20. Li, Y., & Huang, R.; 2015; "Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 75, 15-22.
 7. Fathi, A., Z. Moradian, P. Rivard, G. Ballivy & A. J. Boyd; 2016; "Geometric effect of asperities on shear mechanism of rock joints"; Rock Mechanics and Rock Engineering 49(3): 801-820.
 8. Lianheng, Z., Z. Shuaihao, H. Dongliang, Z. Shi & L. Dejia; 2018; "Quantitative characterization of joint roughness based on semivariogram parameters"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 109: 1-8.
 9. Grasselli, G.; 2001; "Shear strength of rock joints based on quantified surface description"; EPFL.
 10. Grasselli, G. & P. Egger; 2003; "Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40(1): 25-40.
 11. He, Z.-m., Z.-y. Xiong, Q.-g. Hu & M. Yang; 2014; "Analytical and numerical solutions for shear mechanical behaviors of structural plane"; Journal of Central South University 21(7): 2944-2949.
 12. Huan, J.-y., M.-m. He, Z.-q. Zhang & N. Li; 2019; "A New Method to Estimate the Joint Roughness Coefficient by Back Calculation of Shear Strength." Advances in Civil Engineering 2019.
 13. Gravanis, E. & L. Pantelidis; 2019; "Determining of the Joint Roughness Coefficient (JRC) of Rock Discontinuities Based on the Theory of Random Fields"; Geosciences 9(7): 295.
 14. Asadi, M. S., V. Rasouli & G. Barla; 2012; "A