

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

مدل سازی آماری هندسه درزه سنگ به منظور برآورد زبری

نگارنده: علیرضا طالبی نژاد

اساتید راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر رضا خالو کاکایی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۴۹۷/۳۰۷۵-۴  
تاریخ: ۹۷/۷/۱۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

ویرایش:

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای علیرضا طالبی نژاد دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن - گرایش استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۰۲۳۱۹۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۰ در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۲۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: مدل سازی آماری هندسه درزه سنگ به منظور برآورد زبری دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۳ به درجه بسیار خوب نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر رضا خالو کاکایی	استاد راهنما	استاد	
۳	دکتر حسین میرزایی	استاد خارجی	استادیار	
۴	دکتر احمد رمضان زاده	استاد داخلی	استادیار	
۵	دکتر شکرالله زارع	استادیار	دانشیار	
۶	دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای علیرضا طالبی نژاد. بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

روح پاک پدرم که از ایشان هر چه می‌گویم باز هم کم می‌آورم  
و تقدیم به مقدس‌ترین واژه‌ها در لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگی را مدیون مهر و عطوفت آن  
می‌دانم

تقدیم به همسر مهربانم که نشانه لطف الهی در زندگی من است  
و تقدیم به برادر و خواهر عزیزم همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگی  
و آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند.

## تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر که در قالب این رساله ارایه می‌شود در بازه زمانی سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. در این بازه زمانی افراد زیادی مشاوره، همکاری و حمایت‌های لازم را برای تحقق این رساله با اینجانب داشته‌اند که لازم است صمیمانه از آن‌ها تشکر و قدردانی نمایم.

اول از همه، بر خود لازم می‌دانم از استاد ارزشمندم جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند سپاسگزاری نمایم. از استاد محترم جناب آقای دکتر رضا خالو کاکایی که زحمت راهنمایی این رساله را متقبل شدند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از حمایت‌های بی‌دریغ جناب آقای دکتر کارآموزیان مدیر گروه استخراج معدن دانشکده نیز تشکر و قدردانی می‌نمایم. از کلیه اساتید و کارمندان محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که در طول دوره تحصیلی، زحمات و تلاش‌های دلسوزانه‌شان هموارکننده مسیر علم و دانش برای بنده بوده است، کمال تشکر را دارم.

از زحمات آقای دکتر حسینی‌نوه، استاد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی برای در اختیار قرار دادن آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه و حمایت و مشاوره ایشان در فرایند برداشت آزمایشگاهی کمال تشکر و قدردانی را دارم. از آقایان مهندسین بهروز مرادی و سعید اجاقی کارشناسان ارشد نقشه‌برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی از بابت همکاری در تجهیز و آماده‌سازی نمونه‌ها و فرایند برداشت سطوح درزه‌سنگ سپاسگزاری می‌نمایم.

از همسر مهربانم به خاطر گذشت و فداکاری همیشگی، همراهی در تمامی شرایط سخت، قبول شرایط زندگی دانشجویی بنده و به عنوان مشوقی خیرخواه، کمال سپاسگذاری را دارم.

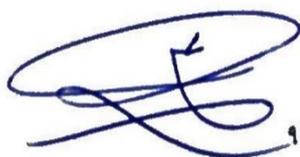
و در پایان از کلیه دوستانم به خصوص آقایان دکتر چاکری، دکتر امامی میبدی، مهندس تبرمایه، مهندس امیر آزادمهر، دکتر سید مرتضی حسینی، مهندس عین الله عامری و مهندس میثم سالکی که در طی دوران دانشگاهی با مساعدت‌های بی‌دریغشان محیطی دوستانه، گرم و صمیمی برای بنده فراهم نمودند، سپاسگذاری می‌کنم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات این عزیزان را سپاس گوید.

## تعهد نامه

اینجانب علیرضا طالبی نژاد دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله "مدلسازی آماری هندسه درزه‌سنگ به منظور برآورد زبری" متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.



امضاء

تاریخ: ۹۷/۰۶/۱۰

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تاکنون محققین متعددی تلاش نموده‌اند که با ساده‌سازی و اعمال فرضیات مختلف به بررسی تاثیر زبری درزه‌سنگ بر شاخص‌های مقاومتی توده‌سنگ بپردازند. برخی از محققین نسبت به ارائه مدل‌های مشاهده‌ای اقدام نموده‌اند که در این گونه مدل‌ها، هدف استفاده و تطبیق زبری سطح درزه‌سنگ با مدل‌های ارائه شده و برآورد میزان زبری سطح درزه‌سنگ بوده است. برخی از محققین نیز از روش‌های آماری به بیان کمی زبری سطح درزه‌سنگ پرداخته‌اند. روش‌های مشاهده‌ای با وجود اینکه ساده و سریع هستند، اما با خطای قضاوت شخص و عدم امکان بررسی ارجحیت زبری یک سطح نسبت به سطح دیگر همراه هستند و برآورد زبری درزه‌سنگ را با خطا مواجه می‌نمایند. در روش‌های کمی، استفاده از یک پارامتر کمی نمی‌تواند به صورت صحیح بیان‌گر هندسه درزه‌سنگ (زبری) باشد. بنابراین، با بررسی‌های آماری صورت گرفته در این رساله در دو مرحله برآورد زبری درزه‌سنگ ارائه شده است. در مرحله اول، با برداشت‌های میدانی انجام شده از وضعیت سطوح درزه‌سنگ با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه و اطلاعات گردآوری شده از سطوح موجود در منابع (۲۰۳ نمونه)، نسبت به تعریف اشکال محتمل هندسی درزه‌سنگ اقدام شده است. اشکال محتمل هندسی مورد بررسی قرار گرفته و اشکال با کاربرد بیشتر در قالب ۲۰ مدل هندسی به عنوان مدل‌های هندسی معرف تعریف شده‌اند. در این طبقه‌بندی، با استفاده از شباهت سطح درزه به مدل‌های هندسی معرف و مدنظر قرار دادن ارتفاع کلی سطح درزه (K) به برآورد صحیح‌تری از میزان زبری درزه می‌توان دست یافت.

در مرحله دوم یک طبقه‌بندی جدید از زبری با الهام از وضعیت شکل سطوح درزه‌سنگ ارائه شده است. با بررسی آماری حالات مختلف ممکن از وضعیت سطح زبر در یک مقطع ۱۰ سانتی‌متری، طول درزه‌سنگ به  $n$  قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت، چهار ارتفاع مختلف لحاظ شده و کل حالات ممکن برای اشکال سطح درزه‌سنگ تعریف شده است. در این روش جدید طبقه‌بندی که طبقه‌بندی

چرتکه‌ای<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، تمامی حالات ممکن برای ایجاد یک سطح زبر پوشش داده شده است. رده‌های ارائه شده در این طبقه‌بندی، بر اساس وضعیت بیشینه ارتفاع سطح درزه، اختلاف ارتفاع بین سطوح و همچنین تکرارپذیری اختلاف ارتفاع‌ها تمایز یافته‌اند. رده‌های ارائه شده در این طبقه‌بندی با جامعه آماری مناسبی (۱۱۲ نمونه درزه‌سنگ) از داده‌های حاصل از سطوح زبر درزه‌سنگ حاوی ضریب زبری درزه متناظر، به مقدار عددی JRC منتسب شده‌اند. طبقه‌بندی مذکور برای حالات چهار و شش قسمتی با چهار ارتفاع مختلف مورد بررسی قرار گرفته و ضریب همبستگی مناسبی (۰/۹۹) با JRC حاصل شده است. با استفاده از روش طبقه‌بندی ارائه شده در این رساله، کاربر با داشتن مختصات سطح درزه‌سنگ و روش تقسیم‌بندی ساده آن در چهارچوب ارائه شده، می‌تواند با دقت مناسب و زمان کوتاه به میزان زبری درزه‌سنگ بدون خطاهای ناشی از روش‌های کیفی موجود دست یابد.

**کلمات کلیدی:** درزه‌سنگ، زبری، مدل‌های هندسی معرف، مدل چرتکه‌ای، پارامترهای کمی

---

<sup>1</sup> Abacus Classification

## لیست مقالات مستخرج از رساله

۱- طالبی نژاد، ع، جلالی، س م ا، کاکایی، ر، اجاقی، س، (۱۳۹۶)، فرایند برداشت زبری سطوح درزه سنگ به روش فتوگرامتری برد کوتاه، کنفرانس ملی تحقیق و توسعه در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی نوین، تهران، ایران.

۲- طالبی نژاد، ع، جلالی، س م ا، کاکایی، ر، کیوانی، ا، (۱۳۹۶)، تعیین پارامترهای کمی زبری درزه سنگ با استفاده از مطالعات آماری، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- طالبی نژاد، ع، جلالی، س م ا، کاکایی، ر، (۱۳۹۷)، بررسی تاثیر شکل هندسه درزه در برآورد زبری درزه سنگ با استفاده از مطالعات آماری، نشریه علمی- پژوهشی مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- طالبی نژاد، ع، جلالی، س م ا، کاکایی، ر، (۱۳۹۷)، ارایه طبقه‌بندی جدید از برآورد زبری درزه سنگ با استفاده از مطالعات آماری، نشریه علمی- پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دانشگاه یزد، ایران.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۵	۲-۱- اهداف
۶	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق:
۷	۴-۱- روش انجام کار:
۸	۵-۱- مراحل انجام کار:
۹	۶-۱- ساختار رساله:
۱۱	فصل دوم: مروری بر روش‌های برداشت و تعیین زبری درزه سنگ
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- روش‌های تعیین زبری درزه
۱۳	۱-۲-۲- روش‌های تماسی
۱۴	۱-۲-۲-۱- مقطع‌سنجی مکانیکی
۱۵	۲-۲-۲-۲- کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی
۱۶	۳-۲-۲-۲- روش لبه مستقیم
۱۸	۲-۲-۲-۲- روش‌های غیرتماسی
۲۰	۳-۲- روش‌های برآورد زبری سطح ناپیوستگی
۲۰	۱-۳-۲- روش‌های مشاهده‌ای و کیفی
۲۱	۱-۳-۲-۱- روش ضریب زبری درزه (JRC)
۲۲	۲-۳-۲-۱- روش‌های پیشنهادی ISRM
۲۴	۳-۳-۲-۱- منحنی‌های زبری لابسچر
۲۵	۴-۳-۲-۱- روش استفاده شده در سیستم SSPC
۲۸	۲-۳-۲- روش‌های کمی برآورد زبری
۲۸	۱-۳-۲-۲- آزمایش‌های مکانیکی (شیب‌سنج)
۲۹	۲-۳-۲- روش‌های آماری
۳۴	۳-۳-۲- روش‌های تصادفی
۳۵	۴-۳-۲- روش‌های طیف توان
۳۵	۵-۳-۲- روش فراکتال
۳۸	۶-۳-۲- سایر روش‌ها
۴۰	۴-۲- جمع‌بندی
۴۳	فصل سوم: گردآوری و اندازه‌گیری داده‌ها
۴۴	۱-۳- مقدمه
۴۴	۲-۳- فتوگرامتری برد کوتاه
۴۶	۱-۲-۳- مبانی ایجاد مدل سه‌بعدی با فتوگرامتری برد کوتاه

۴۸	-----	۲-۲-۳- مراحل پیاده‌سازی و روندنمای فتوگرامتری برد کوتاه درزه‌سنگ
۴۹	-----	۳-۲-۳- آماده‌سازی سطح درزه‌سنگ، نشانه‌گذاری، دوربین و مقیاس‌گذاری
۵۷	-----	۴-۲-۳- طراحی شبکه
۵۸	-----	۵-۲-۳- تصویربرداری
۵۹	-----	۶-۲-۳- رقومی‌سازی سطح درزه‌سنگ
۶۶	-----	۳-۳- گردآوری نمونه‌های زبر درزه‌سنگ
۶۸	-----	۴-۳- جمع‌بندی
۶۹	-----	<b>فصل چهارم: مطالعات آماری هندسه سطوح زبر درزه‌سنگ</b>
۷۰	-----	۱-۴- مقدمه
۷۰	-----	۲-۴- بررسی پارامترهای کمی زبری درزه‌سنگ
۷۱	-----	۱-۲-۴- پارامتر K
۷۲	-----	۲-۲-۴- پارامتر CLA
۷۳	-----	۳-۲-۴- پارامتر a/L
۷۴	-----	۴-۲-۴- پارامتر R <sub>p</sub>
۷۵	-----	۵-۲-۴- اندیس افزایش طول درزه δ
۷۶	-----	۶-۲-۴- پارامتر R <sub>q</sub>
۷۷	-----	۷-۲-۴- پارامتر MSV
۷۷	-----	۸-۲-۴- پارامتر Z <sub>2</sub>
۷۹	-----	۹-۲-۴- پارامتر SF
۸۰	-----	۱۰-۲-۴- آرایه پارامتر جدید R <sub>TH</sub>
۸۱	-----	۱۱-۲-۴- پارامتر زاویه میانگین درزه + θ
۸۲	-----	۳-۴- بررسی کاستی‌های برآورد زبری
۸۵	-----	۴-۴- بررسی هندسه سطح درزه‌سنگ
۸۶	-----	۱-۴-۴- اشکال هندسی منطبق بر نمونه‌های زبر درزه‌سنگ
۹۱	-----	۵-۴- جمع‌بندی
۹۳	-----	<b>فصل پنجم: برآورد زبری درزه‌سنگ و آرایه طبقه‌بندی جدید</b>
۹۴	-----	۱-۵- مقدمه
۹۴	-----	۲-۵- تعیین زبری درزه‌سنگ با استفاده از عملگر شکل
۹۴	-----	۱-۲-۵- مدل‌های هندسی معرف
۹۷	-----	۲-۲-۵- مراحل انجام کار (مدل عملگر شکل)
۹۸	-----	۳-۲-۵- اولویت‌بندی مدل‌های هندسی معرف
۱۰۷	-----	۳-۵- آرایه طبقه‌بندی جدید (مدل چرتکه‌ای)
۱۰۷	-----	۱-۳-۵- ساختار مدل چرتکه‌ای
۱۰۹	-----	۲-۳-۵- فضای نمونه
۱۱۱	-----	۳-۳-۵- طبقه‌بندی سطوح زبر

۱۱۴	-----	۴-۳-۵-اعتبارسنجی مدل
۱۲۲	-----	۴-۵- جمع بندی
۱۲۵	-----	<b>فصل ششم: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها</b>
۱۲۶	-----	۱-۶- جمع بندی
۱۲۷	-----	۲-۶- نتیجه گیری
۱۲۹	-----	۳-۶- پیشنهادها و ارایه زمینه های کاری آتی
۱۳۰	-----	مراجع
۱۳۶	-----	پیوست

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- دستگاه نگارنده درزه به صورت سه بعدی ----- ۱۴
- شکل ۲-۲- اندازه گیری زبری به روش کمپاس و انحراف سنج دیسکی ----- ۱۵
- شکل ۳-۲- اندازه گیری موج داری درزه به روش لبه مستقیم ----- ۱۷
- شکل ۴-۲- برآورد زبری درزه سنگ به روش لبه مستقیم ----- ۱۸
- شکل ۵-۲- مقاطع زبری و تعریف مربوطه ارایه شده توسط ISRM (۱۹۷۸)، طول هر مقطع در بازه ۱ تا ۱۰ متر ----- ۲۳
- شکل ۶-۲- مقاطع زبری لابسچر ----- ۲۴
- شکل ۷-۲- تعریف زبری به عنوان تابعی از مقیاس و زاویه در سیستم SSPC ----- ۲۵
- شکل ۸-۲- آزمایش سطح شیب دار برای اندازه گیری JRC ----- ۲۹
- شکل ۹-۲- تعیین زبری سطح ----- ۳۱
- شکل ۱۰-۲- نمایش خود تشابهی سطوح فراکتال ----- ۳۶
- شکل ۱۱-۲- خصوصیت تشکیل از راه تکرار ----- ۳۶
- شکل ۱۲-۲- رابطه خطی بین JRC و SF (ارایه شده توسط تسه و کروندن) و رابطه لگاریتمی همان متغیرها ارایه شده توسط رسولی و هاریسون ----- ۳۹
- شکل ۱-۳- روند اجرایی یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه ----- ۴۷
- شکل ۲-۳- ابعاد نشانه های استفاده شده در فتوگرامتری برد کوتاه متناسب با فاصله از شی مورد نظر ----- ۴۷
- شکل ۳-۳- روندنمای استخراج مقاطع سطح زبر درزه سنگ در روش فتوگرامتری برد کوتاه ----- ۴۹
- شکل ۴-۳- آماده سازی محیط برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه در آزمایشگاه ----- ۵۱
- شکل ۵-۳- برخی نمونه های آماده شده برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه ----- ۵۲
- شکل ۶-۳- مرحله آماده سازی برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه (رخنمون بلوک های سنگی محدوده جاده مشکین شهر) ----- ۵۳
- شکل ۷-۳- نمونه های صحرایی برداشت شده شامل سنگ های آذرین و رسوبی ----- ۵۴
- شکل ۸-۳- استفاده از نشانه ها برای حل مقیاس تصاویر در فتوگرامتری برد کوتاه ----- ۵۶
- شکل ۹-۳- مشخصات دوربین تصویربرداری استفاده شده در برداشت سطوح زبر درزه سنگ ----- ۵۷
- شکل ۱۰-۳- مجموعه ای از تصاویر اخذ شده به همراه ایستگاه های تصویربرداری ----- ۵۹
- شکل ۱۱-۳- جهات تصویربرداری از سطح درزه سنگ ----- ۶۰
- شکل ۱۲-۳- ابر نقاط ایجاد شده بر روی سه نمونه سنگ گرانیت و نشانه های شناسایی شده توسط نرم افزار ----- ۶۲
- شکل ۱۳-۳- بزرگنمایی ابر نقاط و تعداد نقاط ایجاد شده ----- ۶۳
- شکل ۱۴-۳- مش بندی ایجاد شده برای سطح درزه سنگ گرانیتی ----- ۶۳
- شکل ۱۵-۳- استخراج مقطع دو بعدی سطح درزه سنگ ----- ۶۴
- شکل ۱۶-۳- برخی نمونه های سطح زبر استخراج شده به روش فتوگرامتری برد کوتاه ----- ۶۶
- شکل ۱۷-۳- برخی نمونه های سطح زبر استخراج شده از منابع محققین پیشین ----- ۶۸
- شکل ۱-۴- رابطه بین پارامتر K و JRC ----- ۷۲

- شکل ۴-۲- دو نمونه سطح زبر درزه‌سنگ (الف و ب) با مقادیر  $K$  یکسان اما وضعیت زبری کاملاً متفاوت --- ۷۲
- شکل ۴-۳- رابطه بین پارامتر  $JRC$  و  $CLA$  ----- ۷۳
- شکل ۴-۴- رابطه بین پارامتر  $a/L$  و  $JRC$  ----- ۷۴
- شکل ۴-۵- رابطه بین پارامتر  $R_p$  و  $JRC$  ----- ۷۴
- شکل ۴-۶- دو هندسه شماتیک با طول مساوی ولی عملکرد متفاوت، مثالی برای پارامتر  $r_p$  ----- ۷۵
- شکل ۴-۷- رابطه بین پارامتر  $\delta$  و  $JRC$  ----- ۷۵
- شکل ۴-۸- رابطه بین  $JRC$  و  $R_q$  ----- ۷۶
- شکل ۴-۹- رابطه بین  $JRC$  و  $MSV$  ----- ۷۷
- شکل ۴-۱۰- رابطه بین  $JRC$  و  $Z_2$  ----- ۷۸
- شکل ۴-۱۱- رابطه بین  $JRC$  و  $SF$  ----- ۸۰
- شکل ۴-۱۲- رابطه بین  $JRC$  و  $R_{TH}$  ----- ۸۱
- شکل ۴-۱۳- رابطه بین  $JRC$  و  $\theta +$  ----- ۸۲
- شکل ۴-۱۴- برخی نمونه‌های نقض در پارامترهای کمی تعیین زبری همچون  $Z_2$ ,  $SF$  و  $R_q$  ----- ۸۴
- شکل ۴-۱۵- مدل هندسی دندان مثلی (افزایش شیب، تعداد دندان و ارتفاع بیشینه در این مدل هندسی لحاظ شده است) ----- ۸۷
- شکل ۴-۱۶- مدل هندسی دندان مثلی یک طرفه ----- ۸۷
- شکل ۴-۱۷- مدل هندسی دندان مستطیلی ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۸- مدل هندسی اشکال خاص (دندان ترکیبی) ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۹- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۱ تا ۴ ----- ۸۹
- شکل ۴-۲۰- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۵ تا ۸ ----- ۸۹
- شکل ۴-۲۱- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۹ تا ۱۲ ----- ۹۰
- شکل ۴-۲۲- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۱۳ تا ۱۶ ----- ۹۰
- شکل ۴-۲۳- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۱۷ تا ۲۰ ----- ۹۱
- شکل ۵-۱- مدل‌های هندسی معرف سطح زبر ----- ۹۵
- شکل ۵-۲- روندنمای مراحل انجام کار (استفاده از عملگرهای شکل) ----- ۹۸
- شکل ۵-۳- روند مقادیر پارامترهای  $Z_2$  و  $SF$  در مدل‌های هندسی مختلف با مقادیر مختلف  $K$  ----- ۱۰۰
- شکل ۵-۴- روند مقادیر پارامترهای  $R_p$  و  $R_q$  در مدل‌های هندسی مختلف با مقادیر مختلف  $K$  ----- ۱۰۱
- شکل ۵-۵- تاثیر مدل‌های هندسی معرف در مقادیر پارامترهای کمی زبری (الف)  $Z_2$ ، (ب)  $SF$ ، (ج)  $R_p$  و (د)  $R_q$  ----- ۱۰۲
- شکل ۵-۶- مقادیر  $Z_2$ ،  $K$  (محور افقی) و  $JRC$  (محور قائم) برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف ----- ۱۰۴
- شکل ۵-۷- اشکال هندسی معرف و روابط تجربی متناظر ----- ۱۰۶
- شکل ۵-۸- وضعیت قرارگیری تعداد مهره‌های چرتکه و ایجاد سطح زبر ----- ۱۰۸
- شکل ۵-۹- مشابهت حالات قرینه در مدل‌سازی چرتکه‌ای و حذف از حالات مورد بررسی ----- ۱۰۹
- شکل ۵-۱۰- حالت‌های با ارتفاع مشابه (سطح زبر یکسان) ----- ۱۱۰
- شکل ۵-۱۱- نمایش حالات مکمل با سطح زبر مشابه ----- ۱۱۰

- شکل ۵-۱۲- نمونه‌ای از حالات با سطح زبر یکسان ----- ۱۱۱
- شکل ۵-۱۳- استخراج مدل‌های چرتکه‌ای از نمونه‌های سطح زبر درزه ----- ۱۱۴
- شکل ۵-۱۴- تعیین مقدار ضریب زبری درزه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده ( $n=4$  و  $h=4$ ) ----- ۱۱۷
- شکل ۵-۱۵- روند استفاده از مدل چرتکه‌ای ----- ۱۱۸
- شکل ۵-۱۶- دو نمونه از سطوح زبر محتمل تشکیل شده با مدل چرتکه‌ای ( $n=6$  و  $h=4$ ) ----- ۱۲۰
- شکل ۵-۱۷- تعیین مقدار ضریب زبری درزه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده ( $n=6$  و  $H=4$ ) ----- ۱۲۰

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- روش‌های تعیین زبری درزه ----- ۱۲
- جدول ۲-۲- میزان عامل موج‌داری بر اساس نوع زبری ----- ۱۷
- جدول ۳-۲- طبقه‌بندی زبری ISRM ----- ۲۳
- جدول ۴-۲- تعاریف و مقادیر زبری سطح درزه ----- ۲۷
- جدول ۱-۳- تعداد نمونه‌های سطح درزه‌سنگ تحت مطالعه ----- ۶۷
- جدول ۱-۴- پارامترهای کمی تعیین زبری درزه‌سنگ ----- ۷۱
- جدول ۲-۴- روابط ارایه شده بین  $Z_2$  و JRC ----- ۷۸
- جدول ۳-۴- روابط ارایه شده بین JRC و SF ----- ۷۹
- جدول ۱-۵- طبقه‌بندی برای حالات مختلف سطح زبر درزه‌سنگ ----- ۱۱۳
- جدول ۲-۵- تعداد نمونه‌های تطبیق داده شده از نمونه‌های سطح زبر درزه‌سنگ به گروه‌های معرفی شده ----- ۱۱۵
- جدول ۳-۵- مدل‌های چرتکه‌ای استخراجی از برخی نمونه‌های سطح زبر درزه‌سنگ ----- ۱۱۶
- جدول ۴-۵- مدل چرتکه‌ای استخراج شده برای مقاطع استاندارد بارتن ----- ۱۲۲

# فصل اول: کلیات

امروزه مساله بهینه‌سازی در طراحی پایداری و کاهش هزینه‌های پروژه‌های معدنی و تونلی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی مهندسين است. پروژه‌های تونلی و معدنی که در محیط‌های سنگی طراحی و اجرا می‌شوند به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در شناخت رفتارهای مکانیکی توده‌سنگ، اکثراً با طرح‌های محافظه‌کارانه در تحلیل‌های پایداری فضاهای زیرزمینی و روباز مواجه هستند. خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ وابستگی شدید به ناپیوستگی‌های سنگ دارند بنابراین ارزیابی ویژگی‌های درزه‌ها بخش مهمی از مهندسی توده‌سنگ را تشکیل می‌دهد. شکل هندسی درزه در برآورد مقاومت برشی توده‌سنگ نقش به‌سزایی دارد. مقاومت برشی، رفتار تغییرشکل‌پذیری و خصوصیات جریان در درزه‌های سنگی به میزان زیادی به شرایط زبری سطح درزه بستگی دارد.

محققین مختلف تاکنون سعی بر لحاظ کردن پارامترهای تاثیرگذار زبری درزه در مطالعات برش درزه‌های سنگی داشته‌اند. برخی از روابط ارائه شده به صورت مشاهده‌ای به تعیین زبری پرداخته‌اند که در این حالت قضاوت کارشناس، تاثیرگذار در مقادیر مربوطه بوده و در عمل احتمال وجود اختلاف با مقادیر واقعی وجود دارد. برخی دیگر از روابط، به صورت تک‌پارامتری ارائه شده و صرفاً یک بعد یا شاخصه از عوامل مهم زبری در نظر گرفته شده است. با وجود این که معیار مقاومت برشی بارتن یکی از پر کاربردترین معیارهای رفتار برشی درزه است، اما اشکالاتی به این مدل وارد است. بیشتر اشکالات در نحوه تعیین ضریب زبری درزه JRC خلاصه می‌شود. به گونه‌ای که با تغییر این ضریب می‌توان محدوده‌ی گسترده‌ای از داده‌ها را پوشش داد؛ بنابراین ویژگی‌ای که به این اندازه بتواند در نتایج یک مدل تعیین کننده باشد، بهتر است که از روش‌های منطقی‌تر و معتبرتری محاسبه شود. برآورد درست خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار در طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی مانند پی سدها، حفاری‌های زیرزمینی و روباز تاثیر به‌سزایی دارد. بیشتر سنگ‌های موجود در پوسته زمین دارای ناپیوستگی‌هایی از نوع ترک‌ها، درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی و شیب‌توزیته و غیره هستند. با توجه به این که ماده سنگ سختی بیشتر و نفوذپذیری کمتری دارد، تغییر شکل و جریان آب بیشتر در

ناپیوستگی‌های سنگ رخ می‌دهد. بنابراین، خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ وابستگی شدید به ناپیوستگی‌های سنگ دارد و خصوصیات هندسی ناپیوستگی نقش بسزایی در تعیین آن دارد.

برآورد صحیح زبری سطح ناپیوستگی در رده‌بندی توده‌سنگ نیز نقش تعیین کننده دارد. تعیین زبری سطح ناپیوستگی با استفاده از داده‌های استاندارد و روش‌های کمی‌سازی برای برآورد صحیح مقاومت برشی، تغییرشکل پذیری و تحلیل‌های هیدرولیکی دارای اهمیت بسیار است. با توجه به تاثیر بسیار زیاد زبری درزه، روش‌های متعددی در مطالعات و مقالات مختلف برای تعیین زبری سطح درزه پیشنهاد و توسعه یافته است. محققین متعددی برای کمی‌سازی زبری سطح ناپیوستگی راهکارهای مختلفی را ارائه کرده‌اند. با توجه به اهمیت زبری پارامترهای مختلفی توسط محققین ارائه شده است. محققینی مانند لان و هک<sup>۱</sup>، پاتن<sup>۲</sup> و جیگر<sup>۳</sup> از اولین کسانی بودند که تاثیر اتساع را در مقاومت برشی درزه‌ها مورد توجه قرار داده‌اند (Lan and Hack, 1964, Paton, 1966, Jeager, 1995). ضریب زبری درزه (JRC<sup>۴</sup>) توسط بارتن<sup>۵</sup> (۱۹۷۳) ارائه شد که به صورت گسترده در علوم مهندسی سنگ استفاده شده است (Barton, 1973). این پارامتر زبری سنگ را بین اعداد صفر تا ۲۰ تعریف می‌نماید که مقدار آن با استفاده از آزمایش سطح شیب‌دار بدست می‌آید. روش مشاهده‌ای (کیفی) دیگری توسط ISRM<sup>۶</sup> در سال ۱۹۷۸ ارائه شد که در این روش نه مقطع استاندارد برای زبری درزه تعریف شده است. لابسچر<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۰، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ در طراحی معدن، یک سری عبارات توصیفی برای بیان زبری درزه‌سنگ تعریف نموده است. هک و همکارانش در سال ۱۹۹۸ یک رابطه تجربی بین زبری مشاهده‌ای و لمسی و بر اساس مقاطع معروف ارائه شده توسط ISRM (۱۹۸۱) و لابسچر (۱۹۹۰)، برای طبقه‌بندی احتمالاتی پایداری شیب توسعه داده‌اند (Hack et al, 1998). مزیت روش‌های کیفی

---

<sup>1</sup> Lan and Hack

<sup>2</sup> Patton

<sup>3</sup> Jeager

<sup>4</sup> Joint Roughness Coefficient

<sup>5</sup> Barton

<sup>6</sup> International Society of rock mechanics

<sup>7</sup> Laubscher

(مشاهده‌ای) ارایه شده، دستیابی ساده به مقادیر زبری درزه‌سنگ بوده و کاربران با سهولت بیشتری می‌توانند به مقادیر زبری دست یابند. اما لازم به توضیح است که میزان خطای ناشی از قضاوت در انطباق نمونه‌های زبر با مقاطع تعریف شده در این روش‌ها بالاست. محققین متعددی همچون السودانی<sup>۱</sup>، تسه و کرودن<sup>۲</sup>، میرز و همکاران<sup>۳</sup>، یو و ایساده<sup>۴</sup>، مورالها<sup>۵</sup> و لی و ژانگ<sup>۶</sup> از پارامترهای کمی برای تعریف زبری درزه‌سنگ استفاده کرده و روابطی بین پارامترهای تعریف شده با JRC ارایه نموده‌اند (Elsoudani, 1978, Tse and Cruden, 1979, Yu and Vayssade, 1991, Muralha, 1995, Li and Zhang, 1990, Maerz et al, 2015). اگر چه لازم به ذکر است که قابلیت کاربرد و اطمینان خصوصیات زبری درزه مشخص شده به طور عمده‌ای وابسته به صحت و دقت داده‌های جمع‌آوری شده است.

برخی از روش‌ها همچون تحلیل واریوگرام، طیف‌سنجی و تبدیل فوریه جزو روش‌های نوین تلقی می‌گردد که با وجود دقت خوب در تخمین زبری پیچیدگی محاسباتی خاص خود را دارند. در رابطه با تخمین مقادیر زبری، سیر تکاملی وجود دارد که رفته رفته، روش‌های کارا تر و با دقت بالاتر ارایه شده است. در این زمینه روش‌های مرسوم پروفیلومتری به عنوان نخستین روش‌ها ارایه شد که علاوه بر داشتن خطای بسیار زیاد، در تخمین‌های آزمایشگاهی بیشترین کاربرد را دارند. در حال حاضر کاربرد روش‌هایی همچون مقاطع استاندارد بارتن، ISRM و در کل روش‌های مشاهده‌ای و کیفی به دلیل سادگی استفاده از آنها در پروژه‌های معدنی، تونلی و شیروانی‌ها بیشتر است. اما همان‌طور که بیان شد محققین بسیاری سعی بر کمی‌سازی روش‌های مذکور یا ایجاد ارتباط بین برداشت‌های انجام شده از سطح زبر و روش‌های کیفی همچون JRC داشته‌اند که به دلایل مشکلات بنیادی موجود در روش‌های کیفی، این راهکارها نتوانسته‌اند به حد کافی کارساز باشند.

---

<sup>1</sup> El-Soudani

<sup>2</sup> Tse and Cruden

<sup>3</sup> Meyers et al.

<sup>4</sup> Yu and Vayssade

<sup>5</sup> Muralha

<sup>6</sup> Li and Zhang

روش‌های متعددی برای جمع‌آوری داده‌های مناسب از زبری درزه توسعه یافته است. این روش‌ها می‌توانند به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم شوند. در مورد روش‌های مستقیم رنجر و فکر<sup>۱</sup> روش مقطع‌سنجی مکانیکی و روش کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی، میلن<sup>۲</sup> و همکاران روش لبه مستقیم، میرز<sup>۳</sup> روش مقطع‌سنجی سایه‌ای و هاریسون<sup>۴</sup> و رسولی روش صفحه تماسی و پین تماسی را ارائه نموده‌اند (Fecker and Renger, 1971, Milen et al, 1991, Maerz, 1990, Harrison and Rasuli, 2001). در خصوص روش‌های غیرمستقیم، محققین متعددی همچون ویکنز<sup>۵</sup> و بارتن (۱۹۷۱) از روش عکسبرداری، گالانت<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۱) سیستم پردازش تصویر، ایلباس<sup>۷</sup> (۱۹۹۸) روش فیبر نوری، لانارو<sup>۸</sup> (۱۹۹۸) روش روبشی لیزری و گریما<sup>۹</sup> (۱۹۹۴) روش مقطع‌سنجی الکترونیکی را ارائه نمودند (Wickenz and Barton, 1971, Gallant et al, 1991, Ilbas, 1998, Lanaro, 1998, Grima, 1994). این روش‌ها سطح ناپیوستگی را بدون ایجاد خرابی اندازه‌گیری می‌نمایند.

## ۱-۲- اهداف

بیشترین استفاده از خصوصیات شکل هندسی درزه که در واقع نشان دهنده زبری سطح درزه است، هدف اصلی مطالعه حاضر است. در روش‌های مشاهده‌ای و کیفی ارائه شده توسط بارتن، ISRM و لابسچر شکل هندسی درزه خاصی قابل برداشت نبوده و کاربر نمی‌تواند با توجه به شکل هندسی درزه از مقاطع ارائه شده استفاده نماید بلکه حسب شباهت کلی سطح درزه برداشت شده با مقاطع ارائه شده مقایسه مشاهده‌ای صورت گرفته و در مورد عدد مربوط به مقطع قضاوت صورت می‌پذیرد. در سایر روش‌های مشاهده‌ای همچون روش ارائه شده توسط هک و همکارانش سعی شده است با استفاده از اشکال قوسی شکل در قالب پنج منحنی، وضعیت زبری درزه‌سنگ را تا حدی مشخص‌تر نمایند. با این

---

<sup>1</sup> Fecker and Renger

<sup>2</sup> Milen

<sup>3</sup> Maerz

<sup>4</sup> Harrison

<sup>5</sup> Wickens

<sup>6</sup> Gallant

<sup>7</sup> Ilbas

<sup>8</sup> Lanaro

<sup>9</sup> Grima

حال کاربرد دیگر اشکال موجود در سطوح زبر در تعیین میزان زبری درزه‌سنگ مبهم می‌باشد. در روش‌های کمی تعیین زبری نیز پارامترهای آماری تک‌بعدی بوده و نمی‌توانند بیان مناسبی از شکل هندسی درزه را داشته باشند. هر چند در بین پارامترهای کمی آماری، پارامترهایی که تمرکز بر اختلاف ارتفاع بین دو نقطه متوالی را دارند، نمایش بهتری از زبری نسبت به سایر پارامترها دارند. در این مطالعه سعی می‌گردد نقش شکل سطوح زبر دوبعدی درزه‌سنگ با استفاده از مطالعات آماری بیشتر مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق:

اکثر پروژه‌های معدنی، تونلی و شیروانی‌ها در محیط‌های سنگی همواره با چالش تحلیل پایداری و تعیین سیستم‌های نگهداری بهینه مواجه هستند. برای تعیین میزان پایداری و انتخاب سیستم‌های نگهداری مناسب باید عوامل پایه‌ای تاثیرگذار بر مقاومت برشی درزه‌های توده‌سنگ از کمترین عدم قطعیت‌ها و ابهامات برخوردار باشند. پارامتر بنیادی در حل بخش عمده‌ای از مشکلات بیان شده در خصوص برآورد مقاومت برشی توده‌سنگ، برآورد زبری درزه‌های آن است. وجود مشکلات در تعیین این پارامتر منجر به طراحی‌های دست بالا از یک طرف و گاه شکست و ناپایداری در سازه‌های سنگی می‌شود.

میزان زبری درزه به طوری که بیان‌گر و در برگیرنده اکثر خصوصیات هندسی درزه باشد منجر به برآورد صحیح از مقاومت برشی درزه می‌گردد. اکثر روش‌های کیفی با قضاوت فرد و بصورت مشاهده‌ای تعیین می‌شوند و بیشتر روش‌های کمی در نهایت با استفاده از یک پارامتر که بیان‌گر تمامی مشخصات هندسه زبری نیست، به برآورد زبری سطح درزه می‌پردازند. تعریف میزان زبری به نوعی که بتوان هندسه درزه را با در نظر گرفتن اکثر عوامل تاثیرگذار هندسی همچون پارامترهای مربوط به شیب‌ها، ارتفاع، زوایا مد نظر قرار داد، منجر به برآورد صحیح رفتار برشی ناپیوستگی می‌گردد.

با توجه به موارد بیان شده، نیاز به بازتعریف زبری درزه با استفاده از مدل‌های بهتر برگرفته از شرایط واقعی زبری درزه برای امکان برآورد صحیح از مقاومت برشی درزه‌های سنگی احساس می‌شود.

#### ۱-۴- روش انجام کار:

در مطالعه حاضر نمونه‌های درزه‌سنگ مختلف از سنگ‌های متنوع از قبیل سنگ‌های آذرین و رسوبی برداشت شده و برای دستیابی به وضعیت زبری درزه‌سنگ و رسیدن به جامعه آماری مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. روش برداشت نمونه‌های زبر، بر اساس تصویربرداری به روش فتوگرامتری برد کوتاه صورت پذیرفته است. نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰ الی ۳۰ سانتی‌متر در مقیاس کوچک در آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی برداشت شده و نمونه‌های دیگر بصورت برداشت صحرایی در ابعاد ۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته است. از نرم‌افزارهایی همچون GOM و Agisoft برای پردازش تصاویر نمونه‌های سطوح زبر درزه‌سنگ برداشت شده استفاده شده و مقاطع دوبعدی از سطح درزه نمونه‌های برداشت شده استخراج شده است. علاوه بر مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی نسبت به جمع‌آوری مقاطع زبر درزه‌سنگ تهیه شده توسط محققین پیشین اقدام شده است. در این مورد نیز جامعه آماری مناسبی بدست آمده است. مطالعات بر روی اشکال مقاطع زبر انجام پذیرفته و مدل شکل‌های هندسی زبر درزه تعریف شده است. بر اساس مطالعات آماری و با استفاده از تحلیل‌های انجام شده در مورد وضعیت شیب سطح زبر، تعداد دندانه‌ها و وضعیت قرارگیری آن‌ها و همین‌طور به کمک پارامتری کمی تعیین زبری درزه‌سنگ نسبت به اولویت‌بندی اشکال هندسی اقدام شده است. برای اعتبارسنجی مدل‌های هندسی (اشکال هندسی) از داده‌های نمونه‌های سطح زبر دارای مقادیر ضریب زبری درزه متناظر استفاده شده است. بر اساس مطالعه انجام شده با در دسترس داشتن سطح نمونه زبر برداشت شده و انطباق با مدل‌های هندسی تعریف شده و استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق، می‌توان به دقت بهتری از مقدار JRC دست یافت.

در ادامه و با استفاده از مطالعات آماری و احتمالاتی، در قالب یک روش جدید پیشنهادی دیگر انواع حالات وضعیت قرارگیری سطح زبر درزه‌سنگ در یک نمونه ۱۰ سانتی‌متری مورد مطالعه قرار گرفته است. در این حالت، وضعیت سطح زبر درزه‌سنگ در تقسیم‌بندی‌های چهارتایی و شش‌تایی و با تقسیم‌بندی ارتفاع به چهار قسمت به شکل مدل چرتکه‌ای تعریف شده و یک روش طبقه‌بندی جدید

مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های ارایه شده در این روش با استفاده از نمونه‌های سطح زبر حاصل از مطالعات پیشین که دارای مقادیر JRC متناظر بوده‌اند، اعتبارسنجی شده‌اند. در این طبقه‌بندی جدید، صرفاً با داشتن مختصات مقطع درزه و تقسیم‌بندی طول درزه و ارتفاع آن به ترتیب به شش و چهار قسمت، کدهایی از آن استخراج می‌گردد که با استفاده از پارامترهای کلیدی همچون ارتفاع بیشینه، اختلاف ارتفاع بیشینه دو ارتفاع متوالی و تعداد تکرار این پارامتر تعریف شده و با استفاده از این کدها، جایگاه سطح زبر درزه‌سنگ در طبقه‌بندی ارایه شده تعریف شده و مقدار ضریب زبری درزه برای آن مقطع بدست آمده است. در این طبقه‌بندی وضعیت شکل هندسی درزه مد نظر قرار گرفته و امکان ایجاد خطای ناشی از قضاوت در تعیین زبری (آنچه که در روش‌های کیفی - مشاهده‌ای مطالعات پیشین رخ می‌دهد) را برطرف می‌کند.

#### ۱-۵- مراحل انجام کار:

مراحل انجام کار در این رساله به شرح زیر است:

- مطالعه اشکال هندسی موجود در سطوح زبر درزه‌سنگ و بررسی امکان استخراج آنها در قالب ارایه پارامترهای کمی و در نهایت امکان استفاده از آنها در تبیین زبری
- استفاده از روش‌های پردازش تصویر در استخراج مختصات سطوح زبر درزه سنگ برای بکارگیری مختصات مربوطه در تعریف اشکال هندسی
- مطالعات آماری بر روی اشکال هندسی درزه‌سنگ و بیان نقش آنها در تعیین زبری درزه‌سنگ
- ارائه روش‌های جدید تعیین زبری درزه‌سنگ با استفاده از مطالعات آماری اشکال هندسی درزه‌سنگ
- ارائه مدل و طبقه‌بندی جدید تعیین زبری درزه‌سنگ

## ۱-۶- ساختار رساله:

علاوه بر این فصل سایر مطالب رساله در ساختاری به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در فصل دوم، روش‌های تعیین زبری درزه‌سنگ شامل روش‌های کیفی و کمی تعریف می‌شود و به روش‌های برداشت زبری درزه‌سنگ پرداخته می‌شود. در فصل سوم، روش و چگونگی برداشت داده‌های زبری در موقعیت آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین گردآوری داده‌ها از مطالعات پیشین ارایه شده است. استخراج داده‌های سطح زبر درزه به صورت نقاط مختصات‌دار در این فصل توضیح داده می‌شود. در فصل چهارم، مطالعات آماری زبری درزه‌سنگ صورت پذیرفته و اشکال هندسی درزه‌سنگ تعریف شده است. خصوصیات اشکال هندسی با استفاده از داده‌های برداشت شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته و از پارامترهای آماری تعیین زبری نیز برای بررسی اولویت اشکال به لحاظ زبری استفاده شده است. در فصل پنجم روش جدیدی برای برآورد زبری درزه‌سنگ ارایه می‌گردد که در این روش عملکرد اشکال هندسی درزه بررسی شده و به کمک پارامترهای کمی تعیین زبری، تخمین بهتری از سطح زبر درزه‌سنگ ارایه می‌شود. همچنین در این فصل، یک طبقه‌بندی جدید از زبری درزه‌سنگ با استفاده از روش احتمالاتی و آماری ارایه می‌شود. طبقه‌بندی ارایه شده، یک مدل توسعه یافته از ایده اشکال هندسی درزه‌سنگ بوده و به طور عملی نحوه قرارگیری نقاط سطح درزه‌سنگ را مورد طبقه‌بندی قرار می‌دهد. در فصل ششم نتایج تحقیق ارایه شده است و روش‌های ارایه شده مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرند همچنین پیشنهادهایی برای کارهای آتی ارایه شده است.



## فصل دوم:

مروری بر روش‌های برداشت

و تعیین زبری درزه‌سنگ

## ۲-۱- مقدمه

روش‌های برداشت زبری نمونه‌های سنگی و نحوه تعیین مقدار زبری درزه‌سنگ در این فصل تشریح شده است. از آنجایی که در تعیین مقدار زبری درزه به منظور برآورد مقاومت برشی درزه‌سنگ، روش برداشت مختصات مقطع درزه و روابط تعیین زبری تاثیرگذار می‌باشد، بنابراین در این فصل ابتدا مروری بر مطالعات پیشین در مورد روش‌های تعیین کیفی و کمی زبری درزه‌سنگ شده و سپس روش‌های برداشت زبری بررسی شده است.

## ۲-۲- روش‌های تعیین زبری درزه

مقاومت برشی، رفتار تغییر شکل‌پذیری و خصوصیات جریان در درزه‌های سنگی به شرایط زبری سطح درزه وابسته است (Kulatilake and et al., 1995). درجه زبری به صورت اندازه ناهمواری‌ها یا میزان موج‌داری سطح نسبت به صفحه اصلی آن تعریف می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین زبری درزه وجود دارد. روش‌های موجود جمع‌آوری داده‌ها و روش‌های تعیین زبری درزه در جدول ۲-۱-۱ ارائه شده است (Tesfamariam, 2007).

جدول ۲-۱-۱- روش‌های تعیین زبری درزه (Tesfamariam, 2007)

روش‌ها	روش‌های کلی	اطلاعات حاصل از زبری
مقطع سنجی مکانیکی	تماسی	برداشت داده زبری
کمپاس و انحراف سنج دیسکی		
روش لبه مستقیم		
مقطع سنج سایه ای		
عکس‌برداری	غیرتماسی	
سیستم نوری		
سیستم‌های آنالیز تصویری		
اسکن لیزری		
JRC	کیفی	تعیین داده زبری
ISRM		
SSPC		
Laubscher		
آزمایشات مکانیکی	کمی	
روش‌های آماری		
آنالیزهای طیفی		
روش‌های فراکتال		

در ادامه روش‌های تعیین زبری درزه توضیح داده می‌شوند. روش‌های متعددی برای جمع‌آوری داده‌های مناسب از زبری درزه توسعه یافته است. این روش‌ها می‌توانند به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم شوند (Meyers et al. 1990). این روش‌ها بیشتر بیان‌گر افزایش سطح تکنولوژی برداشت داده‌ها است. روش‌های تماسی از روش‌های ساده دستی تا روش‌های مقطع‌سنجی مکانیکی و الکترونیکی را شامل می‌شود. روش‌های غیرتماسی نیز یک سری روش‌های عکاسی، لیزری و نوری را در بر می‌گیرد. روش‌های پیشرفته سرعت اخذ داده‌ها را در حجم‌های بالا افزایش داده است.

## ۲-۲-۱- روش‌های تماسی

روش‌های متعدد تماسی برای به دست آوردن زبری سطح درزه وجود دارند که عبارتند از:

- مقطع‌سنجی مکانیکی (Fecker and Renger, 1971 and ISRM, 1978)
- کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی<sup>۱</sup> (Fecker and Renger, 1971)
- روش لبه مستقیم<sup>۲</sup> (Milen et al., 1991)
- مقطع‌سنجی سایه‌ای<sup>۳</sup> (Maers et al., 1990)
- صفحه تماسی و پین تماسی (Harrison and Rasuli, 2001)

این روش‌ها، بیشتر بر روش‌های مقطع‌سنجی مکانیکی تماسی متمرکز بوده است. دلیل استفاده از این روش‌ها کاربرد سریع، ارزان، سادگی و مناسب بودن استخراج پارامترهای زبری‌های بزرگ مقیاس درزه‌سنگ است (Kersteins, 1999). این روش‌ها کمک می‌کنند تا خطاهای انسانی برداشت خصوصیات زبری درزه‌سنگ به حداقل مقدار خود برسد. روش‌های کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی برای اندازه‌گیری زبری درزه‌سنگ در سه‌بعد قابل استفاده است. مابقی روش‌ها با وجود این که نسبتاً دارای دقت و صحت

---

<sup>1</sup> compass and disc-clinometer

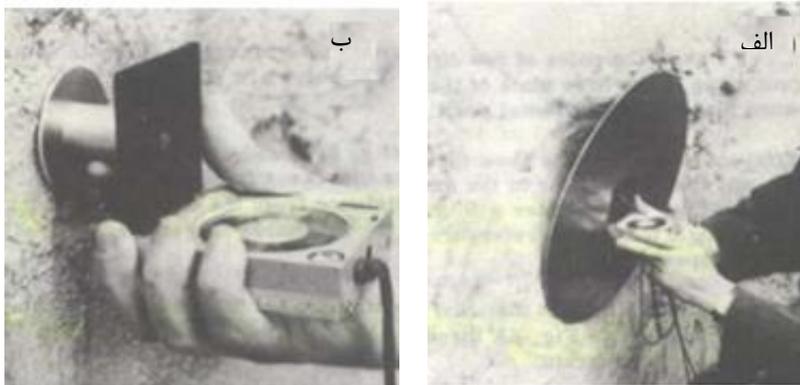
<sup>2</sup> Straight Edge

<sup>3</sup> Shadow Profilometry



## ۲-۱-۲-۲- کمپاس و انحراف سنج دیسکی

اگر جهت پتانسیل لغزش مشخص نباشد، زبری باید به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی صورت پذیرد (Fecker and Renger, 1971 and ISRM, 1978). اندازه‌گیری زاویه زبری در مقیاس‌های متفاوت در سطوح سه‌بعدی توسعه یافته است. صفحات دایره‌ای شکل با قطرهای ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر بر روی سطح درزه قرار می‌گیرند و زبری درزه را اندازه‌گیری می‌نمایند. با تغییرات اندازه صفحات امکان اندازه‌گیری زبری بر سطوح بزرگ‌تر از سطح دواپر وجود دارد. در شکل ۲-۲ بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین صفحات برای اندازه‌گیری زبری نشان داده شده است. برای هر قطر صفحه، اندازه‌گیری‌های شیب و جهت شیب بدست آمده از قطرهای مختلف دیسک بصورت نقاطی بر روی شبکه هم‌سطح پیاده‌سازی می‌شود.



ب- کوچک‌ترین صفحه

الف- بزرگ‌ترین صفحه

شکل ۲-۲- اندازه‌گیری زبری به روش کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی (Fecker and Renger, 1971) زوایای کوچک‌تر زبری با جاگذاری صفحات دایره‌ای بزرگ‌تر حاصل می‌شود (۴۰ سانتی‌متر) و در حداقل ۲۵ نقطه مختلف از سطح ناپیوستگی که حداقل ۱۰ برابر بزرگتر از سطح بزرگترین قطر دایره است اندازه‌گیری می‌شود (ISRM, 1981). این فرایند باید برای قطرهای دیگر نیز تکرار گردد. کوچک‌ترین صفحات بیشترین پراکندگی را در قرائت‌ها و بیشترین زاویه زبری (i) را نتیجه خواهد داد و برعکس. بیشترین زاویه زبری مربوط به اندازه دیسک برای هر جهت لغزش رسم می‌شود. جابجایی قائم (اتساع) که عمود بر سطح ناپیوستگی رخ می‌دهد می‌تواند با ضرب در طول مبنا و تانژانت ماکزیمم زاویه زبری

تخمین زده شود. در صورتی که طول مبنای مختلف مورد تحلیل قرار گیرند منحنی اتساع می‌تواند حاصل گردد. در اینجا فرض می‌گردد که ناهمواری‌های کوچکتر از کمترین قطر دیسک‌ها تاثیری بر فرایند اتساع ندارند (Fecker and Renger, 1971). علاوه بر این، تصاویر بیان کننده کوچکترین، میانگین و بیشینه سطح زبری می‌بایست با خط کش ۱ متری قرار گرفته بر روی سطح درزه برداشت گردد. با این روش سعی شده است زبری‌های بزرگ مقیاس (موج‌داری) محدوده معدنی لوستین<sup>۱</sup> و رچ دبی تایلفر<sup>۲</sup> برداشت گردد.

## ۲-۱-۳- روش لبه مستقیم

این روش یکی از روش‌های مقطع‌سنجی خطی (دوبعدی) است که می‌تواند برای اندازه‌گیری زبری‌های بزرگ مقیاس سطح ناپیوستگی (موج‌داری‌ها) مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت زبری به عنوان بیشینه فاصله از خط مبنایی است که با استفاده از لبه مستقیم (قرار گرفته بر روی سطح قابل دسترس ناهمواری) اندازه‌گیری می‌شود (Palmstrom, 2001). از آنجایی که طول درزه به تنهایی می‌تواند مشاهده و اندازه‌گیری شود ساده‌سازی‌هایی در تعیین میزان موج‌داری (U) می‌تواند انجام شود. روشی که توسط پیتو<sup>۳</sup> (۱۹۷۰) تشریح شده است، استفاده از طول ۱ متری لبه مستقیم مطابق شکل ۲-۳ است. پالمستروم<sup>۴</sup> بیان کرد که امکان بکارگیری این روش حتی برای درزه‌های کوچک‌تر نیز با استفاده از طول‌های کوچک‌تر میسر است. موج‌داری توسط رابطه ۲-۱ قابل برآورد است:

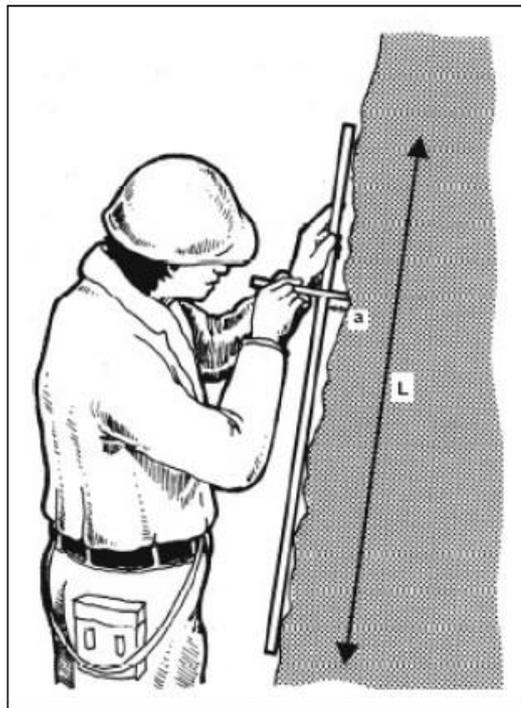
$$U = \frac{a}{L} \quad (1-2)$$

که در آن:

a اندازه بزرگترین فاصله سطح از خط کش و L طول درزه اندازه‌گیری شده (طول خط‌کش) است.

---

1. Lustin  
2. Roch de Tailfer  
3. Pitto  
4. Palmstrom



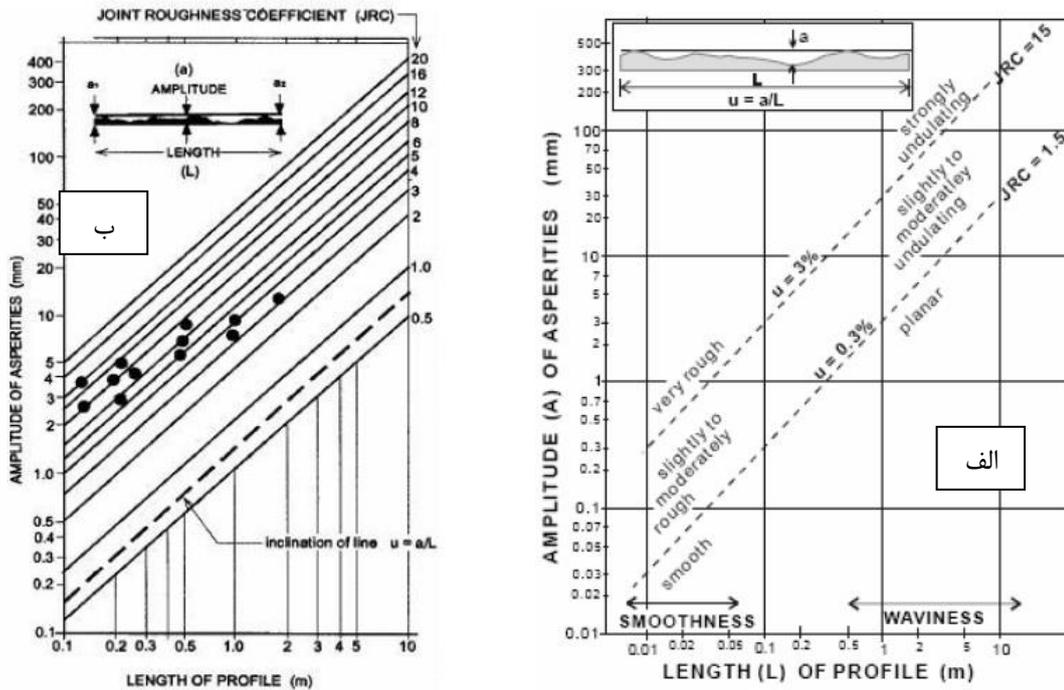
شکل ۲-۳- اندازه‌گیری موج‌داری درزه به روش لبه مستقیم (Palmstrom, 2001)

بعد از کمی تمرین در مورد اندازه‌گیری‌ها همان‌طوری که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است موج‌داری درزه می‌تواند به صورت ساده اندازه‌گیری شود. اکثر اندازه‌گیری‌هایی که در مورد موج‌داری مورد نیاز بوده است به این دلیل که این اندازه‌گیری‌ها زمان‌بر بوده است، اغلب به صورت مشاهده‌ای تعیین شده‌اند. پالمستروم پیشنهاد نمود که میزان صفحه‌ای بودن درزه با عبارت عامل موج‌داری ( $j_w$ ) مشخص شود (جدول ۲-۲). همان‌طور که اشاره شد طول مورد نظر در مطالعه در حدود چندین متر است. مقدار JRC برای مقیاس‌های بزرگ می‌تواند با استفاده از روش لبه مستقیم و به کارگیری شکل ۲-۴، برآورد شود (Barton, 1982).

جدول ۲-۲- میزان عامل موج‌داری بر اساس نوع زبری (Palmstrom, 1995)

نوع زبری	میزان ناهمواری (زبری، $U=a/L$ )	عامل موج‌داری ( $j_w$ )
گیردار و قفل شده	-	۳
پله‌ای	-	۲/۵
با ناهمواری بزرگ	$U > 3\%$	۲
با ناهمواری کوچک	$U = 0.3\% - 3\%$	۱/۵
صفحه‌ای	$U < 0.3\%$	۱

این روش به عنوان روش سریع و قابل کاربرد در مقیاس‌های بزرگ زبری مورد استفاده قرار گرفته است.



الف- موج‌داری و صفحه‌ای بودن درزه با استفاده از مقدار  $U$       ب- برآورد JRC با استفاده از طول‌های مختلف درزه

شکل ۲-۴- برآورد زبری درزه‌سنگ به روش لبه مستقیم (Palmstrom, 1995)

### ۲-۲-۲- روش‌های غیر تماسی

روش‌های متعددی نیز برای برآورد زبری سطح درزه با استفاده از روش‌های غیر تماسی وجود دارد. در ادامه برخی از این روش‌ها توضیح داده می‌شود:

- عکس‌برداری (Wickens and Barton, 1971 and ISRM, 1978)
- سیستم پردازش تصویر<sup>۱</sup> (Gallant et al. 1991)
- روش فیبر نوری و روش لیزر He-Ne (Ilbas et al., 1998)
- روش حسگر اینترفرومتری<sup>۲</sup> (Grasselli and Eager, 2000)

<sup>1</sup> Image Processing

<sup>2</sup> Interferometer

• روش روبشی لیزری<sup>1</sup> (Lanaro et al., 1998, Fardin et al., 2004, Hung et al., 2006)

(and Rahman et al., 2006)

• مقطع سنج الکترونیکی (Grima, 1994, Kerstein, 1999)

روش‌های مقطع‌سنجی نوری با استفاده از اشعه نور زبری سطح ناپیوستگی را بدون ایجاد خرابی در سطح زبری‌ها اندازه‌گیری می‌نماید. این روش شامل اینترفرومتری و مقطع‌سنجی با استفاده از لیزر است.

روش تصویربرداری لیزری یکی از روش‌های غیرتماسی و سنجش از راه دور است که می‌تواند داده‌هایی از تصاویر سه‌بعدی با دقت، صحت و قابلیت تفکیک بالایی را ارائه دهد. با استفاده از این روش می‌توان مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی درزه را با داده‌های قوی‌تر در اختیار داشت. در این سیستم با استفاده از نور با سرعت بالا، فاصله بین فرستنده و سطح مورد پردازش را می‌توان با دقت بالا مورد محاسبه قرار داد. توسعه سریع تکنولوژی سنسور و پشتیبانی نرم‌افزاری آن، استفاده از لیزر را به عنوان روشی مهم و دقیق در جمع‌آوری داده‌های فضایی در مهندسی شناسانده است. مهم‌ترین مزیت روش اسکنر لیزری، دستیابی به نقاط با چگالی و تمرکز بالا با قدرت بیشتر است. بنابراین، شکل سطح مورد نظر می‌تواند با قابلیت تفکیک و دقت بالایی و بصورت سه‌بعدی مدل شود (Slob, 2004). یکی از معایب این روش عدم دسترسی بودن تجهیزات مربوطه و اختصاص آن صرفاً به مراکز تحقیقاتی و صنعتی است.

با توجه به ظهور پیشرفت دوربین‌های رقومی و پیشرفت نرم‌افزارهای پردازش تصویر، تصویربرداری دامنه گسترده‌ای از کاربردهای پزشکی تا مدل‌سازی سازه‌های صنعتی پیدا کرده است. با توجه به قابلیت‌های فتوگرامتری از قبیل هزینه و زمان کمتر مورد نیاز برای مدل‌سازی و همچنین دستیابی به دقت‌های بالا و امکان اخذ خروجی‌های مختلف از قبیل ابر نقاط و توپوگرافی سطحی موردنظر، صاحبان صنعت و مهندسان را بر آن داشته تا این روش را در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی نظیر لیزر اسکنر که

---

<sup>1</sup> Laser scanning method

هزینه بالایی را دارند، ترجیح دهند. در طراحی فضاهای زیرزمینی، شیروانی‌ها و سدها، تخمین زبری سطوح درزه‌سنگ برای تعیین مقاومت برشی سنگ‌های درزه‌دار عامل بسیار مهمی است که دستیابی به روش‌های دقیق، همواره تحلیل‌های بهتری را در اختیار قرار خواهد داد.

### ۲-۳- روش‌های برآورد زبری سطح ناپیوستگی

روش‌های متعددی برای تعیین زبری درزه وجود دارد. توپوگرافی سطح ناپیوستگی با نوع هندسه ناهمواری‌های آن مشخص می‌گردد. در ادامه روش‌های کیفی و کمی تعیین زبری سطح درزه تشریح می‌شوند.

### ۲-۳-۱- روش‌های مشاهده‌ای و کیفی

ساده‌ترین روش تعیین زبری، استفاده از روش‌های بصری است. در این روش‌ها، زبری طبیعی درزه با مقاطع استاندارد و مقادیر زبری مربوطه مقایسه می‌شود و عدد زبری مربوط به مشابه‌ترین مقطع به عنوان عدد زبری تعیین می‌شود. در برداشت‌های اولیه زبری سطح درزه از این روش ساده استفاده می‌شود. با وجود اینکه این روش‌ها بسیار ساده هستند و بر پایه مشاهده فرد و قضاوت وی صورت می‌پذیرند، در حال حاضر نیز در تعیین زبری سطح ناپیوستگی توده‌سنگ استفاده می‌شوند (Li and Zhang, 2015). روش‌های استاندارد معمول عبارتند از:

- روش ضریب زبری درزه (JRC)
- روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)
- منحنی‌های زبری لابسچر
- سیستم طبقه‌بندی احتمالاتی پایداری شیب<sup>۱</sup> (SSPC)

---

<sup>1</sup> Slope stability probability classification

## ۲-۳-۱-۱- روش ضریب زبری درزه (JRC)

بارتن و چوبی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۷ مقاطع استاندارد زبری درزه را پیشنهاد نموده‌اند و یک رابطه تجربی که حاصل از بررسی مقاومت برشی بیش از ۲۰۰ نمونه سطح شکستگی بود را ارائه نموده‌اند. این رابطه از مطالعات انجام شده بر روی مدل‌های مواد مصنوعی ضعیف و با مقاومت فشاری غیر محصور کم، حاصل شده است (رابطه ۲-۲). این روش بسیار ارزان بوده و از صحت نسبی خوبی در برآورد زاویه اصطکاک بیشینه برخوردار است.

$$\frac{\tau_{\text{peak}}}{\sigma_n} = \tan \left[ \text{JRC} * \log_{10} \left( \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (2-2)$$

که در آن،  $\tau_{\text{peak}}$  برابر با مقاومت برشی بیشینه،  $\sigma_n$  تنش نرمال موثر وارد بر سطح درزه، JRC ضریب زبری درزه، JCS مقاومت فشاری سطح درزه و  $\varphi_r$  زاویه اصطکاک باقیمانده است. زبری درزه به صورت مشاهده‌ای با ده مقطع استاندارد مقایسه شده و هر کدام که شرایط نزدیک‌تری را به زبری واقعی داشته باشند به عنوان عدد زبری مربوطه انتخاب می‌شوند. مقادیر JRC از صفر تا ۲۰ از زبری‌های کم شروع شده و به زبرترین درزه ختم می‌شود.

بارتن و باندیس رابطه ۲-۳ را برای تعمیم رابطه‌شان به مقیاس‌های مختلف ارائه کرده‌اند. در این رابطه طول درزه‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر به طول درزه‌های مقاطع استاندارد وابسته می‌گردد. با وجود اینکه به این روش اشکالاتی وارد است، همچنان برای اندازه‌گیری زبری استفاده شده و کاربرد مهندسی دارد (Meyers et al., 1990, Rasuli and Harrison, 2001). به عبارت دیگر با وجود این که تعیین میزان زبری بر اساس مقاطع کار دشواری است و لزوماً منتج به نتیجه مطلوب نمی‌شود ارتباط این پارامتر به مقیاس‌های دیگر گاهی عدم قطعیت‌ها را افزایش می‌دهد. رابطه ۲-۳ ارتباط ضریب زبری درزه در اندازه‌های ۱۰ سانتی‌متری را به مقیاس‌های بزرگتر ارائه کرده است.

---

<sup>1</sup> Chouby

$$JRC_n \approx JRC_0 \left[ L_n / L_0 \right]^{-0.02 JRC_0} \quad (3-2)$$

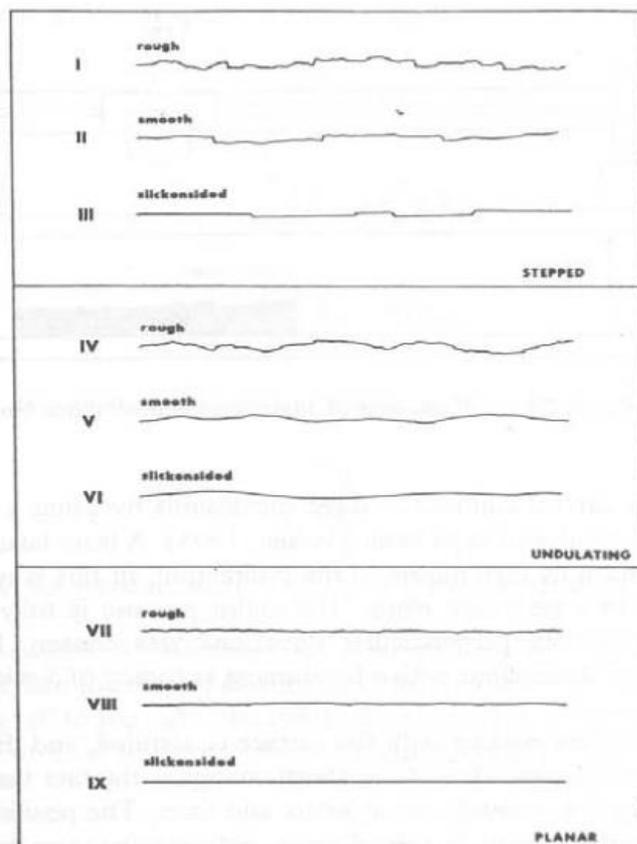
زیرنویس‌های 0 و n به ترتیب به مقیاس‌های آزمایشگاهی و صحرایی مربوط می‌شود. روش JRC در عمل بسیار ساده و سریع بوده اما اغلب تعیین زبری بصورت مشاهده‌ای و وابسته به قضاوت فرد می‌باشد و با عدم قطعیت‌هایی همراه است.

### ۲-۳-۱-۲- روش‌های پیشنهادی ISRM

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در سال ۱۹۷۸، مقاطع استاندارد را برای تعیین زبری سطح درزه توسعه داده است. تعاریف ارائه شده زبری به عبارات توصیفی بر اساس دو مقیاس مشاهده‌ای محدود شده است.

- مقیاس متوسط برای ابعاد چند متری است. در صورتی که دو سطح در تماس کامل بوده و نسبت به هم گیرداری داشته باشند، حین جابجایی برشی با توجه به ابعاد بزرگشان بریده نمی‌شوند و اتساع در آنها اتفاق می‌افتد.
- مقیاس کوچک برای ابعاد چندین سانتی‌متر تعریف می‌شود که طی جابجایی برشی بریده می‌شوند مگر این که سطح زبر ناپیوستگی دارای مقاومت بالایی باشد و یا این که میزان تنش وارده به سطح درزه کم باشد. بنابراین، اتساع نیز در این حالت (زبری‌های کوچک مقیاس) امکان‌پذیر است.

زبری‌های متوسط در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از پله‌ای، موج‌دار و صفحه‌ای. هر کدام از این انواع در مقیاس کوچکتر به سه نوع زبر (ناهموار)، نرم و صیقلی تقسیم می‌گردند. عبارت سطح صیقلی صرفاً زمانی استفاده می‌شود که شواهدی مبنی بر وضعیت تحت برش سطح درزه مشاهده شود. مقاطع تعریف شده توسط ISRM در نه رده در شکل ۲-۵ و جدول ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- مقاطع زبری و تعریف مربوطه ارائه شده توسط ISRM (۱۹۷۸)، طول هر مقطع در بازه ۱ تا ۱۰ متر

جدول ۲-۳- طبقه‌بندی زبری ISRM

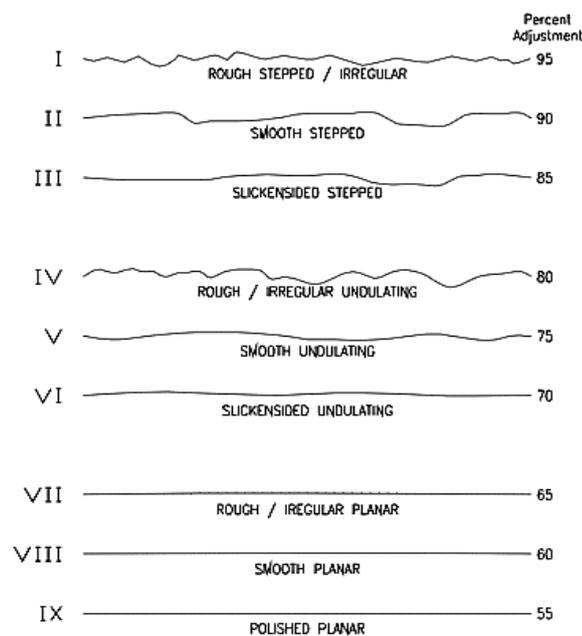
مقیاس متوسط	مقیاس کوچک	طبقه
پله‌ای	زبر (یا نامنظم)	۱
	صاف	۲
	صیقلی	۳
موجداری	زبر (یا نامنظم)	۴
	صاف	۵
	صیقلی	۶
صفحه‌ای	زبر (یا نامنظم)	۷
	صاف	۸
	صیقلی	۹

در طبقه‌بندی ارایه شده در جدول ۲-۳، زاویه زبری درزه در نه رده که از ۱ تا ۹ میزان زبری کاهش می‌یابد مشخص می‌شود. جهت ناهمواری‌های سطح در این طبقه‌بندی به صورت جهتی که دارای کمترین مقاومت در مقابل لغزش است تعریف می‌شود.

### ۲-۳-۱-۳- منحنی‌های زبری لابسچر

لابسچر (۱۹۹۰)، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ در طراحی معدن، یک سری عبارات توصیفی برای تعیین زبری سطح ناپیوستگی را توسط عامل‌هایی که پایداری فضای زیرزمینی را دست‌بندی می‌نماید ارایه نموده است. بخشی از تعاریف ارایه شده توسط لابسچر بر اساس مقاطع پیشنهادی ISRM (۱۹۷۸ و ۱۹۸۱) است (شکل ۲-۶). در این حالت زبری به دو بخش زیر تقسیم می‌گردد (Laubscher, 1990):

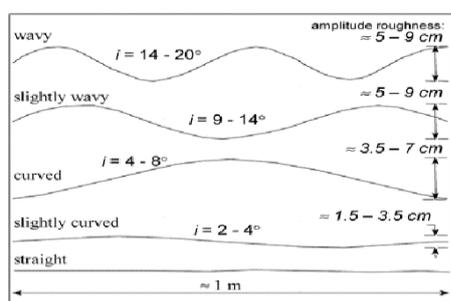
- زبری‌هایی که در مقیاس‌های مختلف مشاهده می‌شود
- زبری‌هایی که قابل مشاهده نیستند اما قابل لمس توسط انگشت هستند (معروف به زبری لمسی).



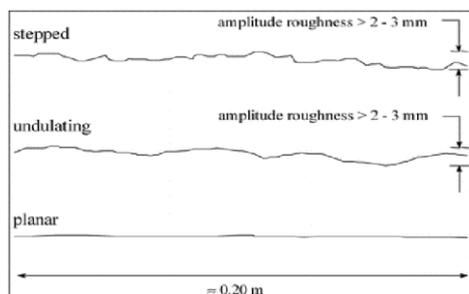
شکل ۲-۶- مقاطع زبری لابسچر (Laubscher, 1990)

## ۲-۳-۱-۴- روش استفاده شده در سیستم SSPC

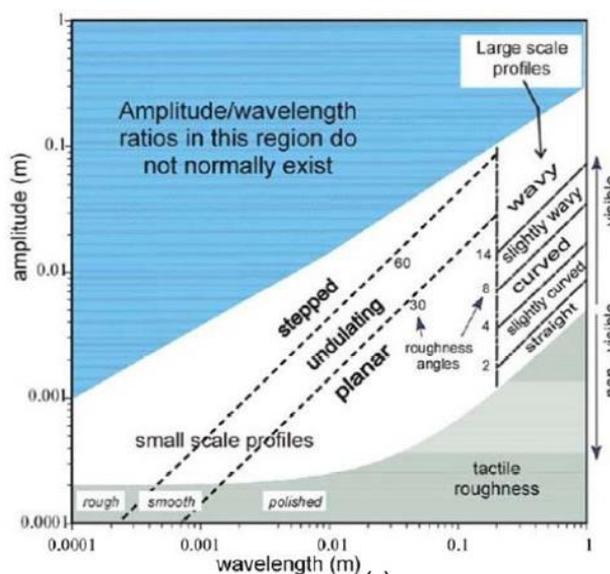
هک و همکارانش در سال ۱۹۹۸ یک رابطه تجربی بین زبری مشاهده‌ای و لمسی و بر اساس مقاطع معروف ارایه شده توسط ISRM (۱۹۸۱) و لابسچر (۱۹۹۰)، برای طبقه‌بندی احتمالاتی پایداری شیب توسعه دادند. هک زبری را به دو دسته زبری کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس طبقه‌بندی نمود. زبری بزرگ مقیاس در نمونه‌های سطحی با مساحت بزرگتر از ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر و کوچکتر از ۱ در ۱ متر تعیین می‌شود و به پنج رده موج‌دار، نیمه موج‌دار، انحناء بالا، انحناء کم و سطح صاف طبقه‌بندی می‌گردد (شکل ۲-۷). زبری لمسی توسط لمس انگشت متمایز می‌شود و به سه دسته زبر، صاف و صیقلی تقسیم می‌گردد. زبری کوچک مقیاس قابل مشاهده نیز در سه دسته پله‌ای، موج‌دار و صفحه‌ای تعریف می‌شود (Hack et al. 1998). واژه‌های توصیفی و مقادیر مربوطه‌شان که برای برآورد زبری سطح استفاده می‌شود در جدول ۲-۴ نشان داده شده است.



الف- مقاطع زبری بزرگ مقیاس



ب- مقاطع زبری کوچک مقیاس



ج- وضعیت قرار گیری مقاطع با دامنه و طول موج مختلف

شکل ۲-۷- تعریف زبری به عنوان تابعی از مقیاس و زاویه در سیستم SSPC (Hack et al. 1998)

مزیت استفاده از روش SSPC این است که مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها و وجود کارست در ناپیوستگی‌ها نیز طبق جدول ۲-۴ مشخص می‌شود. این جدول همچنین نشان می‌دهد که چگونه مشخصات ناپیوستگی به چهار عامل وابسته می‌گردد. این چهار عامل عبارتند از: زبری بزرگ مقیاس (RI) و کوچک مقیاس (Rs)، مواد پرکننده (Im) و کارست (Ka).

وضعیت ناپیوستگی (TC) با استفاده از ضرب این چهار عامل از رابطه (۲-۴) حاصل می‌شود.

$$TC=RI*Rs*Im*Ka \quad (۲-۴)$$

با توجه به میزان وضعیت ناپیوستگی، معیار لغزشی برای برآورد مقاومت برشی سطح ناپیوستگی بر روی شیب‌هایی به طول ۲ تا ۲۵ متر توسعه یافته است (Hack, 1998). از این معیار لغزش، زاویه لغزش با استفاده از رابطه ۲-۵ بدست می‌آید. زاویه لغزش در واقع بیشترین زاویه‌ای است که بلوک سنگی قرار گرفته در یک شیب می‌تواند پایدار بماند.

$$\phi_{\text{sliding-angle}} = (RI * Rs * Im * Ka)/0.0113 \quad (۲-۵)$$

که تمامی پارامترهای مورد استفاده در آن، پیش از این تعریف شده‌اند.

با وجود این که برآورد زبری به این روش وابسته به تشخیص فرد بوده و با ابهاماتی همراه است، در این روش سعی شده است محدودیت‌های مشاهده‌ای دیگر روش‌های تعیین زبری تا حدی کاهش یابد.

جدول ۲-۴- تعاریف و مقادیر زبری سطح درزه (Hack et al. 1998)

مقدار	زبری		ردیف
۱/۰۰	موج‌دار	بزرگ مقیاس (RI)	۱
۰/۹۵	نیمه موج‌دار		
۰/۸۵	انحناء‌دار		
۰/۸۰	انحناء کم		
۰/۸۰	راست		
۰/۹۵	زبر پله‌دار	کوچک مقیاس (Rs)	۲
۰/۹۰	نرم پله‌دار		
۰/۸۵	صیقلی پله‌دار		
۰/۸۰	زبر موج‌دار		
۰/۷۵	نرم موج‌دار		
۰/۷۰	صیقلی موج‌دار		
۰/۶۵	زبر صفحه‌ای		
۰/۶۰	نرم صفحه‌ای		
۰/۵۵	صیقلی صفحه‌ای		
۱/۰۷	پر کننده سیمانی	مواد پر کننده (Im)	۳
۱/۰۰	بدون پر کننده		
۰/۹۵ درشت	مواد پر کننده برشی و بدون مواد لغزنده مثل تالک و غیره		
۰/۹۰ متوسط			
۰/۸۵ ریز			
۰/۷۵ درشت	مواد برشی لغزنده مثل رس و تالک و غیره		
۰/۶۵ متوسط			
۰/۵۵ ریز			
۰/۴۲	مواد پر کننده > ناهمواری های درزه		
۰/۱۷	مواد پر کننده < ناهمواری های درزه		
۰/۰۵	مواد جریانی		
۱/۰۰	بدون کارست	کارست (Ka)	۴
۰/۹۲	حاوی کارست		

## ۲-۳-۲- روش‌های کمی برآورد زبری

کمی‌سازی زبری سطح درزه با اندازه‌گیری پارامترهایی چون ارتفاع و عمق توپوگرافی سطح درزه و با در نظر گرفتن توزیع فضایی آن میسر است. برخی از روش‌های کمی تعیین زبری سطح درزه توسط ISRM تشریح شده است. برخی از این روش‌ها عبارتند از:

- روش شیب‌سنج<sup>۱</sup>
- روش‌های آماری
- روش‌های طیفی<sup>۲</sup>
- روش فراکتال<sup>۳</sup>

## ۲-۳-۲-۱- آزمایش‌های مکانیکی (شیب‌سنج)

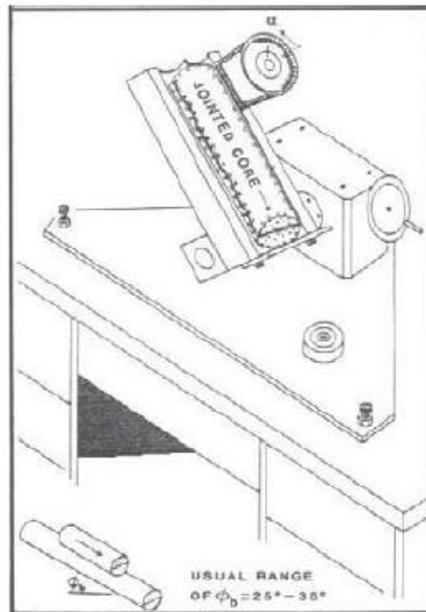
بارتن و چوبی<sup>۴</sup> (۱۹۷۷) یک روش علمی تعیین زبری سطح با استفاده از شیب‌سنج را پیشنهاد نمودند. این ابزار با ایجاد شیب تدریجی در دو قطعه قرار گرفته بر روی هم در نهایت منجر به ایجاد لغزش در قطعه بالایی می‌شود (شکل ۲-۸). این آزمایش تحت بار نرمال ثابت انجام می‌شود و با تحلیل معکوس میزان JRC را نتیجه می‌دهد. نحوه برآورد ضریب زبری درزه در این روش در رابطه ۲-۶ ارائه شده است.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log \left[ \frac{JCS}{\sigma_n} \right]} \quad (۲-۶)$$

که در آن،  $\alpha$  زاویه شیبی است که از آزمایش بدست آمده است.  $\phi_r$  زاویه اصطکاک باقیمانده، JCS مقاومت فشاری سطح درزه و  $\sigma_n$  تنش فشاری اعمالی بر سطح درزه است.

---

1. Tilt meter  
2. Spectral method  
3. Fractal method  
4 Chouby



شکل ۲-۸- آزمایش سطح شیب‌دار برای اندازه‌گیری JRC

در این روش باید مقادیر مقاومت فشاری دیواره درزه و زاویه اصطکاک باقیمانده نیز ارزیابی شوند. مقاومت فشاری دیواره درزه با استفاده از آزمایش چکش اشمیت حاصل می‌شود. در صورت عدم کاربرد صحیح چکش اشمیت ممکن است خطاهایی طی آزمایش در سطوح درزه هوازده به وقوع بپیوندد. مقدار زاویه اصطکاک باقیمانده از رابطه ۲-۷ به دست می‌آید.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (2-7)$$

که در آن:

$\phi_b$ ، زاویه اصطکاک پایه سنگ

$R$ ، مقاومت بدست آمده از چکش اشمیت بر روی سطح خشک و

$r$ ، مقاومت بدست آمده از چکش اشمیت بر روی سطح مرطوب است.

### ۲-۳-۲- روش‌های آماری

محققینی که از روش‌های آماری برای تعیین زبری درزه استفاده نموده‌اند بر این باور هستند که مقاطع زبری سطح درزه غالباً به صورت موجی شکل بوده و می‌توان آنها را با استفاده از روش‌های مشابه آنچه برای سیگنال‌های الکتریکی استفاده می‌شود، تحلیل نمود. بر این اساس محققین متعددی سعی داشته‌اند

تا با اندازه‌گیری‌های ساده دامنه و طول موج و شیب سطح درزه به مقاطع دو بعدی و سه بعدی آن دست یابند. به طور کلی پارامترهای آماری زبری می‌تواند به صورت زیر دسته‌بندی شوند (Meyers et al., 1990). برخی از این روش‌ها در ادامه تشریح می‌شوند.

- روش‌های شامل پارامترهای بزرگی دامنه
- روش‌های شامل پارامترهای شیب
- روش‌های تصادفی
- روش‌های شامل پارامترهای طیف توان
- ابعاد فراکتال
- سایر روش‌ها

#### الف- روش‌های شامل پارامترهای بزرگی دامنه

میزان زبری کامل درزه (K) شامل خط مرکزی میانگین (CLA)، ریشه میانگین مربعات (RMS) و مقدار مربع میانگین (MSV) می‌شود. این عبارات هم به صورت پیوسته و هم به صورت نقاط مجزا می‌توانند تعریف شوند. میزان زبری کامل بیان‌گر اختلاف بین نقاط بیشینه ارتفاع و کم عمق‌ترین نقاط ناهمواری سطح درزه می‌باشد و به صورت رابطه (۸-۲) تعریف می‌شود:

$$K = \max[z(x, y)] - \min[z(x, y)] \quad (8-2)$$

که در آن، K بیان‌گر پارامتر میزان زبری کامل و Z ارتفاع نقاط است.

خط مرکزی میانگین (CLA) بیان‌گر انحراف ارتفاع ناهمواری‌ها از سطح یا خط رگرسیونی مبنای مقطع است. خط مرکزی میانگین به صورت رابطه (۹-۲) تعریف می‌شود.

$$CLA = \frac{1}{A} \int |z| dA \quad (9-2)$$

که در آن:

پارامتر  $A$  بیانگر سطح صفحه رگرسیون و  $Z$  مقادیر ارتفاع تعیین شده نسبت به صفحه مبنا است. ریشه میانگین مربعات (RMS)، بیانگر ریشه مربع میانگین ریاضی ارتفاع ناهمواری‌ها است و به صورت رابطه (۱۰-۲) تعریف می‌شود.

$$RMS = \left[ \frac{1}{A} \int z^2 dA \right]^{0.5} \quad (10-2)$$

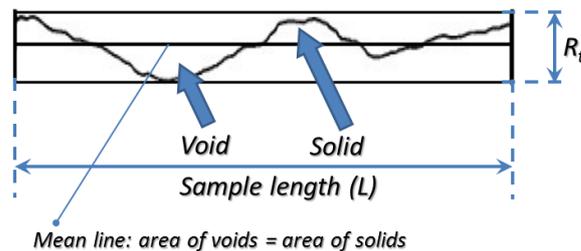
که پارامترهای استفاده شده در آن پیش از این تعریف شده‌اند.

مقدار مربع میانگین (MSV) به صورت رابطه (۱۱-۲) تعریف می‌شود (Bendat and Pierson, 1985).

$$MSV = \frac{1}{A} \int z^2 dA \quad (11-2)$$

که پارامترهای استفاده شده در آن پیش از این تعریف شده‌اند. دو نوع اندازه‌گیری دیگر نیز کمی پیچیده‌تر از آنچه گفته شد وجود دارد که یکی عدم تقارن (اندازه‌گیری میزان تقارن خط مقطع نسبت به خط مرکزی) و دیگری درجه اوج (اندازه‌گیری تمرکز توزیع ارتفاع‌ها نسبت به خط مرکزی) است (Silvester, 1996, Muralha, 1995). خط مرکزی میانگین از میانگین‌گیری ارتفاع نقاط سطح درزه بدست می‌آید.

سیچس<sup>۱</sup> (۱۹۷۸) دو روش برای تعیین زبری سطح بیان کرد. در روش اول، از یک جفت پارامتر در یک مقطع عرضی از سطح استفاده می‌کند تا زبری به دست آید (شکل ۹-۲).



شکل ۹-۲- تعیین زبری سطح (Sicho, 1978)

<sup>1</sup> Sicho

پارامتر ارتفاع که برای سنجش سطح بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد Ra یا مقدار میانگین خط مرکزی است و برابر با میانگین انحراف پروفیل از خط مبنای اصلی است. پارامتر دیگر ارتفاع، حداکثر فاصله قله ناهمواری تا پایین‌ترین نقطه، Rt در طول نمونه است.

روش دوم استفاده از مقطع‌سنج<sup>۱</sup> است که با استفاده از سیگنال‌های الکتریکی، توپوگرافی سطح را بدست آورده و آن را تحلیل آماری می‌کند. در نهایت پروفیل سطح با توابع زیر تعریف می‌شود:

- توزیع احتمال ارتفاع‌ها که می‌توان با روش گاوس<sup>۲</sup> بدست آورد.

- تابع همبستگی<sup>۳</sup> مقطع در رابطه (۲-۱۲) عبارت است از:

$$Z(\Delta) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y(x)y(x + \Delta)dx \quad (۲-۱۲)$$

که در آن:

$Y(x)$ : ارتفاع مقطع در یک مکان معین  $x$

$Y(x+\Delta)$ : ارتفاع در مکان مجاور

### ب- روش‌های شامل پارامترهای شیب

این بخش شامل شاخص‌هایی همچون مشتق اول ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها ( $Z_2$ )، مشتق دوم ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها ( $Z_3$ )، یک اندازه‌گیری مستقیم از زبری ( $Z_2$ ) و شاخص‌های دیگر همچون اندیس زبری مقطع ( $R_p$ ) و زاویه  $i$  میانگین است (Meyers et al., 1990). این مباحث ابتدا در صنعت متالورژی توسعه یافت و در حال حاضر در مطالعات زبری ناپیوستگی‌ها هم بکار گرفته می‌شود (Kerestein, 1999).

1- Profilometer

2- Gaussian manner

3- auto-correlation function

مشتق اول ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها ( $Z_2$ ) یک پارامتر منفرد برای تعیین خصوصیات سطح طبق رابطه (۲-۱۳) است. این پارامتر بدون واحد، وابسته به مقیاس و بسیار مناسب برای زبری‌های دست‌نخورده است. این پارامتر به صورت گسترده در محاسبات زبری درزه مورد استفاده قرار گرفته است (Tse, Cruden, 1979, Maerz et al. 1995, Tatone, Grasselli 2010, Jang et al. 2014).

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{A} \int \left( \frac{dz}{d\varepsilon} \right)^2 dA \right]^{0.5} \quad (۲-۱۳)$$

که پارامترهای استفاده شده در آن پیش از این تعریف شده‌اند. مشتق دوم ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها ( $Z_3$ ) در یک جهت پیش‌بینی شده، میزان انحناء ناهمواری‌ها را بیان می‌کند و به صورت رابطه (۲-۱۴) تعریف می‌شود.

$$Z_3 = \left[ \frac{1}{A} \int \left( \frac{d^2z}{d\varepsilon^2} \right)^2 dA \right]^{0.5} \quad (۲-۱۴)$$

که پارامترهای استفاده شده در آن پیش از این تعریف شده‌اند. پارامتر ( $Z_4$ )، بصورت نسبت مساحت سطح با شیب‌های مثبت منهای سطوح با شیب منفی در جهت از قبل تعریف شده به مساحت واقعی کل سطح است و به صورت رابطه (۲-۱۵) تعریف می‌شود.

$$Z_4 = \frac{\sum A_{i,positive} - \sum A_{i,negative}}{A_t} \quad (۲-۱۵)$$

که در آن  $A_{i,positive}$  مساحت سطوح با شیب مثبت و  $A_{i,negative}$  مساحت سطوح با شیب مثبت است. نسبت بین مساحت سطح واقعی به سطح تصویر شده با عبارت RA یعنی شاخص سطح زبری طبق رابطه ۲-۱۶ تعریف می‌شود. در صورتی که مقطع ناپیوستگی به صورت دو بعدی در دسترس باشد، شاخص  $R_L$  یعنی شاخص مقطع زبری به عنوان نسبت بین طول واقعی مقطع به طول تصویر شده آن تعریف می‌شود (Elsudani, 1978). این پارامتر در رابطه (۲-۱۶) ارایه شده است.

$$R_A = \frac{A_t}{A} \quad (16-2)$$

که در آن  $A_t$  مساحت سطح واقعی و  $A$  مساحت سطح تصویر شده است.

### ۲-۳-۲ روش‌های تصادفی

در روش‌های تصادفی، به طور کلی از توابع چگالی احتمال به عنوان ورودی‌های مدل‌های تحلیلی استفاده می‌شود. در این حالت فرض بر این است که مقطع بدست آمده تصادفی است. بنابراین، زبری اندازه‌گیری شده برای محدوده خاصی از کل سطح معتبر است (Riwes, 1985). توابعی که در ادامه توضیح داده می‌شود دارای پارامترهایی هستند که ارتفاع ناهمواری‌ها به طور مساوی در آن‌ها توزیع شده است. تابع همبستگی<sup>۱</sup> (ACF) بیان‌گر وابستگی بزرگی یک نقطه به نقطه دیگر با فاصله ثابتی از یکدیگر است. تابع ساختاری<sup>۲</sup> (SF) نیز مقدار میانگین ریاضی سیستم‌های مستقل انتخاب شده را تعیین می‌کند (Syles and Thomas, 1977). تابع ساختاری دارای این مزیت نسبت به تابع همبستگی است که مستقل از صفحه میانگین بوده و فقط برای یک بخش از مقطع می‌تواند محاسبه گردد. پارامتر SF در رابطه ۲-۱۷ ارایه شده است.

$$SF = \frac{1}{L} \sum (y_{i+1} - y_i)^2 \Delta x \quad (17-2)$$

که در آن  $L$  طول درزه و  $y$  ارتفاع نقاط درزه است.

علاوه بر این، ایوانو و انیشتن<sup>۳</sup> (۱۹۹۳) زبری را بطور تصادفی به عنوان رویکرد تصادفی همگن و با توجه به این روش که نسبتاً ساده و صحیح به نظر می‌رسد تعیین نمودند. اگر چه، هنگامی که مدل‌های ناهمگن از چنین فرایندی استفاده می‌کنند مشکلات قابل توجهی ایجاد می‌گردد.

<sup>1</sup> Auto correlation

<sup>2</sup> Structural Function

<sup>3</sup> Iwano and Einstein

## ۲-۳-۲-۴ روش‌های طیف توان

زبری سطح ناپیوستگی می‌تواند توسط توابع چگالی طیفی وقتی که یک مقطع تلفیقی از موج‌های سینوسی با طول موج‌ها، دامنه و زوایای مختلفی باشد، تعریف شود. موج‌ها می‌توانند با تبدیل‌های فوریه داده‌های مقطع، با تبدیل‌های فوریه تابع همبستگی محاسبه شده یا با فیلترینگ، به توان دو رساندن و میانگین‌گیری سیگنال‌ها مشخص گردند (Meyers, 1962). این روش هم‌زبری و هم‌همبستگی فضایی توپوگرافی سطح ناپیوستگی را تشریح می‌نماید (Piggot and Elsworth, 1993).

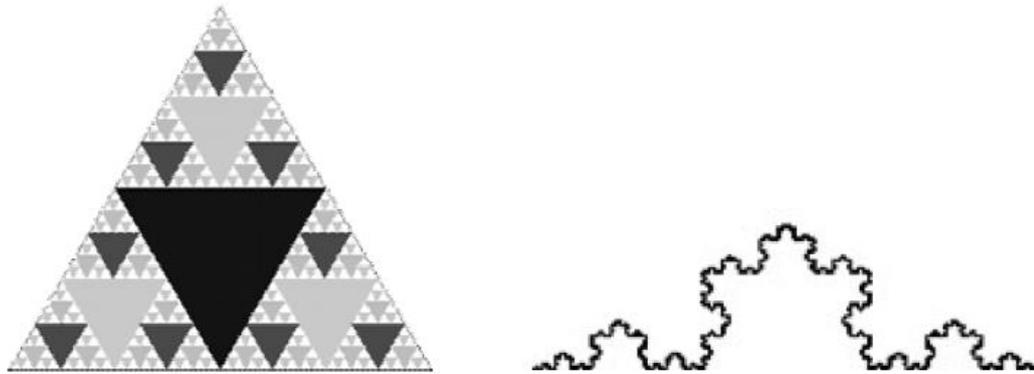
توان هارمونی‌ها می‌تواند برای تشخیص سری موج‌های حاکم محاسبه شده و بصورت طیف توان رسم گردد. تعداد هارمونی‌هایی که محاسبه می‌گردد لازم است به حد کافی بسیار بزرگ باشد تا طیف توان قابل اعتمادی حاصل گردد. بدلیل تاثیر زیاد خطاها بر روی فرایند محاسبه، نمونه‌برداری بایستی با دقت بالایی صورت پذیرد. علاوه بر این، اگر تعداد محاسبات کافی نباشد، خطاهای بسیار بزرگی ممکن است ایجاد گردد (Silvester, 1996).

## ۲-۳-۲-۵ روش فراکتال

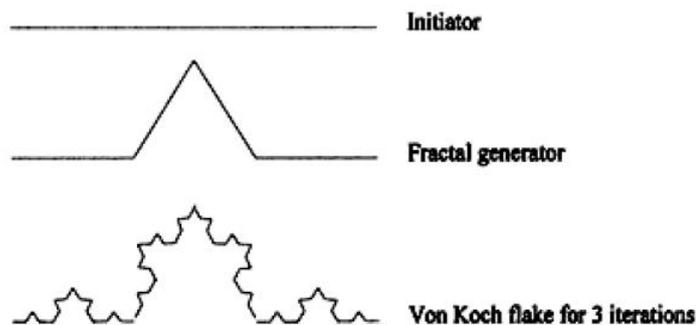
مفهوم روش بعد فراکتال برای اندازه‌گیری طول‌های نامنظم مواردی همچون خطوط ساحلی است (Mandelbort, 1983). این روش شاخه جدیدی از ریاضیات در مقایسه با هندسه اقلیدسی، جبر و محاسبات است. شکل‌های هندسی منظم و نرم مثل مربع و دایره و ... می‌توانند توسط هندسه اقلیدسی تعریف گردند. اما، اشیاء طبیعی نامنظم و زبر همچون کوه‌ها، خط‌های ساحلی، درخت‌ها و غیره نمی‌توانند توسط هندسه اقلیدسی تعریف گردند. این موارد توسط هندسه فراکتال تشریح می‌شوند.

محققان بسیاری در سال‌های اخیر به قابلیت استفاده از این هندسه در رابطه با سطوح سنگ و درزه‌های موجود در سنگ پرداخته‌اند. بر اساس این مطالعات سطوح زبر درزه‌های سنگ به عنوان یکی از بارزترین سطوح بی‌نظم شناخته شده است که رفتار فراکتالی را از خود نشان می‌دهد. لذا این تئوری به آسانی می‌تواند توصیف‌های کمی را در رابطه با سطوح زبر و نامنظم درزه‌ها ارائه نماید. از دیدگاه مندلبرت

چنانچه اشکال هندسی خواص خود تشابهی<sup>۱</sup>، تشکیل از راه تکرار<sup>۲</sup> و بعد فراکتالی ثابت داشته باشند می توان آنها را فراکتال نامید. مهم ترین خاصیت اشکال فراکتال خود تشابهی آنها است. این خصوصیت بدان معناست که قسمت های مختلف یک شکل با یکدیگر مشابه باشند (شکل ۲-۱۰). این خاصیت سبب می شود که تغییر مقیاس های اندازه گیری تاثیری بر روی شکل منحنی نداشته باشد. به عبارت دیگر با تغییر بزرگی مقیاس شکل منحنی دچار تغییر نمی شود و بعد فراکتالی در تمام مقیاس ها ثابت می ماند. اجسام فراکتال جز پایه ای دارند که از تکرار این جزء کل جسم حاصل می شود (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۰- نمایش خود تشابهی سطوح فراکتال (Kulatilake et al., 1998)



شکل ۲-۱۱- خصوصیت تشکیل از راه تکرار (Kulatilake et al., 1998)

در هندسه اقلیدسی یک خط، الگویی تک بعدی، یک صفحه الگویی دو بعدی و یک کره الگویی سه بعدی را به خود اختصاص می دهند. این ابعاد همچنین می توانند توپولوژی های مختلفی را داشته باشند. از دیدگاه فراکتال هر یک از اجسام را می توان با یک ضریب مستقل از مقیاس بیان کرد. این بعد اصطلاحاً

1. Self similarity  
2. Self Affine

بعد فراکتال یا بعد توپولوژی (D) نامیده می‌شود. بعد فراکتالی یک خط هموار با بعد اقلیدسی آن یکسان و برابر با یک است. به صورت عمومی بعد فراکتال اجسام تک بعدی مثل سطح درزه بین ۱ و ۲، اجسام دو بعدی بین ۲ و ۳ و اجسام سه بعدی بین ۳ و ۴ قرار دارد.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری پارامترهای فراکتال زبری توده‌سنگ پیشنهاد شده است. این روش‌ها در عین سادگی پیچیدگی‌ها و دشواری‌های مربوط به خود را دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان روش تقسیم‌کننده (Mandelbort, 1983)، شمارش مربعی (Feder, 1988)، روش واریوگرام (Orey, 1970)، روش طیفی (Berry and Lewis, 1980)، روش طول زبری (Malinevro, 1990) و روش مقیاس خطی (Matsushita and Ouchi, 1989) را نام برد.

زبری سطح درزه با استفاده از روش طول زبری برای برآورد بعد فراکتال مقاطع دو بعدی (Malinevro, 1990 and Kulatilake, 1999) و برای سطح‌های سه بعدی با اسکن کردن سطح درزه صورت می‌پذیرد (Fardin et al., 2004). برای سطح ناپیوستگی سه‌بعدی تشکیل شده از راه تکرار، رابطه‌توانی به صورت روابط ۱۸-۲ و ۱۹-۲ بین انحراف استاندارد ارتفاع‌های سطح باقیمانده  $S(w)$  و اندازه پنجره نمونه‌برداری  $w$  وجود دارد.

$$S(w) = Aw^H \quad (18-2)$$

$$\log(S(w)) = \log_e A + H \log_e w \quad (19-2)$$

که در آن:

$S(w)$ ، باقیمانده ارتفاع ناهمواری‌ها از صفحه میانگین است

$w$ ، فاصله‌داری یا طول پنجره مقطع می‌باشد

$H$ ، ثابت هارست است و به صورت  $H=E-D$  (E بعد اقلیدسی)

$A$ ، ثابت تناسب که به عنوان دامنه یا بزرگی مقطع تعریف می‌شود.

مقاطع زبری مختلف ممکن است منجر به بعد فراکتال ثابتی شوند. به عنوان مثال، در حالتی که مقدار  $D$  ثابت باشد اما  $A$  متفاوت باشد، مقدار زبری مقطع ثابت نخواهد بود. این بدان معناست که برآورد زبری سطح صرفاً با استفاده از بعد فراکتال امکان‌پذیر نیست.

برای مقاطع دو بعدی مقدار  $S(w)$  می‌تواند با استفاده از ریشه میانگین مربعات ارتفاع مقاطع زبری با ابعاد پنجره  $w$  و مطابق رابطه ۲-۲۰ محاسبه می‌گردد:

$$S(w) = RMS(w) = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \sqrt{\frac{1}{m_i - 2} \sum (z_j - \bar{z})^2} \quad (2-20)$$

که در آن  $n_w$  تعداد کل پنجره‌های برداشت به ازاء طول  $w$  و  $M_i$  تعداد نقاط در پنجره  $w_i$  است.

کولاتیلاک (۱۹۹۹) در روش طول زبری پیش‌نیازهای زیر را برای کمی‌سازی صحیح زبری درزه پیشنهاد نموده است (Kulatilake, 1999):

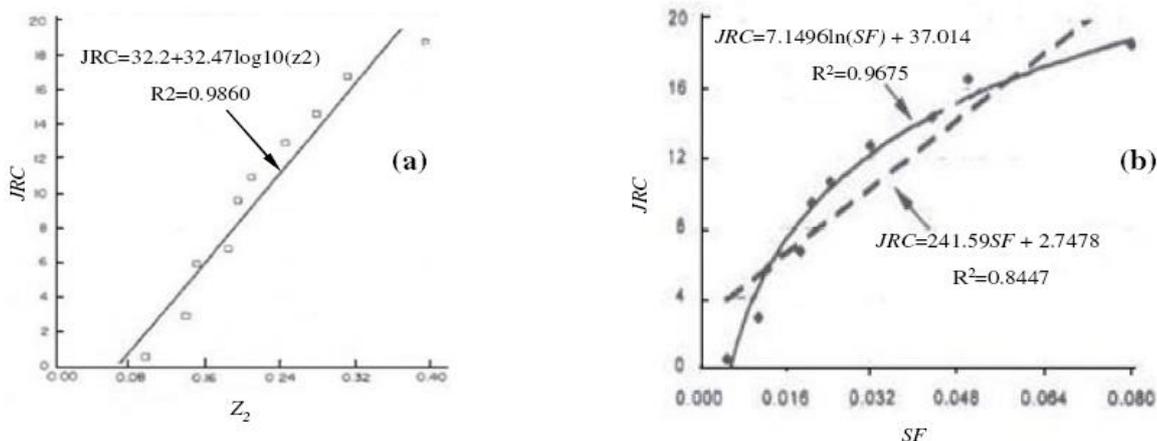
- چگالی داده‌ها (تعداد داده نقاط در طول واحد) بین  $5/1$  و  $51/23$
- بعد فراکتالی بین  $1/2$  و  $1/7$
- اندازه پنجره بین  $2$  و  $10$  درصد در کل طول نمونه
- حداقل  $7$  پنجره بین کمترین و بیشترین بازه اندازه‌ی پنجره‌ها لازم است انتخاب گردد

## ۲-۳-۲-۶- سایر روش‌ها

تحلیل‌های زمین آماری زبری، که بر اساس مفاهیم متغیرهای محلی است پارامترها را بین یک متغیر تصادفی و متغیر واقعی مشخص می‌نماید. این متغیر بصورت تئوری پیوسته بوده اما در عمل بدلیل نمونه‌برداری مجزا می‌باشد. طبق نظر میلر و همکارانش و رکوا<sup>۱</sup> واریانس و سمی‌واریوگرام می‌تواند برای تعیین زبری سطح درزه در جهت مشخصی استفاده شود (Miler, 1995, Roco, 1997).

<sup>1</sup> . Roco

برخی محققین رابطه بین پارامترهای مختلف آماری و مقادیر JRC را مورد تحقیق قرار داده‌اند. به عنوان مثال تسه و کرودن پیشنهاد داده‌اند که مقادیر  $Z_2$  و SF شدیداً وابسته به ده مقطع زبری استاندارد است. شکل ۲-۱۲ رابطه خطی بین JRC و SF ارائه شده توسط تسه و کرودن و رابطه لگاریتمی همان متغیرها که توسط رسولی و هاریسون ارائه شده است را نشان می‌دهد (Rasuli and Harison, 2001). روابط ارائه شده در بازه محدودی از  $Z_2$  منجر به ضریب زبری درزه قرار گرفته در بازه استاندارد می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تعریف رابطه بین پارامترهای آماری و پارامترهای تجربی همچون JRC بسیار سخت است.



شکل ۲-۱۲- رابطه خطی بین JRC و SF (ارایه شده توسط تسه و کرودن) و رابطه لگاریتمی همان متغیرها ارائه شده توسط رسولی و هاریسون (Rasuli and Harison, 2001)

مایرز<sup>۱</sup> به یک رابطه بین JRC و شاخص مقطع زبری  $R_p$  دست یافت (Maerz, 1990). کولاتیلاک و همکارانش (۱۹۹۵) پارامترهای آماری اشاره شده در بالا را برای انتخاب بهترین پارامترهای تعیین زبری سطح درزه با استفاده از داده‌های عددی مقاطع بارتن و چوبی مورد ارزیابی قرار دادند. علاوه بر پارامترهای آماری آنها به این موضوع دست یافتند که پارامترهایی که بیانگر شیب مقطع هستند ( $Z_2$ ، زاویه  $i$  و  $R_p$ ) و تابع ساختاری (SF) رابطه قوی با مقدار JRC دارند. در بین این پارامترها  $Z_2$  که بدون واحد و مستقل از مقیاس است به عنوان بهترین پارامتر معرفی شده است.

<sup>۱</sup> Maerz

قابل توجه است که تنها یک پارامتر آماری برای کمی‌سازی زبری سطح درزه کافی نیست. اگر سطح درزه در وضعیت زبری‌های مقیاس بزرگ (موج‌داری) باشد مقاومت برشی سطح درزه در جهت بالا متفاوت از مقدار آن در جهت پایین می‌باشد. این در حالیست که مقدار  $Z_2$  با توجه به رابطه تعریف شده برای آن در دو جهت برابر هم می‌باشد بنابراین،  $Z_2$  به تنهایی برای برآورد میزان زبری کفایت نمی‌کند (Kulatilake, 1995). لی<sup>۱</sup> بیان می‌کند که به دلیل وابستگی مقاومت برشی سنگ به سایر عوامل تاثیرگذار از جمله پارامترهای موجود در معیار بارتن تنها توسط تحلیل‌های ساده نمی‌توان رابطه مشخصی بین بعد فراکتال و مقاومت برشی مستقل از ضریب زبری درزه بیان نمود. یکی از مسائل حایز اهمیت در استفاده از روش‌های فراکتال اطمینان از اصل خودتشابهی و تشکیل از راه تکرار سطوح درزه‌سنگ است که گاهی این اصل در روش فراکتال در نمونه‌های درزه‌سنگ اثبات نمی‌گردد. بنابراین تعیین روابط دقیق‌تر را وابسته به مطالعات بیشتر دانست (Li and Zhang, 2015).

## ۲-۴- جمع‌بندی

روش‌های متعددی برای برداشت یا جمع‌آوری داده‌های زبری سطح درزه‌سنگ وجود دارد. این روش‌ها بیشتر بیان‌گر افزایش سطح تکنولوژی برداشت داده‌ها از روش‌های ساده دستی تا روش‌های مقطع‌سنجی مکانیکی و الکترونیکی را شامل می‌شود که به آنها روش‌های تماسی گفته می‌شود و یک‌سری روش‌های عکاسی را در بر می‌گیرد که به عنوان روش‌های غیرتماسی نامیده می‌شوند (Maerz et al. 1990). روش‌های پیشرفته سرعت اخذ داده‌ها را در حجم‌های بالا افزایش داده است. روش‌های برداشت تماسی عبارتند از روش مقطع‌سنجی مکانیکی (Fecker and Renger, 1971 and ISRM, 1978)، کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی (Fecker and Renger, 1971)، روش لبه مستقیم (Milen et al., 1991)، مقطع‌سنجی سایه‌ای (Meyers et al., 1990) و صفحه‌تماسی و پین‌تماسی (Harrison and Rasuli, 2001). این روش‌ها، بیشتر بر روش‌های مقطع‌سنجی مکانیکی متمرکز بوده است. دلیل استفاده از این

---

<sup>1</sup> Lee

روش‌ها کاربرد سریع، ارزان، سادگی و مناسب بودن استخراج پارامترهای زبری‌های بزرگ مقیاس درزه‌سنگ است (Kersteins, 1999). این روش‌ها کمک می‌کنند تا خطاهای انسانی برداشت خصوصیات زبری درزه‌سنگ کمتر شود. روش‌های کمپاس و انحراف‌سنج دیسکی برای اندازه‌گیری زبری درزه‌سنگ در سه‌بعد قابل استفاده است. مابقی روش‌ها علی‌رغم این که نسبتاً دقیق هستند، بیشتر در مقیاس‌های کوچک‌تر اندازه‌گیری زبری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش‌های متعددی نیز برای تعیین زبری سطح درزه با استفاده از روش‌های غیرتماسی وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از روش عکس‌برداری، سیستم پردازش تصویر، روش فیبر نوری و روش لیزر He-Ne، روش حسگر اینترفرومتری، روش روبشی لیزری و مقطع‌سنج الکترونیکی. از بین این روش‌ها، دو روش مقطع‌سنجی نوری و روبش لیزری کاربرد بیشتری دارد.

روش‌های مقطع‌سنجی نوری با استفاده از اشعه نور زبری سطح ناپیوستگی را بدون ایجاد خرابی در سطح زبری‌ها اندازه‌گیری می‌نماید. این روش شامل اینترفرومتری و مقطع‌سنجی با استفاده از لیزر است.

روش تصویربرداری لیزری یکی از روش‌های غیرتماسی و سنجش از راه دور می‌باشد و روشی است که داده‌هایی از تصاویر سه‌بعدی را با دقت، صحت و قابلیت تفکیک بالایی ارائه می‌دهد. با استفاده از این روش می‌توان مقاطع دو بعدی و سه‌بعدی درزه را با داده‌های قوی‌تر در اختیار داشت. در این سیستم با استفاده از نور با سرعت بالا، فاصله بین فرستنده و سطح مورد پردازش را می‌توان با دقت بالا مورد محاسبه قرار داد. هزینه بالا، زمان‌بر بودن و همچنین سرعت میدانی پایین و به خصوص پیچیدگی‌های محاسباتی و کاهش دقت در بعضی پروژه‌ها، از محدودیت‌های روش‌های بیان شده می‌باشد. توسعه سریع تکنولوژی سنسور و پشتیبانی نرم‌افزاری آن، استفاده از لیزر را به عنوان روشی مهم و دقیق در جمع‌آوری داده‌های فضایی در مهندسی شناسانده است. مزیت روش روبش لیزری، دستیابی به نقاط با چگالی و تمرکز بالا و با قدرت تفکیک بالا است. بنابراین، شکل سطح مورد نظر می‌تواند با قابلیت تفکیک و دقت بالایی و بصورت سه‌بعدی مدل شود (Slob, 2004). ایراد این روش عدم در دسترس بودن این ابزار است

که غالباً در آزمایشگاه‌ها یا مراکز تحقیقاتی وجود دارد و دستیابی به آن بصورت محدود، در فضای آزمایشگاه و با صرف هزینه برای انجام برداشت‌هاست.

از بین روش‌های عنوان شده، روش‌های مشاهده‌ای به خصوص روش بارتن بیشترین کاربرد در پروژه‌های عمرانی را دارد. این روش با وجود برخی مشکلات در تعیین مقدار زبری درزه‌سنگ، ساده بوده و کاربر می‌تواند به سهولت و به طور سریع به مقدار عددی زبری به منظور برآورد مقاومت برشی درزه‌سنگ دست یابد. همچنین با توجه به مطالعات محققین پیشین پارامترهای کمی تعیین زبری نیز به دلیل ارایه روابط بین آن‌ها و مقدار ضریب زبری درزه به وفور استفاده می‌شوند. از بین پارامترهای کمی،  $Z_2$ ،  $SF$ ،  $R_p$ ،  $R_q$  کاربرد بیشتری داشته و در مراجع بیشتر به آنها رجوع شده است. از بین این پارامترهای کمی  $Z_2$  و  $SF$  دارای دقت بیشتری در تخمین ضریب زبری درزه‌سنگ هستند. علت کاربرد بیشتر این دو پارامتر، لحاظ اختلاف ارتفاع دو نقطه مجاور هم در طول سطح درزه در رابطه ارایه شده برای آن‌ها است که به ضریب همبستگی بیشتری با ضریب زبری درزه می‌انجامد. روش‌های مشاهده‌ای به دلیل نوع قضاوت شخص در انتخاب ضریب زبری، دارای ضعف‌هایی است که لازم است تحقیقات بیش‌تر در این خصوص به منظور کاهش اثرات ناشی از قضاوت شخصی صورت پذیرد. در روش‌های کمی تعیین زبری درزه‌سنگ نیز برخی ضعف‌های ساختاری در روابط این پارامترها مشاهده می‌شود که به طور بهینه نمی‌توانند سطح زبر درزه‌سنگ را تعریف نمایند و نماینده خوبی برای سطح درزه باشند.

# فصل سوم: گردآوری و اندازه‌گیری داده‌ها

### ۳-۱- مقدمه

فرآیند آشکارسازی مختصات نقاط سطوح درزه‌سنگ به عنوان اولین قسمت در برآورد زبری درزه‌سنگ، موضوع حساس و گاه زمان‌بر و پرهزینه در زمینه مطالعات میدانی مکانیک‌سنگ است. هدف از ارایه این فصل دستیابی به داده‌های مختصاتی سطوح زبر درزه‌سنگ به منظور مطالعه آماری و ارزیابی شکل سطوح درزه‌سنگ است. برای دستیابی به داده‌های مورد نیاز تحقیق، لازم است شکل‌های هندسی درزه‌سنگ مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای زبری مربوط به هندسه درزه‌سنگ گردآوری شده و مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو گردآوری داده‌ها در دو فرایند زیر صورت می‌پذیرد:

- مطالعات و برداشت میدانی سطوح زبر درزه‌سنگ به منظور مطالعات آماری شکل هندسه درزه
- گردآوری سطوح مختصاتی هندسه درزه‌سنگ حاوی مشخصات زبری از منابع مختلف (تحقیقات

پیشین)

در این فصل روش و الگوریتم به کارگیری فتوگرامتری برد کوتاه برای به دست آوردن مدل دوبعدی و سه‌بعدی از درزه‌سنگ به عنوان روش برداشت مناسب، سریع و دقیق با هزینه پایین و در دسترس کارشناسان این حوزه ارایه می‌شود.

### ۳-۲- فتوگرامتری برد کوتاه<sup>۱</sup>

فتوگرامتری برد کوتاه شاخه‌ای از علم فتوگرامتری است که با استفاده از تحلیل تصاویر اخذ شده از فاصله نزدیک و بدون تماس با آن، به برداشت، اندازه‌گیری و مدل‌سازی از شیء مورد نظر می‌پردازد. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در تولید دوربین‌های دیجیتال و خارج شدن دوربین‌های آنالوگ، فتوگرامتری برد کوتاه نیز پیشرفت‌های چشم‌گیری بخصوص در سال‌های اخیر داشته است. این روش به دلیل دارا بودن سرعت زیاد، دقت بالا و همچنین هزینه کم، امروزه کاربردهای وسیعی در حوزه نقشه‌برداری و رشته‌هایی نظیر عمران، پزشکی و کاربردهای صنعتی که نیازمند برداشت سه‌بعدی از شیء می‌باشد،

---

<sup>1</sup> Close Range Photogrammetry

پیدا کرده است. پروژه‌های موفق اجرا شده در این زمینه گویای پتانسیل بالای این روش در این حوزه است.

در حوزه پزشکی با استفاده از فتوگرامتری پزشکی به طراحی و پیاده‌سازی سیستمی هوشمند برای هدایت و کنترل اعمال جراحی ترمیمی بر روی صورت انسان پرداخته‌اند (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۴).

در حوزه کاربرد صنعتی نیز به مدل‌سازی بدنه اتومبیل با روش فتوگرامتری صنعتی پرداخته‌اند. در این تحقیق به دلیل عدم در اختیار داشتن فایل طراحی بدنه پیکان، بر روی یک قطعه از بدنه پیکان (گلگیر پیکان) بررسی انجام گرفته است (باباپور و همکاران، ۱۳۸۶). در حوزه مهندسی عمران نیز با به کارگیری روش فتوگرامتری برد کوتاه به تحلیل میزان جابجایی سد مارون در جنوب کشور پرداخته‌اند (Shirkhani, 2007). در تونل‌سازی نیز برداشت سه‌بعدی تونل به منظور ارزیابی روش اجرای تونل و برآورد جابجایی‌های صورت گرفته در تونل از روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده شده است (Wei et al, 2015). همچنین در برداشت وضعیت قوس دایره‌ای سپر دستگاه TBM و مقایسه آن با شرایط قبل مونتاژ نیز در پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز از روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده شده است (اجاقی، ۱۳۹۵). در حوزه مکانیک‌سنگ نیز، برداشت سطوح زبر درزه‌سنگ به منظور بررسی اثر مقیاس با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه انجام شده است (Grasselli et al, 2013).

امروزه با وجود نرم‌افزارهای قدرتمند، علاوه بر افزایش سرعت کار، محصولات نهایی، متنوع و با کیفیتی نظیر ابر نقاط سه‌بعدی رنگی، مدل سه‌بعدی یکپارچه با بافت واقعی و تصویر قایم از تمامی نماهای مورد نیاز به دست می‌آیند. همچنین کم‌هزینه‌تر و آسان‌تر شدن پیاده‌سازی سیستم‌های فتوگرامتری با دقت بالا، امکان بکارگیری بیش از پیش روش‌های فتوگرامتری به عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی توجیه یافته است (Shirkhani, 2007).

با در نظر گرفتن اینکه فتوگرامتری برد کوتاه مزیت‌های بسیاری همچون قابلیت اندازه‌گیری بی‌درنگ و در زمان کم، سهولت و آزادی عمل در تصویربرداری در شرایط محیطی دشوار در مقایسه با لیزر اسکنرها

و همچنین قابلیت دستیابی به دقت‌های بالا و ایجاد آرشویی از مشاهدات جهت پردازش‌های آتی را دارا می‌باشد، اندازه‌گیری مختصات سطح زبر درزه‌سنگ برای استخراج مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از این روش می‌تواند به عنوان روش فراگیر مطرح شود. در ادامه ساختار سیستم فتوگرامتری برد کوتاه تشریح می‌گردد و پیاده‌سازی‌های انجام‌گرفته بر روی درزه‌سنگ زبر بیان می‌شود و در آخر نتایج بدست آمده ارزیابی می‌گردند. در مجموع ۹۱ نمونه درزه‌سنگ از سنگ‌های مختلف برداشت شده است. مزیت استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه، امکان تصویربرداری از درزه‌سنگ‌ها به صورت درجا در محل پروژه‌های تونلی، مغارها، سدها، ترانشه‌ها و شیروانی‌ها و بدون الزام بر انتقال نمونه‌های درزه‌سنگ به محل آزمایشگاه می‌باشد. از دیگر مزایای این روش در قیاس با روش‌های بیان شده می‌توان به عدم تماس مستقیم با جسم، زمان کم عملیات زمینی و امکان برداشت تمامی سطح عارضه مورد نظر حتی در مکان‌های پرخطر اشاره کرد.

### ۳-۲-۱- مبانی ایجاد مدل سه‌بعدی با فتوگرامتری برد کوتاه

مراحل کلی پیاده‌سازی یک پروژه فتوگرامتری در شکل ۳-۱، نشان داده شده است. اولین قدم در پروژه های فتوگرامتری برد کوتاه، مرحله آماده‌سازی است. به طور کلی آماده‌سازی شیء و فضای شیء مورد نظر جهت تصویربرداری، تعیین دوربین مورد استفاده و تنظیم پارامترهای تصویربرداری و همچنین طراحی نشانه‌ها<sup>۱</sup> می‌تواند به صورت کددار یا معمولی باشد، در مرحله آماده‌سازی قرار می‌گیرد. سپس نشانه‌های خاص طراحی شده بر روی نمونه سطح زبر درزه‌سنگ نصب می‌گردد. هدف از نصب این نشانه‌ها توجیه ابعاد و اندازه‌ها روی درزه‌سنگ است. برای مقیاس‌گذاری مدل، مختصات نقاط کنترل و فاصله نشانه‌ها از همدیگر مشخص می‌گردد تا پس از تصویربرداری و تهیه مدل سه‌بعدی از آنها به عنوان پارامتر مقیاس استفاده شود. در نهایت مدل سه‌بعدی به‌دست‌آمده مورد تحلیل قرار گرفته و نمایش داده می‌شود. شکل ۳-۱، روند اجرایی یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه را نشان می‌دهد (رفیعی و کاظمی، ۱۳۹۳).

---

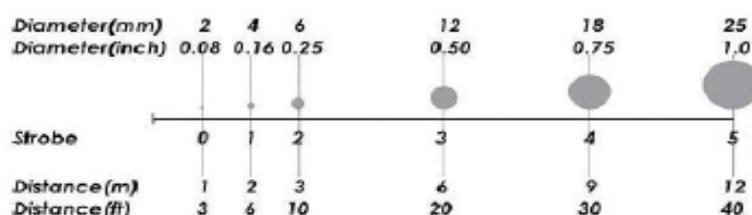
<sup>1</sup> Targets

### مراحل کلی انجام یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه



شکل ۱-۳- روند اجرایی یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه (رفیعی و کاظمی، ۱۳۹۳)

طراحی نشانه‌ها عامل مهمی در کاهش خطای نشانه‌روی در اندازه‌گیری مختصات تصویر می‌باشد. یک مسئله بسیار مهم در طراحی نشانه‌ها که باید در نظر گرفته شود، ابعاد نشانه‌های استفاده شده در فتوگرامتری برد کوتاه می‌باشد که بر اساس یک رابطه تجربی این ابعاد متناسب با فاصله دوربین تا عارضه (سطح) موردنظر متغیر می‌باشند. شکل ۲-۳، ابعاد نشانه‌های لازم در فتوگرامتری برد کوتاه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- ابعاد نشانه‌های استفاده شده در فتوگرامتری برد کوتاه متناسب با فاصله از شی موردنظر (رفیعی و کاظمی، ۱۳۹۳)

به علت نیاز به دقت بالا در فتوگرامتری برد کوتاه، توجه بیشتری به پیکربندی ایستگاهی دوربین یا هندسه شبکه نیاز است تا حصول به دقت‌هایی بیش از ۰/۱ میلی‌متر امکان‌پذیر گردد. مباحثی نظیر انتخاب مشخصات دوربین تصویربرداری و تعداد ایستگاه‌های دوربین و تکرار تصویر و هندسه شبکه موضوعات اساسی در این زمینه تحت عنوان طراحی شبکه می‌باشد. هدف از طراحی شبکه‌های فتوگرامتری برد کوتاه، اغنای معیارهایی نظیر دقت، قابلیت اطمینان و هزینه می‌باشد. رابطه کلی انتشار خطا به عنوان مبنایی برای طراحی شبکه‌های فتوگرامتری برد کوتاه در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۳-۱).

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot S \cdot \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{f} \cdot \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot d \cdot \sigma_a \quad (1-3)$$

که در آن  $\sigma_c$  متوسط انحراف معیار خطای مختصات نقاط شی،  $q$  فاکتور طراحی یا ضریب استحکام هندسی شبکه،  $k$  تعداد متوسط تصاویر اخذ شده در هر ایستگاه دوربین،  $S$  عدد مقیاس،  $\sigma$  خطای متوسط مختصات نقاط عکسی،  $\sigma_a$  دقت زاویه‌ای (قدرت تفکیک زاویه‌ای) اندازه‌گیری نقاط عکسی برابر  $(\sigma/f)$  است. بنابراین دقت اندازه‌گیری وابسته به سه پارامتر قدرت تفکیک زاویه‌ای دوربین، استحکام شبکه و مقیاس می‌باشد (رفیعی و کاظمی، ۱۳۹۳).

### ۳-۲-۲- مراحل پیاده‌سازی و روندنمای فتوگرامتری برد کوتاه درزه‌سنگ

با توجه به موارد بیان شده هدف تعیین مدل سه‌بعدی و دوبعدی سطوح درزه‌سنگ با روش فتوگرامتری برد کوتاه است تا ضمن هزینه پایین بتوان در مدت زمان کمتری به مختصات سطح زبر با دقت بالا دست یافت. شکل ۳-۳، روندنمای اجرای پروژه فتوگرامتری برد کوتاه برای دستیابی به سطح دوبعدی و سه‌بعدی درزه‌سنگ را نشان می‌دهد.



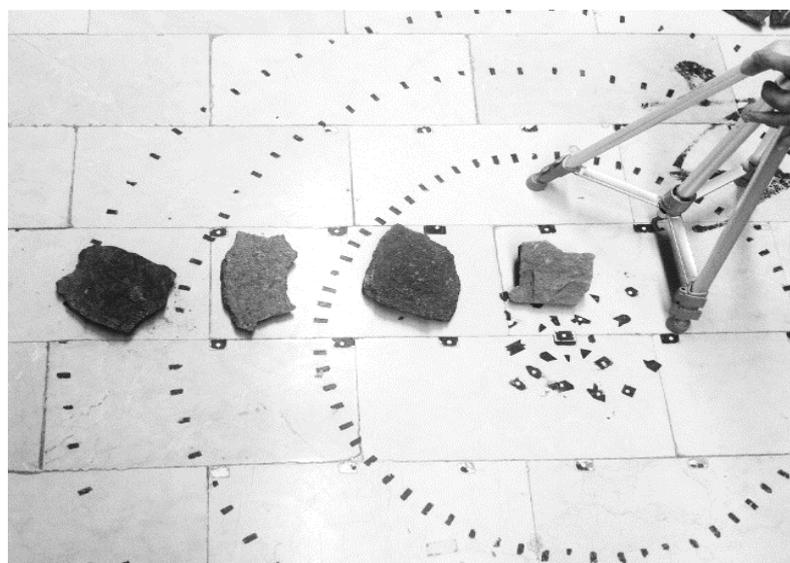
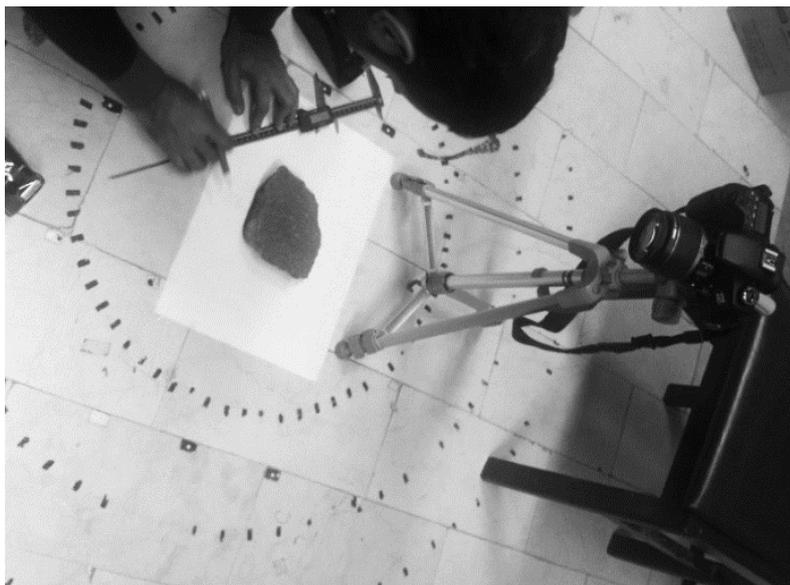
شکل ۳-۳- روندنمای استخراج مقاطع سطح زبر درزه سنگ در روش فتوگرامتری برد کوتاه

### ۳-۲-۳- آماده سازی سطح درزه سنگ، نشانه گذاری، دوربین و مقیاس گذاری

در این مطالعه برای بررسی و برداشت زبری سطوح درزه سنگ از نمونه های درزه سنگ مختلف شامل سنگ های آذرین همچون گرانیت، دیوریت و آندزیت و از انواع مختلف متعلق به مناطق مختلف و سنگ های رسوبی همچون ماسه سنگ و سیلت استون استفاده شده است. برداشت نمونه ها در ابعاد ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر و ابعاد ۱۵ تا ۶۰ سانتی متر صورت گرفته است. نمونه های کوچک تر برداشت شده به

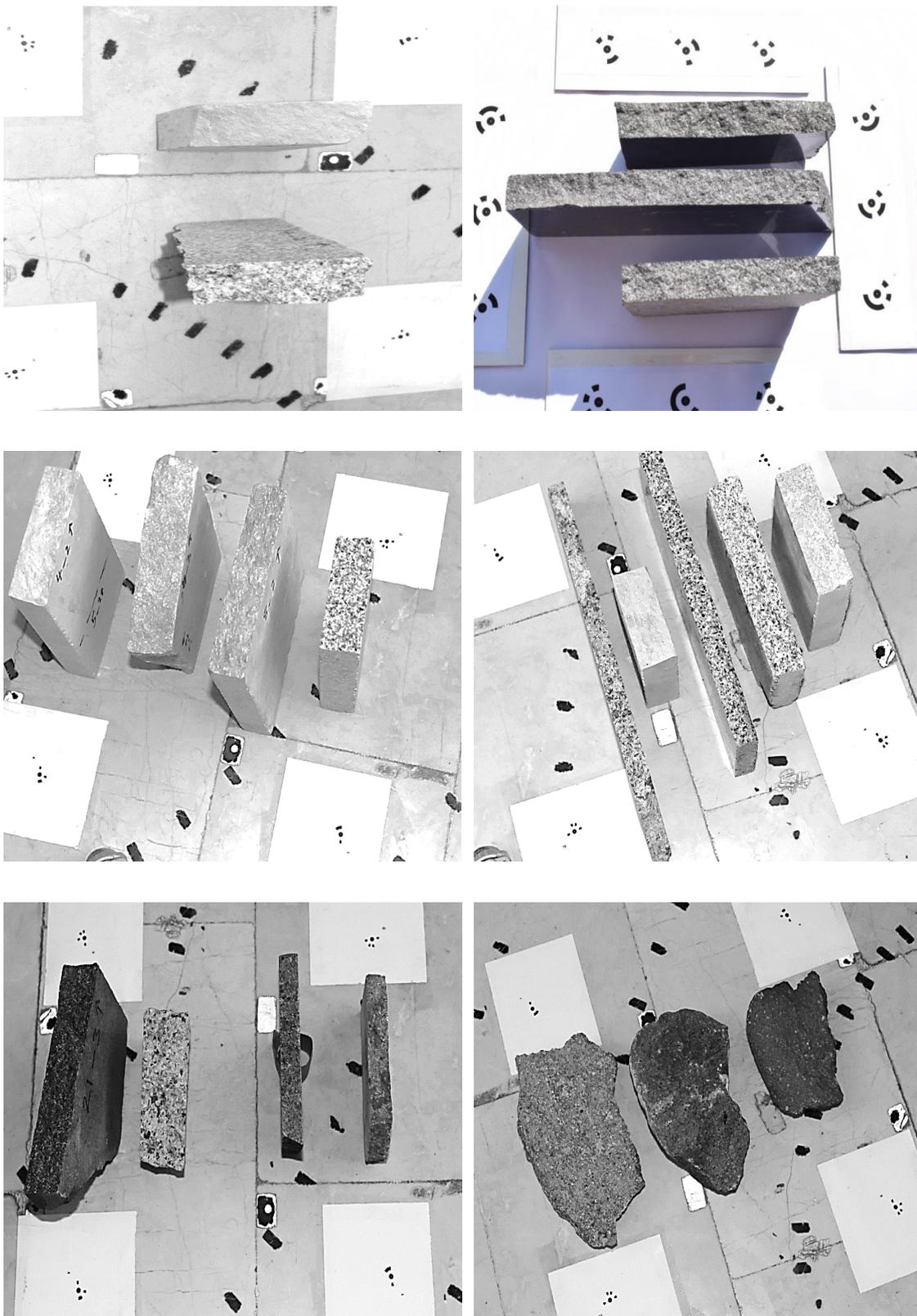
آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی منتقل شده و در محیط آزمایشگاه که تحت شرایط نوری مناسبی بوده برداشت‌های لازم انجام شده است. برای تصویربرداری مناسب، باید محیط مناسبی را انتخاب کرد و شرایط نوری آن را تنظیم نمود. محیط مورد نظر باید به حد کافی فضا برای ایجاد یکی شبکه مناسب تصویربرداری داشته باشد. محیط آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه به نحوی به لحاظ شرایط نور، تجهیزات و تثبیت اشیاء آماده‌سازی شده است که پروژه‌های مشابه آنچه در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود مورد بررسی، تصویربرداری و تحلیل قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۴، انجام آماده‌سازی در محیط آزمایشگاه نشان داده شده است. برای حمل آسان‌تر نمونه‌های سنگی به محیط آزمایشگاه برخی نمونه‌های برداشت شده توسط دستگاه برش، به مقاطع نازک‌تر تبدیل شده است. در شکل ۳-۵، برخی نمونه‌های برداشت شده در آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه نشان داده شده است.

ابعاد بزرگتر نمونه‌های سنگی با توجه به وزن زیاد آنها که امکان حمل آنها به محیط آزمایشگاه وجود نداشت، در محل برداشت نمونه‌ها (سایت) به روش فتوگرامتری برد کوتاه مورد تصویربرداری قرار گرفته اند. در تصویربرداری برای جلوگیری از ایجاد خطا، سعی شده است نور یکسان در محیط آزمایشگاه برقرار شود و بر نمونه‌های سنگی تابیده شود و در برداشت‌های انجام شده در محیط‌های باز (آفتابی)، تصویربرداری در یک زمان و در شرایط نوری یکسان صورت پذیرفته است. در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷، برخی نمونه‌های برداشت شده در محل سایت که غالباً مختص نمونه‌های سنگی با ابعاد بزرگتر است نشان داده شده است. نمونه‌های برداشت شده در این حالت شامل سنگ‌های آذرین از جمله سنگ‌های آندزیت، گرانیت، تراکیت، دیوریت و سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ آهک، سنگ مرمر، سیلت‌استون، ماسه سنگ و ... است.



شکل ۳-۴- آماده‌سازی محیط برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه در آزمایشگاه

در مرحله آماده‌سازی ابتدا سطح درزه‌سنگ موردنظر از نزدیک مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از آماده‌سازی فضای محیطی، نشانه‌های کددار با دخالت دادن مواردی از قبیل بیشترین و کمترین فاصله تصویربرداری از سطح درزه‌سنگ، شرایط نور و بازتاب نور از سطح درزه، محدودیت‌های نرم‌افزاری و همچنین با توجه به جنس، قابلیت انعکاس، ابعاد، شکل، تقارن و کنتراست طراحی می‌شود. در این مرحله باید چند طول کنترل اطراف شی مورد نظر ایجاد شود تا در مرحله مدل‌سازی با استفاده از آن پارامتر مقیاس را حل نمود.



شکل ۳-۵- برخی نمونه‌های آماده شده برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه

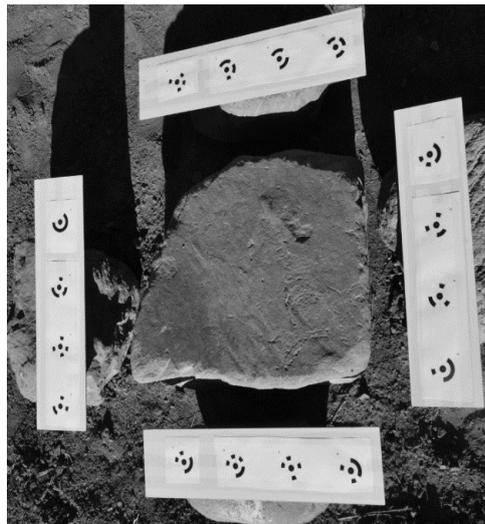
پس از طراحی این نشانه‌ها، برای مقیاس‌گذاری مدل از خط‌کش‌های مقیاس استفاده می‌شود. یکی از این خط‌کش‌های مقیاس به عنوان خط کنترل انتخاب می‌شود و سه مورد از آن به عنوان طول‌های مورد نظر برای کنترل مجدد دقت استفاده می‌گردد و در محدوده سطح درزه سنگ مورد نظر جانمایی می‌شود.



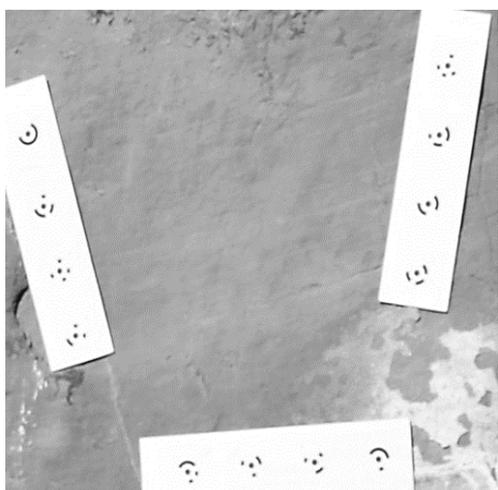
شکل ۳-۶- مرحله آماده‌سازی برای برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه (رخنمون بلوک‌های سنگی محدوده جاده مشکین شهر)



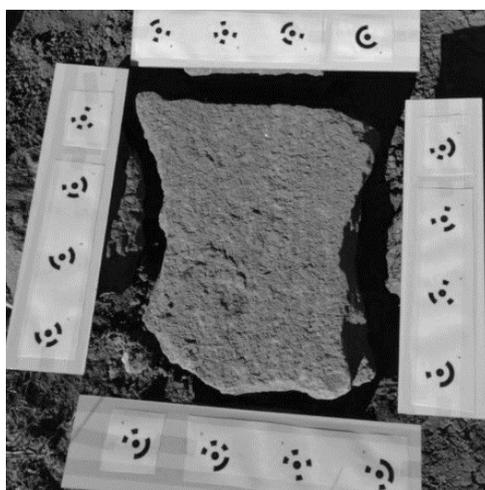
ب- گرانیت



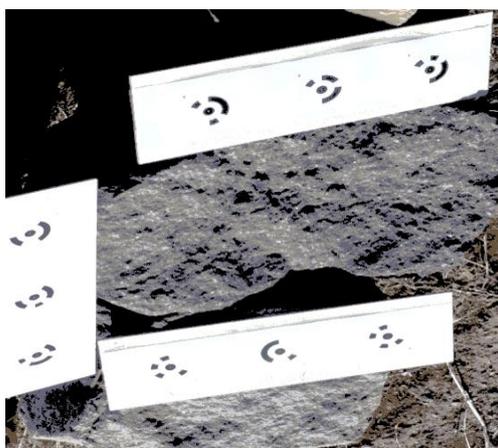
الف- ماسه سنگ



ت- سطح درزه سنگ سیلت استون



پ- سطح درزه سنگ آندزیت

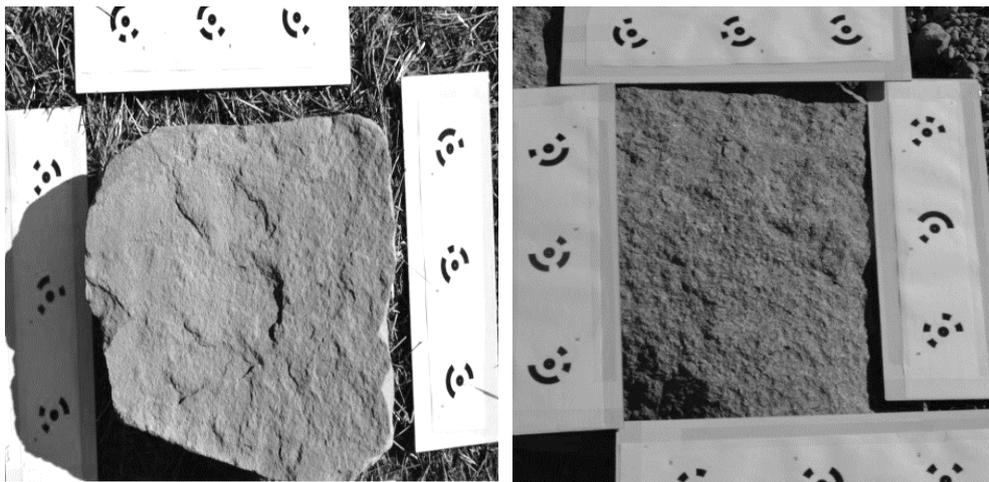


ج- سطح درزه سنگ گرانیت



ث- سطح درزه سنگ هورنبلند

شکل ۳-۷- نمونه‌های صحرایی برداشت شده شامل سنگ‌های آذرین و رسوبی



ح- ماسه‌سنگ

چ- سطح درزه‌سنگ دیوریت

ادامه شکل ۳-۷- نمونه‌های صحرایی برداشت شده شامل سنگ‌های آذرین و رسوبی

در این مرحله نمونه‌های سنگی برداشت شده در جهات مناسب در محیط چیده شده و نشانه‌های لازم برای توجیه و مقیاس‌گذاری تصاویر در کنار نمونه‌های سنگی قرار داده شده‌اند. نشانه‌ها می‌توانند اشکال متنوعی داشته باشند البته نشانه‌های دایره‌ای به دلیل همگونی و مستقل بودن اندازه‌گیری از جهت امتداد و دید، بهترین نشانه‌ها هستند. در جانمایی مستطیل‌های حاوی نشانه‌ها در محدوده سطوح درزه‌سنگ باید دقت به عمل آید تا مستطیل‌های اشاره شده در نزدیک‌ترین محل به محدوده سطح زبر مورد تحلیل باشند چرا که با فاصله گرفتن این مستطیل‌ها از سطح، سطوح غیر مفید دیگری در محدوده تحلیل تصویری قرار گرفته و حجم نقاط برداشت شده را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به طولانی شدن زمان پردازش می‌شود. این خط‌کش‌ها به همراه نمونه‌هایی از نشانه‌های مورد استفاده در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. پس از نصب نشانه‌ها بر روی خط‌کش‌های موردنظر، فواصل بین نشانه‌ها با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود و به نرم‌افزار Agisoft معرفی می‌گردد. نرم‌افزار Agisoft Photo Scan یک نرم‌افزار مستقل است که امکان انجام پردازش‌های تصویرسنجی یا همان فتوگرامتری و تولید اطلاعات و داده‌های خاص سه‌بعدی از عکس‌های دیجیتالی را برای بررسی دقیق‌تر تصاویر فراهم می‌سازد. از قابلیت‌های این نرم‌افزار با توجه به موضوع برداشت سطوح درزه‌سنگ‌ها، بررسی دقیق‌تر

سطوح تصویر، اندازه‌گیری ارتفاع سطوح، ویرایش و دسته‌بندی تراکم ابر نقاط<sup>۱</sup>، تولید مدل چند ضلعی و تهیه نقشه‌های مرتفع است. نشانه‌های اشاره شده، در نرم‌افزار Agisoft موجود بوده که پس از بررسی اندازه مورد نیاز نسبت به شی (سطح درزه‌سنگ)، می‌توان از تصاویر آنها خروجی گرفته و بر روی خط‌کش‌ها پیاده‌سازی نمود.



الف- خط‌کش‌های مقیاس ب- نمونه نشانه‌های استفاده شده در تصویر برداری از درزه‌سنگ‌ها

شکل ۳-۸- استفاده از نشانه‌ها برای حل مقیاس تصاویر در فتوگرامتری برد کوتاه

در مرحله دوم آماده‌سازی با توجه به تأثیرگذاری پارامترهای داخلی دوربین مانند فاصله کانونی، قدرت تفکیک مکانی، میدان دید و ابعاد تصویر در دقت نهایی پروژه موردنظر و همچنین تنظیم پارامترهایی نظیر میزان روشنایی، قطر دهانه دیافراگم و همچنین F-Stop متناسب با پروژه موردنظر، انتخاب یک دوربین مناسب جهت رسیدن به دقت و صحت بالا الزامی است. در این تحقیق جهت سنجش سطوح درزه‌سنگ‌ها از دوربین رقومی و غیرمتریک NikonD5300 با پارامترهای داخلی نمایش داده شده در شکل ۳-۹ استفاده شده است.

<sup>1</sup> Cloud point



مدل	NIKON-D5300
فاصله کانونی	۲۹ mm
سرعت شاتر	۱/۸۰۰ ثانیه
سنسور	CMOS
ابعاد تصویر	۲۷۳۶*۳۶۴۸
ابعاد پیکسل	۴/۰۵ $\mu\text{m}$
f-stop	۵-۸
Iso	۲۰۰

شکل ۳-۹: مشخصات دوربین تصویربرداری استفاده شده در برداشت سطوح زبر درزه سنگ اخیراً با پیشرفت ایجاد شده در تکنولوژی دوربین‌های تلفن‌های همراه امکان استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه توسعه بیشتری پیدا کرده است. پیش‌بینی می‌گردد با توسعه روش فتوگرامتری و در دسترس بودن تلفن‌های همراه حاوی دوربین‌های با کیفیت انجام پروژه‌های فتوگرامتری برد کوتاه درزه سنگ‌ها با سهولت بیشتری نیز صورت پذیرد.

### ۳-۲-۴- طراحی شبکه

مباحثی نظیر انتخاب مشخصات دوربین تصویربرداری و تعداد ایستگاه‌های دوربین و تکرار تصویر و هندسه شبکه از موضوعات اساسی در زمینه طراحی شبکه است. هدف از طراحی شبکه‌های فتوگرامتری برد کوتاه، ارضای معیارهایی نظیر دقت، قابلیت اطمینان و هزینه است. مبنای طراحی شبکه در اندازه گیری به روش فتوگرامتری برد کوتاه و در این تحقیق مبتنی بر مثلث‌بندی دسته اشعه است که در آن مختصات سه‌بعدی نقاط سطح درزه سنگ، موقعیت و وضعیت ایستگاه‌های دوربین و پارامترهای کالیبراسیون دوربین به صورت همزمان و دقیق بدست می‌آیند. در این پروژه با توجه به اینکه هدف، رسیدن به دقت بالا در تولید ابر نقاط است و با توجه به اینکه سطوح درزه سنگ مورد نظر دارای ابعادی در حدود ۱۰ تا ۶۰ سانتی‌متر بوده، تصویربرداری در یک رینگ به صورت ۳۶۰ درجه اطراف سطح درزه سنگ انجام شده است. تصویربرداری از نمونه‌های درزه سنگ این تحقیق از حداقل ۱۲ موقعیت

مختلف با تامین هم‌پوشانی انجام شده است. مهم‌ترین نکات در طراحی بهینه برای پوشش مناسب که در برداشت‌های درزه‌سنگ مد نظر قرار گرفته است عبارتند از:

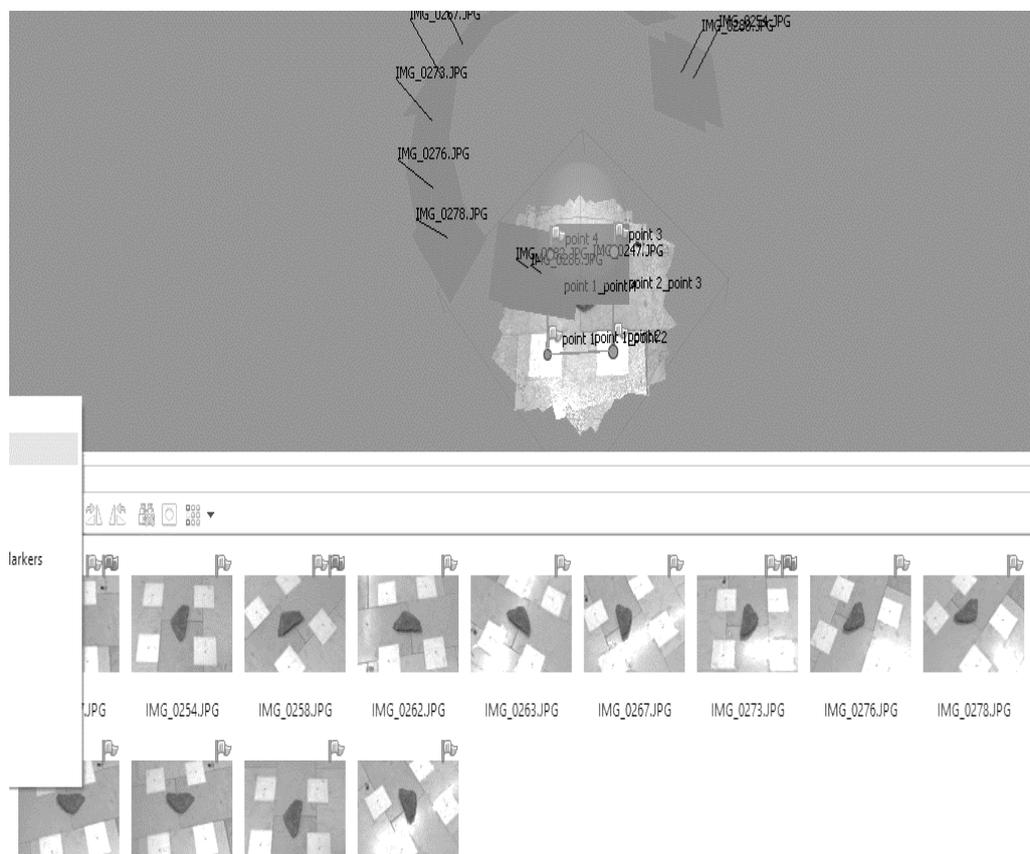
- سعی شده است که همه نشانه‌ها از چهار موقعیت یا بیشتر دیده شوند.
- زوایای تقاطع بین دوربین‌ها بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه مد نظر قرار گرفته است.
- زوایای دید نشانه‌ها برای دید مناسب آنها کمتر از ۶۰ درجه لحاظ شده است.

### ۳-۲-۵- تصویربرداری

برای دستیابی به تصاویر بهتر، لازم است سعی گردد در مراحل تصویربرداری از لرزش دوربین جلوگیری شود. استفاده از سه پایه در مواردی که امکان بکارگیری آن میسر است منجر به تهیه تصاویر بهتری خواهد شد. برای اخذ تصاویر، دوربین را در حالت اتوماتیک قرار داده و یک تصویر از سطح درزه‌سنگ گرفته می‌شود تا فوکوس مناسب ایجاد شود و تصویر شارپ شود. سپس دوربین را از حالت اتوماتیک خارج کرده و بر روی لنز آن چسب زده می‌شود تا در کل فرایند عکس‌برداری تغییری در فاصله کانونی ایجاد نشود. بر اساس شرایط نور محل مورد نظر تنظیمات دوربین از جمله f-stop و ... در حالتی قرار داده می‌شود تا شارپ‌ترین تصاویر حاصل شود.

برای رسیدن به دقت مورد نیاز و مناسب، لازم است حداقل ۱۲ نقطه در هر عکس دیده شوند. روشن است که هر چه تعداد نقاط بیشتر باشد اندازه‌گیری‌ها دقیق‌تر خواهد بود. البته باید توجه داشت که اندازه‌گیری بیش از ۴۰ نقطه در هر عکس، تاثیر زیادی در افزایش دقت نخواهد داشت (امینی و همکاران، ۱۳۸۵). در این مطالعه ایستگاه‌های عکس‌برداری در حداقل ۱۲ ایستگاه شامل شش ایستگاه تصویربرداری از سمت بالایی سطح درزه‌سنگ و شش ایستگاه دیگر از سطح پایینی درزه‌سنگ کل سطح مورد نظر را پوشش داده‌اند. همچنین تصویربرداری به گونه‌ای انجام گرفت که نشانه‌های موردنظر حداقل از سه عکس دیده شوند. لازم به ذکر است برای اخذ تصاویر مناسب، تصویربرداری چندین بار تکرار شد تا تصاویر گرفته شده از لحاظ کیفیت و پوشش به حد مطلوب رسیده باشند.

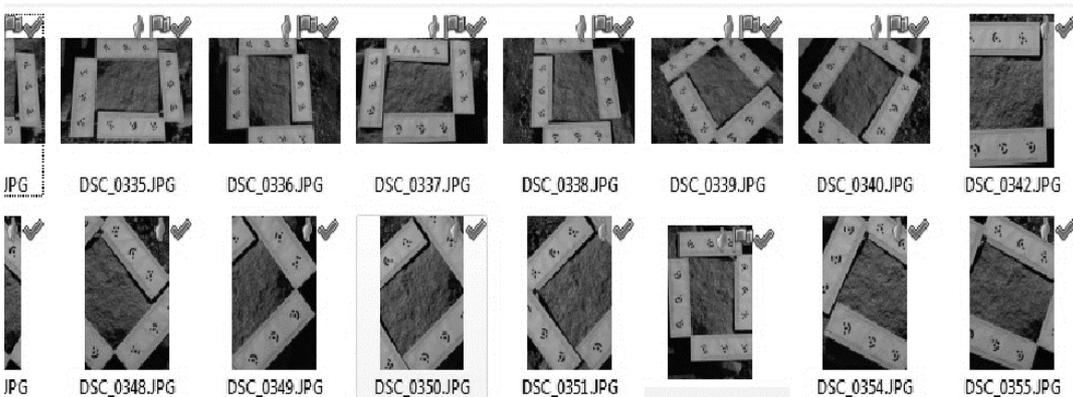
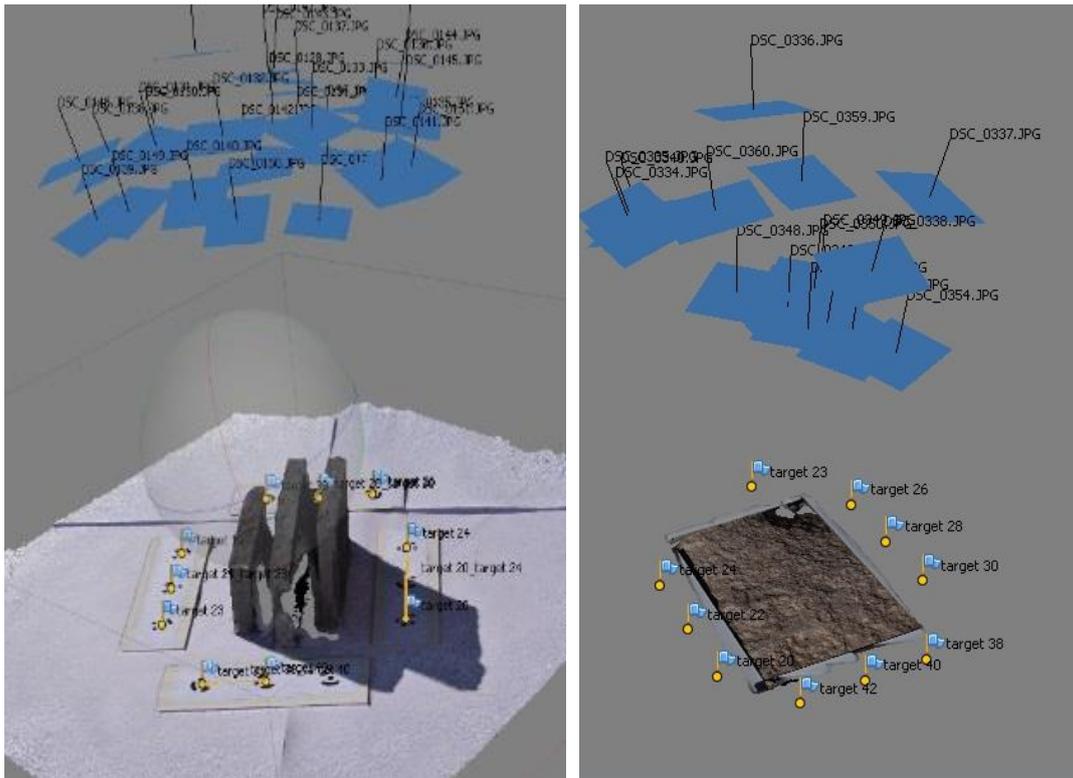
پس از ورود این تصاویر به نرم‌افزار Agisoft دوباره تصاویر مورد بازنگری قرار گرفته‌اند و تصاویری که نامناسب اخذ شده‌اند، از ادامه پردازش حذف شده‌اند. شکل ۳-۱۰ نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده از سطوح درزه‌سنگ و وارد شده به نرم‌افزار به همراه ایستگاه‌های تصویربرداری را نشان داده است.



شکل ۳-۱۰- مجموعه‌ای از تصاویر اخذ شده به همراه ایستگاه‌های تصویربرداری

### ۳-۲-۶- رقومی‌سازی سطح درزه‌سنگ

نرم‌افزار پردازش تصویر استفاده شده در این تحقیق، نرم‌افزار Agisoft می‌باشد. پس از آن که تصویربرداری از جسم به صورت دقیق و با رعایت نکات فنی انجام شد، باید تصاویر برای تولید محصولات نهایی پردازش شوند. اولین گام ورود تصاویر به نرم‌افزار Agisoft است. نرم‌افزار قابلیت نمایش امتداد تصویربرداری از نمونه‌های سطح درزه‌سنگ را دارد. جهات تصویربرداری در دو نمونه سنگ گرانیت و ماسه‌سنگ در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.

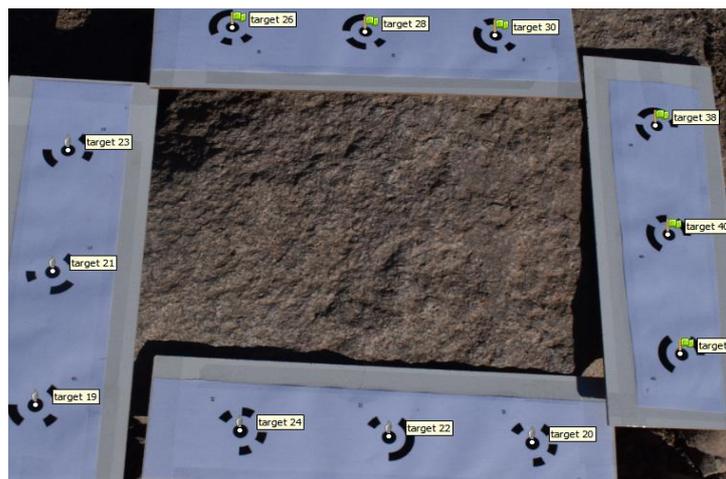


شکل ۳-۱۱: جهات تصویربرداری از سطح درزه سنگ

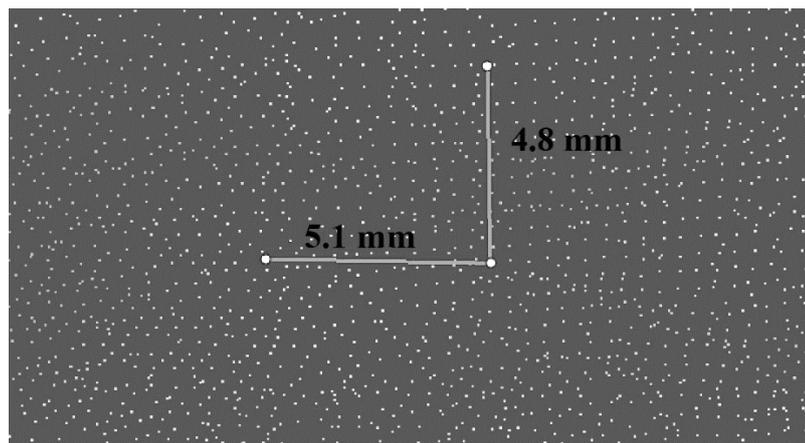
پس از این مرحله ابر نقاط از سطح درزه سنگ تولید شده است. بنابراین محصولی که از پردازش تصاویر به دست می‌آید ابر نقاط متراکم است که در شکل ۳-۱۲، نشان داده شده است. منظور از ابر نقاط، تعداد بسیار زیادی از نقاط با دارای مختصات در سه بعد هستند که با تراکم بالا در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و شکل طبیعی جسم را در اندازه واقعی ایجاد کرده‌اند. در محاسبات مربوطه به پردازش تصاویر و نرم‌افزارهای مربوطه همچون نرم‌افزار مذکور، امکان ایجاد ابر نقاط کم‌چگال تا پرچگال بسته به نیاز کاربر به کیفیت و دقت برداشت تصویر مورد نظر وجود دارد. در تعریف میزان

تراکم ابر نقاط برداشتی برای سطوح درزه سنگ در نرم افزار اشاره شده، از حالت پرچگال در محاسبات استفاده شده است. در این حالت زمان پردازش تصویر افزایش می یابد اما تراکم ابر نقاط افزایش یافته و فاصله نقاط کنار هم در تحلیل تصویر حداکثر در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی متر قرار می گیرد. برای کاهش زمان محاسبات از رایانه مناسب استفاده شده است. زمان صرف شده برای تحلیل هر نمونه درزه سنگ حدود ۱۲ ساعت به طول انجامیده است. عدد عنوان شده به عنوان حداکثر فاصله بین نقاط در ابر نقاط ایجاد شده بدست آمده است و از این رو فاصله نقاط مدل بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی متر قابل ارزیابی است. در این حالت دقت کافی برای بررسی های بعدی سطوح تصویر حاصل می شود.

تولید مش از سطح تصویر با استفاده از ابر نقاط ایجاد شده صورت می پذیرد و مدل سطح درزه سنگ تشکیل می شود. مرحله بعدی تفهیم پارامتر مقیاس به نرم افزار است. بنابراین طول های کنترل اندازه گیری شده قبل از عکس برداری را باید به نرم افزار معرفی کرده تا پارامتر مقیاس حل شود و نقاط به مقیاس واقعی خود برسند. در این مطالعه طول های کنترل با استفاده از یک کولیس با دقت یک صدم میلی متر اندازه گیری شده و در مدل نرم افزاری وارد شده است. با اتمام این مرحله نقاط سطوح درزه سنگ مختصات دار شده و فواصل بین نقاط مدل، بر اساس فواصل واقعی موجود در سطح درزه سنگ بدست می آیند. در شکل ۳-۱۲، نقاط نشانه شناسایی شده توسط نرم افزار و ابر نقاط ایجاد شده در محدوده سطوح درزه سنگ نشان داده شده است.

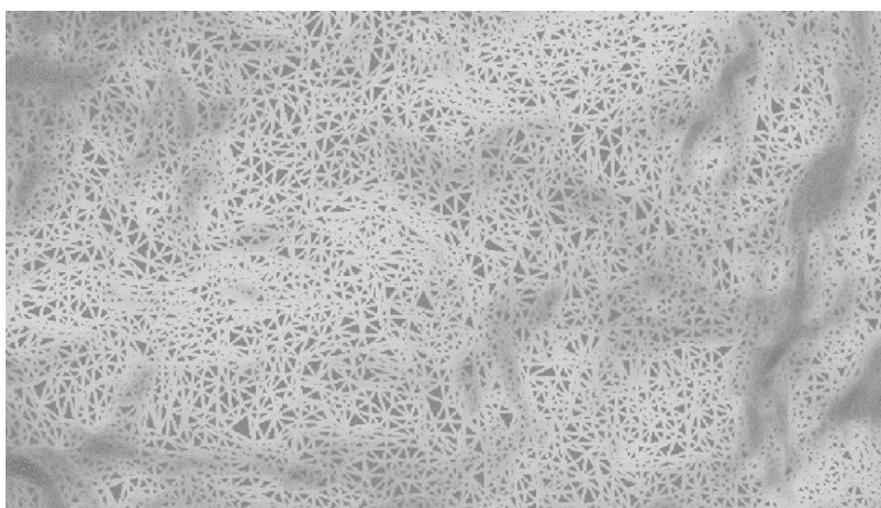


شکل ۳-۱۲- ابر نقاط ایجاد شده بر روی سه نمونه سنگ گرانیت و نشانه‌های شناسایی شده توسط نرم‌افزار برای مشاهده وضعیت تراکم نقاط، در شکل ۳-۱۳ ابر نقاط تشکیل شده در سطح درزه سنگ نمونه گرانیتی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ترسیم دو خط به طول‌های ۵/۱ و ۴/۸ میلی‌متر در طول سطح مورد نظر بیش از ۳۰ نقطه محاسباتی پیاده شده است که امکان انجام محاسبات مربوط به پردازش تصویر و دقت مورد نیاز برای تحلیل‌های این تحقیق را میسر می‌سازد.



شکل ۳-۱۳- بزرگنمایی ابرنقاط و تعداد نقاط ایجاد شده

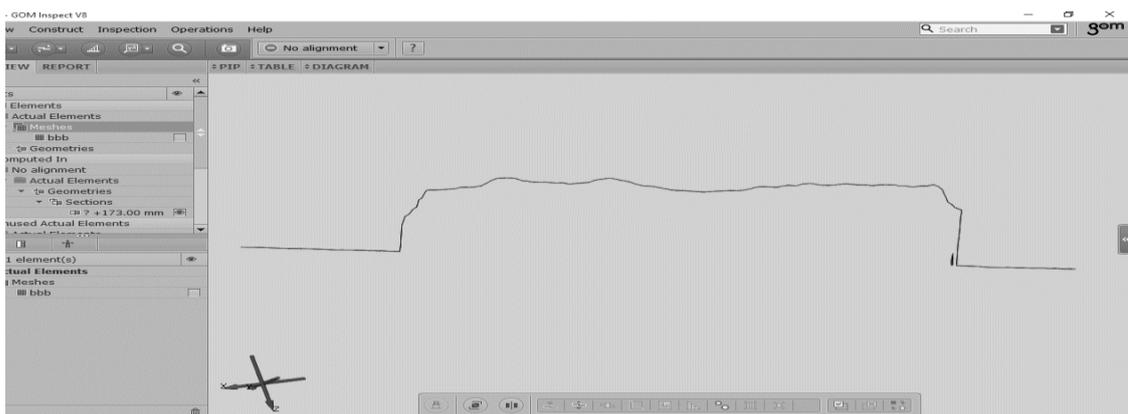
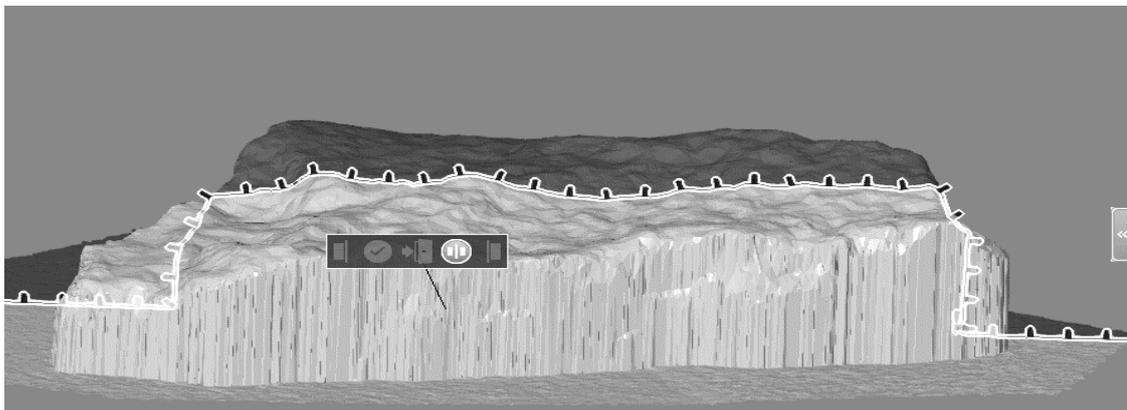
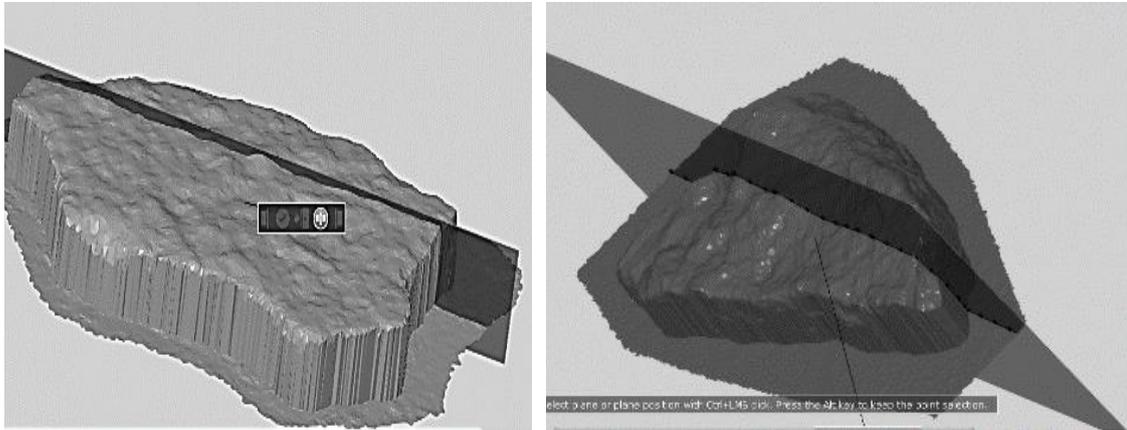
با خروجی اخذ شده از نرم افزار، سطح سه بعدی از درزه سنگ ایجاد می شود. پس از این مرحله مش تولید شده در نرم افزار AgiSoft به نرم افزار GOM انتقال می یابد. نرم افزار GOM قابلیت بازسازی و اصلاح مش و حذف خطاهای احتمالی ناشی از تصویربرداری را دارد. در شکل ۳-۱۴ مش بندی ایجاد شده برای نمونه سنگ گرانیتی نشان داده شده است. بر اساس مش های ایجاد شده مدل هندسی درزه سنگ تشکیل شده و مقاطع دوبعدی و سه بعدی استخراج شده است.



شکل ۳-۱۴- مش بندی ایجاد شده برای سطح درزه سنگ گرانیتی

برای استخراج مقاطع دوبعدی از سطح درزه سنگ به منظور برآورد زبری آن کافی است مقطع دوبعدی از سطح درزه سنگ تهیه شود. با توجه به مختصات دار بودن نقاط مقطع درزه سنگ، امکان انجام

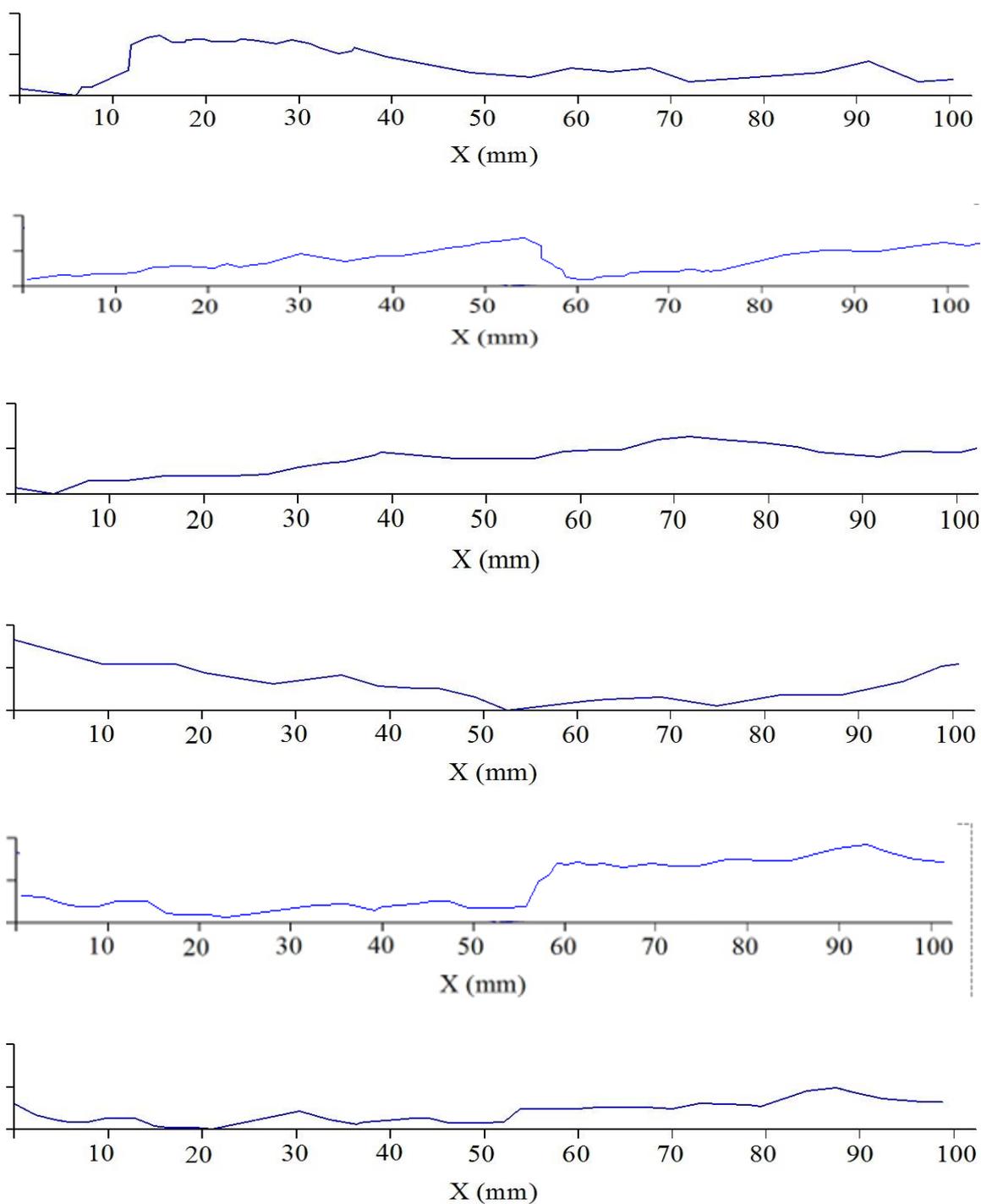
تحلیل‌های لازم برای برآورد زبری وجود خواهد داشت. در شکل ۳-۱۵ ایجاد مقطع بر روی سطح سه‌بعدی حاصل از برداشتهای فتوگرامتری برد کوتاه نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵- استخراج مقطع دو بعدی سطح درزه‌سنگ

همان‌طور که بیان شد مدل رقومی از سطح درزه‌سنگ با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه و پردازش تصویر با بکارگیری نرم‌افزارهای AgiSoft و GOM بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد با

استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه می‌توان با دقت ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر فواصل بین نقاط پردازش شده ابر نقاط را مختصات‌دهی نمود. دقت عنوان شده در تحلیل‌های مورد نظر در حوزه مکانیک سنگ کفایت لازم را داشته و می‌تواند به عنوان معیار مناسبی در تعیین پارامترهای کمی زبری مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین با توجه به دقت‌های مورد نظر در برآورد زبری درزه‌سنگ‌ها از این روش می‌توان به خوبی استفاده نمود. صرفاً با دستیابی به تصاویر شفاف با استفاده از قابلیت دوربین‌های عکاسی امروزه و بکارگیری نرم‌افزارهای پردازش تصویر همچون نرم‌افزارهای مورد استفاده در این مطالعه می‌توان به مدل رقومی با دقت بالا دست یافت. لازم به ذکر است حسب میزان دقت مورد نیاز کاربر می‌توان از حالات با دقت متوسط و دقت کم (آنچه در نرم‌افزار قابل تعریف است) استفاده نمود. در این تحقیق با مدل‌سازی و سنجش سطوح زبر درزه‌سنگ مورد نظر نشان داده شده است که با استفاده از روش فتوگرامتری می‌توان با مدت زمان و هزینه کمتر به دقت بالایی دست یافت. برخی نمونه‌های سطح زبر استخراج شده با روش فتوگرامتری برد کوتاه در شکل ۳-۱۶، نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶- برخی نمونه‌های سطح زیر استخراج شده به روش فتوگرامتری برد کوتاه

### ۳-۳- گردآوری نمونه‌های زیر درزه سنگ

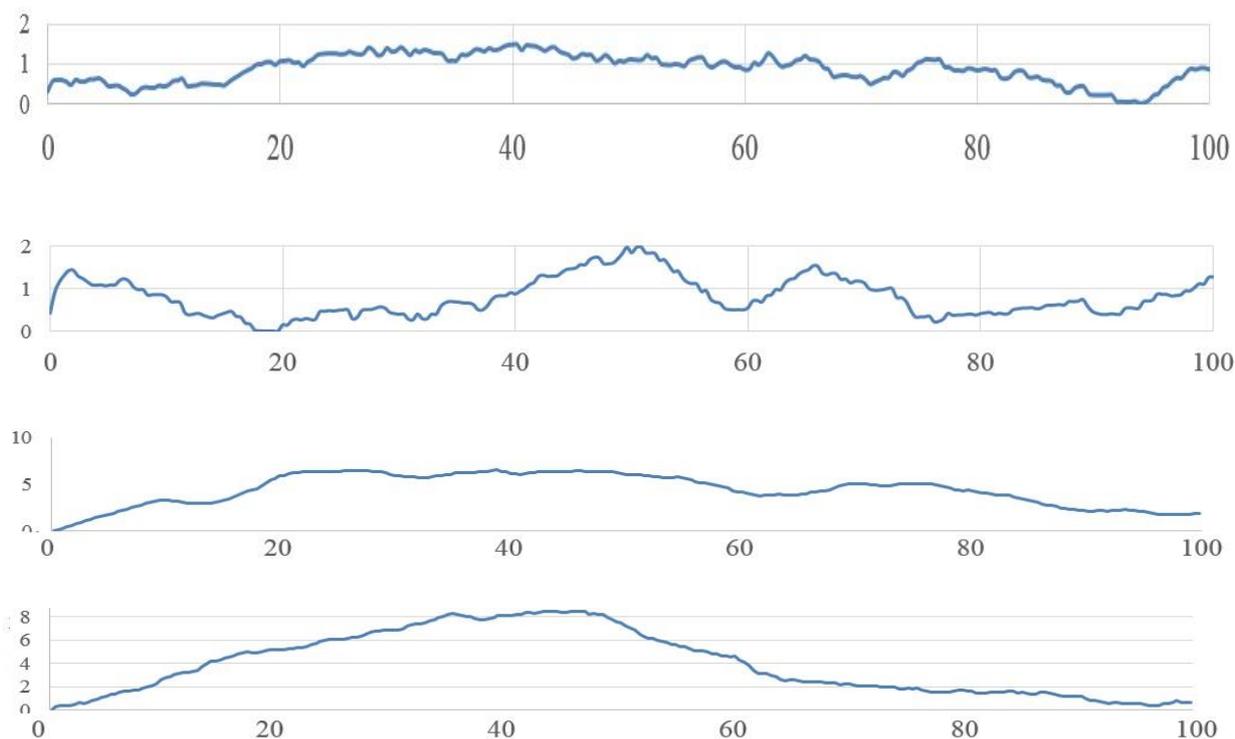
در ادامه تحقیق، برای دستیابی به دامنه بیشتر از سطوح زیر درزه سنگ، نسبت به جستجو و گردآوری داده‌های سطح درزه سنگ از مشخصات منابع دیگر اقدام شده است. اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از

نمونه‌های زیر واقعی که تحت برش قرار گرفته و نتایج عدد زبری آنها توسط محققین مختلف استخراج شده است، میسر خواهد شد. نمونه‌های واقعی سطح زیر درزه‌سنگ، استخراج شده توسط بارتن و چوبی (۱۹۷۷) برای بررسی مقاومت برشی درزه‌سنگ، مطالعات آزمایشگاهی باندیس (۱۹۸۰) به منظور بررسی تاثیر مقیاس در مقاومت برشی و تغییر شکل درزه‌سنگ، مطالعات انجام شده توسط بارتن و باندیس (۱۹۸۳) و مطالعات آزمایشگاهی گراسلی (۲۰۰۱ و ۲۰۰۶) که مجموعاً ۱۱۲ نمونه را تشکیل داده‌اند، مبنای بررسی اشکال هندسی درزه‌سنگ در این تحقیق قرار گرفته است. در جدول ۳-۱ تعداد کل نمونه های سطح تحت مطالعه به همراه منابع اخذ داده ارایه شده است.

جدول ۳-۱- تعداد نمونه‌های سطح درزه‌سنگ تحت مطالعه

ردیف	گردآوری داده‌های سطح درزه	تعداد نمونه سطح	منابع
۱	سطوح درزه به طول ۱۰ سانتی‌متر	۱۱۲	گردآوری از مطالعات پیشین شامل: - سطوح تحت مطالعه توسط بارتن و چوبی (۱۹۷۷) - سطوح تحت مطالعه توسط باندیس (۱۹۸۰) - سطوح تحت مطالعه توسط بارتن و باندیس (۱۹۸۳) - سطوح تحت مطالعه توسط گراسلی (۲۰۰۱ و ۲۰۰۶)
۲	سطوح درزه به طول ۱۰ سانتی‌متر	۹۱	گردآوری طی برداشت به روش فتوگرامتری برد کوتاه از نمونه‌های درزه‌سنگ مختلف (آذرین و رسوبی) طی این تحقیق

فواصل نقاط برداشت در راستای طولی درزه ۰/۴ میلی‌متر است. برخی نمونه‌های سطوح درزه در شکل ۱۷-۳، نشان داده شده است. در اشکال اشاره شده محور طولی، طول درزه و محور قایم ارتفاع درزه بر حسب میلی‌متر است.



شکل ۳-۱۷- برخی نمونه‌های سطح زبر استخراج شده از منابع محققین پیشین

### ۳-۴- جمع‌بندی

روش فتوگرامتری برد کوتاه به عنوان روشی که تجهیزات برداشت آن در اختیار بیشتر کارشناسان امر وجود دارد می‌تواند به عنوان روشی صحیح و با دقت بالا مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با در اختیار داشتن دوربین‌های عکاسی نیمه حرفه‌ای و با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه می‌توان با دقت ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر فواصل بین نقاط پردازش شده را مختصات دهی نمود. دقت عنوان شده در تحلیل‌های مورد نظر در حوزه مکانیک سنگ کفایت لازم را دارد و می‌تواند به عنوان معیار مناسبی در تعیین پارامترهای کمی زبری مورد استفاده قرار گیرد. پیشرفت تکنولوژی و ارتقاء تدریجی دوربین‌های تلفن‌های همراه استفاده از این روش را کاراتر، در دسترس‌تر و سریع‌تر به نتیجه می‌رساند. با استخراج داده‌های حاصل از منابع مطالعات محققین پیشین و داده‌های استخراج شده به روش فتوگرامتری برد کوتاه، در مجموع ۲۰۳ نمونه سطح درزه سنگ برای مطالعات آماری این رساله مورد استفاده قرار گرفته است.

فصل چهارم:

مطالعات آماری هندسه سطوح

زبر درزه سنگ

#### ۴-۱- مقدمه

پس از برداشت سطوح زبر درزه سنگ به روش فتوگرامتری برد کوتاه و گردآوری سطوح درزه سنگ مورد مطالعه از مطالعات انجام شده پیشین، همان طور که در فصل پیش تشریح شد، خصوصیات هندسی (زبری) درزه سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل، روش‌های مورد استفاده برای استخراج خاصیت زبری درزه سنگ برای نمونه‌های تحت مطالعه تشریح می‌شود. در ادامه سعی شده است اشکال هندسی درزه سنگ موثر در تعیین زبری مورد بررسی قرار گیرد و به عنوان شاخصه‌هایی برای تعریف زبری درزه سنگ تعریف شوند.

#### ۴-۲- بررسی پارامترهای کمی زبری درزه سنگ

مجموعه پارامترهای کمی مورد استفاده در این تحقیق در ادامه ارایه شده است. از کل نمونه‌های گردآوری شده در این تحقیق ۱۱۲ نمونه درزه سنگ حاوی مشخصات زیر بوده و مبنای مطالعات آماری قرار گرفته‌اند.

- سطوح هندسه درزه سنگ در قالب مختصات  $(x,y)$

- مقادیر ضریب زبری درزه (JRC) سطوح درزه سنگ که از آزمایش برش حاصل شده است با استفاده از اطلاعات مذکور بررسی آماری پارامترهای کمی زبری انجام می‌شود. هر کدام از پارامترهای کمی زبری درزه سنگ دارای نقاط قوت و ضعف در تبیین زبری درزه هستند و دلیل آن چگونگی مشخص شدن ناهمواری‌های سطح زبر درزه با استفاده از روابط ریاضی مشخص شده در پارامترهای کمی است که در این بخش این موضوع نیز بررسی خواهد شد. پارامترهای کمی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۴-۱ ارایه شده است.

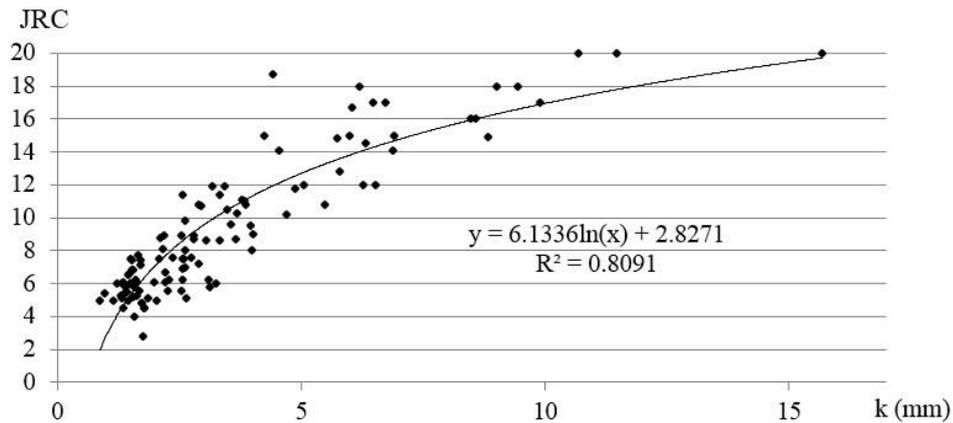
جدول ۴-۱- پارامترهای کمی تعیین زبری درزه سنگ

پارامتر کمی	تعریف	رابطه
K	میزان زبری کامل درزه	$K = y_{max} - y_{min}$
CLA	خط مرکزی میانگین	$CLA = 1/L \sum_{i=1}^{N-1}  Y_i  \Delta s$
a/L	شیب نهایی پروفیل	$a/L = R_z/L$
$R_q$	ریشه میانگین مربعات نقاط نمونه برداری	$R_q = \left[ 1/M \sum_{i=1}^{N-1} y^2 \Delta s \right]^{1/2}$
MSV	مقدار میانگین مربع	$MSV = 1/L \sum_{i=1}^{N-1} y^2 \Delta s$
$Z_2$	مشتق اول ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها	$Z_2 = 1/L \sum_{i=1}^{N-1} \left[ \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{X_{i+1} - X_i} \right]^{1/2} \Delta s$
$R_p$	اندیس زبری مقطع	$R_p = L_t/L$
$\delta$	اندیس افزایش طول مقطع درزه	$\delta = (L_t - L)/L$
$\delta_L$	نرخ افزایش طول مقطع درزه	$\delta_L = \delta \times 100$
SF	تابع ساختاری	$SF = 1/L \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \Delta x$

L طول تصویر شده پروفیل زبری، Lt طول واقعی درزه، N تعداد نقاط نمونه برداری، Y ارتفاع نقاط بر روی فواصل نمونه برداری، M تعداد فواصل نمونه برداری a فاصله بین کمینه و بیشینه ارتفاع در سطح درزه و Δs بیانگر فواصل نمونه برداری است و در این تحقیق برابر با ۰/۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲-۱- پارامتر K

این پارامتر که به عنوان میزان زبری کامل درزه معروف است بیانگر اختلاف بیشینه و کمینه ارتفاع نقاط سطح درزه است. شکل ۴-۱، رابطه بین پارامتر K با JRC در نمونه‌های مختلف سطح درزه استخراج شده را نشان می‌دهد. جامعه آماری مطالعه ۱۱۲ نمونه را پوشش می‌دهد. مقادیر بیشینه و کمینه ارتفاع در هر نمونه استخراج شده و پارامتر K بر اساس آن محاسبه شده است. رابطه لگاریتمی بین پارامتر K و JRC در رابطه ۴-۱ ارایه شده است. مقدار  $R^2$  در این رابطه برابر با ۰/۸۱ به دست آمده است.



شکل ۴-۱- رابطه بین پارامتر K و JRC

$$JRC = 6.1336 \ln(K) + 2.8271, R^2 = 0.81 \quad (۴-۱)$$

با توجه به ضعف ساختاری پارامتر K و با توجه به این که سطوح زبر متفاوتی می‌توانند با میزان K مشخص دارای مقادیر ضریب زبری درزه متفاوتی باشند، از این رو، این پارامتر نمی‌تواند به عنوان پارامتر مطلوب در برآورد زبری درزه سنگ محسوب شود. شکل ۴-۲، دو نمونه سطح زبر درزه سنگ تحت مطالعه (الف و ب) با تفاوت فاحش در شکل و هندسه درزه اما با مقدار K یکسان را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲- دو نمونه سطح زبر درزه سنگ (الف و ب) با مقادیر K یکسان اما وضعیت زبری کاملاً متفاوت

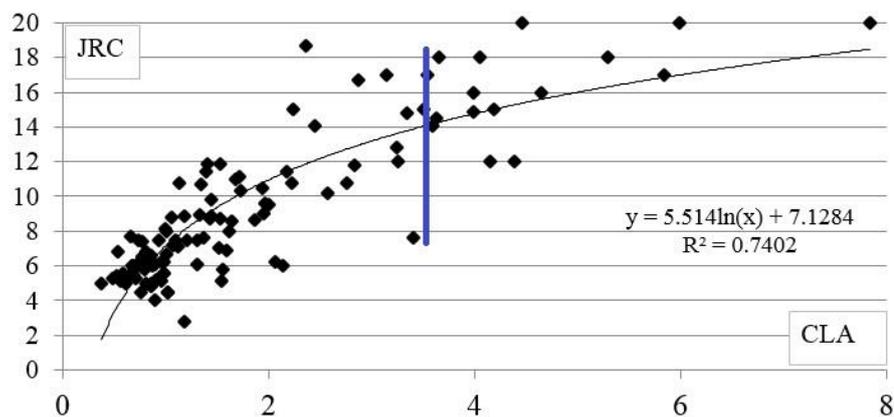
#### ۴-۲-۲- پارامتر CLA

رابطه کمی دیگر، پارامتر CLA است که توسط تسه و کرودن ارایه شده است. این پارامتر بر اساس جامعه آماری گردآوری شده در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. برای سطوح درزه سنگ موجود

پارامتر CLA محاسبه شده و مقادیر آن بر حسب مقادیر ضریب زبری درزه در شکل ۳-۴ ارائه شده است. رابطه لگاریتمی ۲-۴، بیانگر رابطه بین JRC و CLA است.

$$JRC = 5.514 \ln(CLA) + 7.1284, R^2 = 0.74 \quad (۲-۴)$$

مقدار  $R^2$  در این رابطه ۰/۷۴ برآورد شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود به ازای مقدار عددی CLA برابر با ۳/۵، ضریب زبری درزه از ۷/۸ تا ۱۸ متغیر است. همانند آنچه در مورد پارامتر K عنوان شد، پارامتر CLA نیز نمی‌تواند به عنوان پارامتر مطلوب در برآورد زبری درزه سنگ محسوب شود.

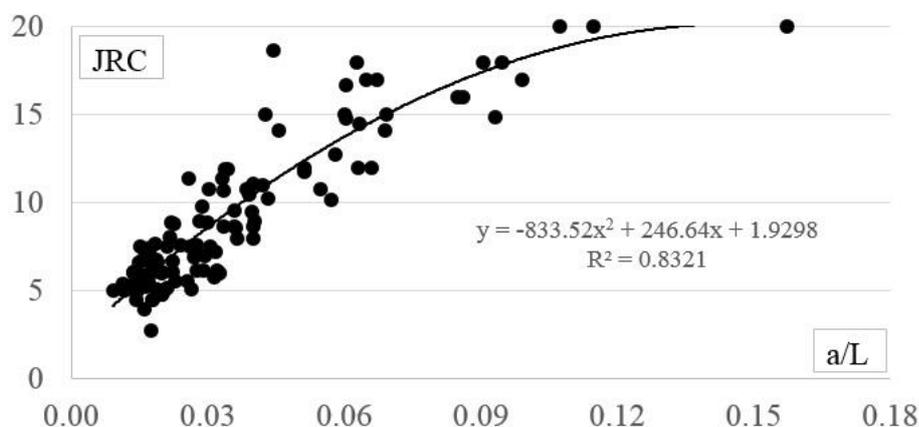


شکل ۳-۴- رابطه بین پارامتر CLA و JRC

#### ۳-۲-۴- پارامتر a/L

پارامتر a/L توسط بارتن و دیکوادرس (۱۹۹۷) ارائه شده است. این پارامتر ساده نیز بر حسب نسبت بیشینه ارتفاع سطح درزه سنگ به طول درزه تعریف می‌شود. رابطه ۴-۴، بیانگر رابطه بین JRC و پارامتر a/L است. مقدار  $R^2$  در این رابطه ۰/۸۳ برآورد شده است. مشابه آنچه در شکل ۲-۴ ارائه شد، برای پارامتر a/L نیز اشکال مشابهی مطرح است. در دو شکل هندسی زبر (الف و ب) تعریف شده در شکل ۲-۴، مقدار این پارامتر یکسان است و تمایزی بین سطوح زبر درزه سنگ در این حالت نمی‌تواند ایجاد نماید.

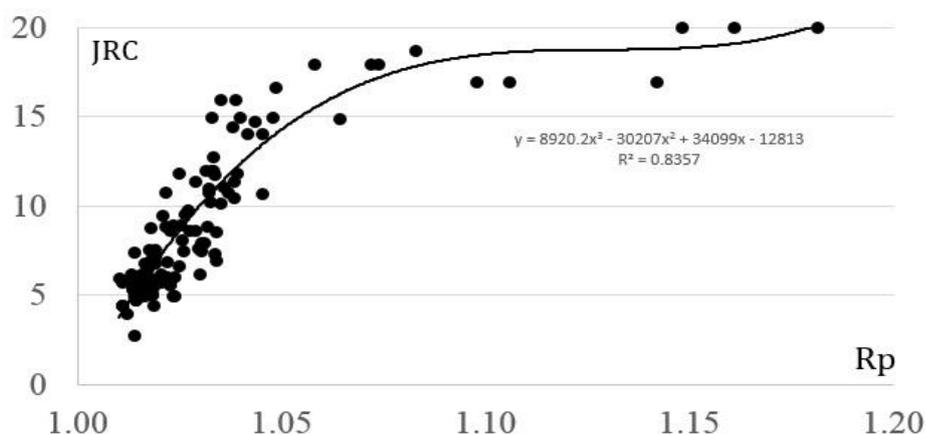
$$JRC = -833.52(a/L)^2 + 246.64(a/L) + 1.9298, R^2 = 0.83 \quad (3-4)$$



شکل ۴-۴- رابطه بین پارامترش a/L و JRC

#### ۴-۲-۴ پارامتر $R_p$

پارامتر  $R_p$  دیگر پارامتر کمی تعیین زبری درزه سنگ است که اولین بار توسط السودانی ارایه شده است و به صورت طول واقعی درزه سنگ به طول تصویر شده درزه تعریف می شود. میرز و همکاران برای ده مقطع زبر درزه سنگ ارایه شده توسط بارتن مقدار عددی پارامتر  $R_p$  را محاسبه نموده و یک رابطه خطی بین این پارامتر و JRC ارایه نموده اند. این پارامتر نسبت به پارامترهای پیشین در مراجع بیشتر مورد استناد قرار می گیرد. در مطالعه حاضر برای جامعه آماری بیشتر (۱۱۲ نمونه درزه سنگ)، ارتباط این پارامتر با JRC ارایه شده است. شکل ۴-۵، بیان گر رابطه بین  $R_p$  و JRC است.



شکل ۴-۵- رابطه بین پارامتر  $R_p$  و JRC

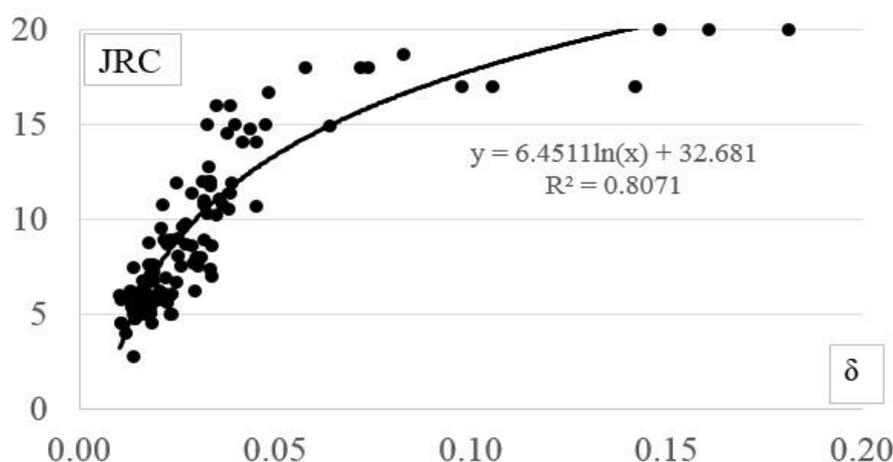
محققین مختلف بر اساس مطالعات انجام شده در مورد پارامتر  $R_p$  بازه ضریب همبستگی بین مقادیر  $0/۸۶$  تا  $۰/۹۸$  را ارائه نموده‌اند ( El-Soudani, 1978, Maerz, 1990, Yu and Vayssade, 1991, Li and Jang, 2015). در تحقیق حاضر بر اساس یک جامعه آماری با ۱۱۲ نمونه درزه‌سنگ، بیشترین میزان همبستگی پارامتر  $R_p$  و JRC در قالب یک معادله درجه سه و ضریب همبستگی  $۰/۹۱$  بین این دو پارامتر حاصل شده است. در پارامتر  $R_p$  نیز سطوح زیر درزه‌سنگ متفاوتی می‌توانند منجر به مقدار یکسانی از این پارامتر شوند. مثال‌هایی از این ضعف ساختاری در شکل شماتیک ۴-۶، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با وجود این که طول واقعی درزه در این دو شکل یکسان است اما پرواضح است که عملکرد هندسی درزه‌سنگ و زبری متناظر آن متفاوت است.



شکل ۴-۶- دو هندسه شماتیک با طول مساوی ولی عملکرد متفاوت، مثالی برای پارامتر  $\Gamma_p$

#### ۴-۲-۵- اندیس افزایش طول درزه $\delta$

اندیس افزایش طول درزه  $\delta$  به عنوان پارامتر دیگر در تعیین زبری درزه ارائه شده است (Yu and Vayssade, 1991). در شکل ۴-۷، ارتباط  $\delta$  با JRC برای جامعه آماری گردآوری شده در این تحقیق نشان داده شده است.



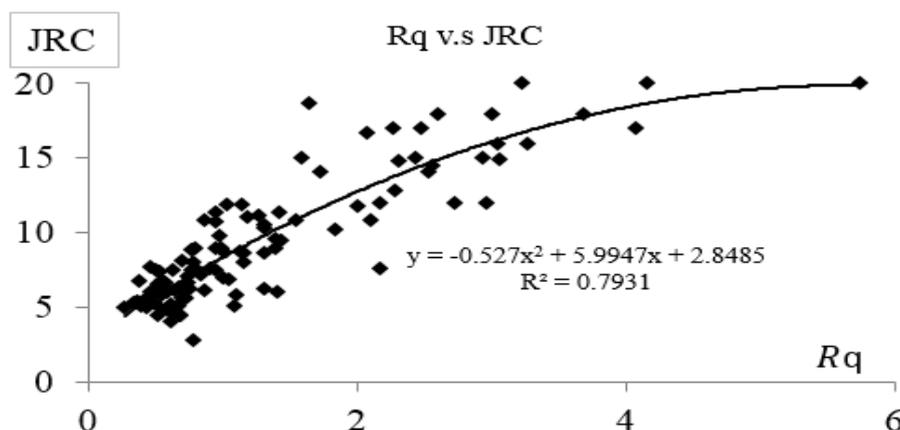
شکل ۴-۷- رابطه بین پارامتر  $\delta$  و JRC

رابطه ۴-۴ رابطه لگاریتمی بین JRC و  $\delta$  را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بین این دو پارامتر ۰/۹ است.

$$JRC = 6.4511 \ln(\delta) + 32.681, R^2 = 0.8071 \quad (۴-۴)$$

#### ۴-۲-۶- پارامتر $R_q$

در ادامه بررسی پارامترهای کمی تعیین زبری درزه سنگ پارامتر  $R_q$  که بیان‌گر ریشه میانگین مربعات زبری درزه است (Tse and Cruden, 1979) ارایه شده است. برای جامعه آماری این تحقیق، رابطه بین  $R_q$  و JRC در شکل ۴-۸، نشان داده شده است.

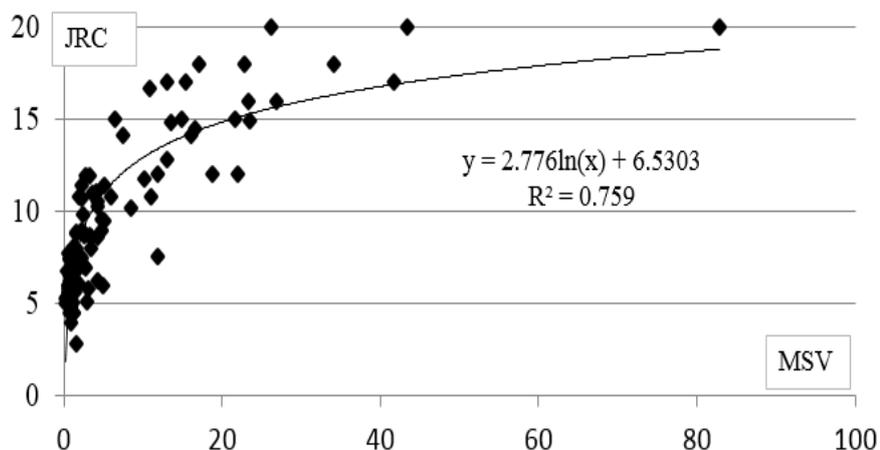


شکل ۴-۸- رابطه بین  $R_q$  و JRC

بیشترین میزان همبستگی بین دو پارامتر  $R_q$  و JRC به صورت یک رابطه چند جمله‌ای بدست آمده و در شکل ۴-۸، نشان داده شده است. مقدار  $R^2$  در این حالت برابر با ۰/۷۹ است. مطالعات محققین پیشین نیز نشان می‌دهد که ضریب همبستگی در پارامتر  $R_q$  کمتر از ۰/۹ است (Li and Zhang, 2015).

#### ۴-۲-۷- پارامتر MSV

پارامتر کمی دیگر که به عنوان پارامتر کمی تعیین زبری ارایه شده است MSV است (Tse and Cruden, 1979). رابطه بین MSV و JRC بر اساس داده‌های بررسی شده در این تحقیق در شکل ۴-۹، نشان داده شده است. رابطه ۴-۵، رابطه بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی این پارامتر با JRC برابر با ۰/۸۷ است.



شکل ۴-۹- رابطه بین MSV و JRC

$$JRC = 2.776\ln(MSV) + 6.5303, R^2 = 0.759 \quad (۴-۵)$$

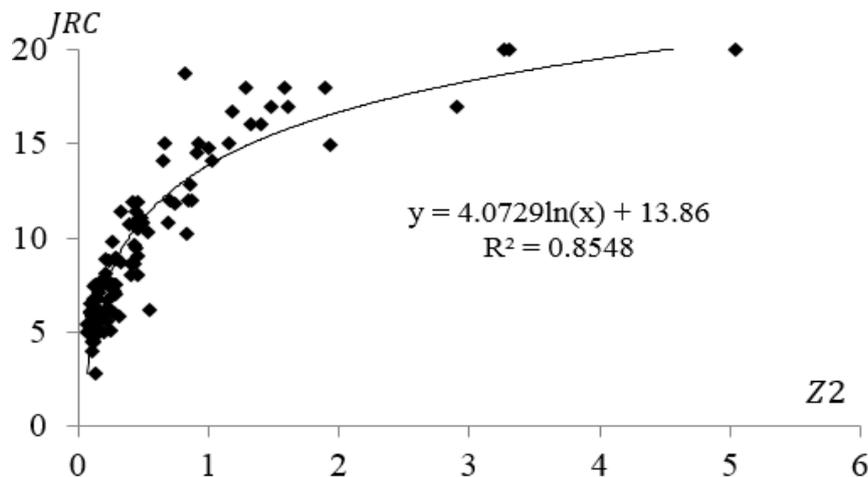
#### ۴-۲-۸- پارامتر Z<sub>2</sub>

یکی از پارامترهای مهم در تعیین زبری درزه که بر اساس مطالعات محققین پیشین از اعتبار بیشتری برخوردار است پارامتر Z<sub>2</sub> با عنوان ریشه میانگین مربعات مشتق اول مقطع درزه است (Tse and Cruden, 1979, Yu and Vayssade, 1991, Yang, 2001, Tatone and Graselli, 2001). این پارامتر اولین بار توسط میرز (۱۹۶۲) پیشنهاد شده است. در منابع تحقیقی، ۱۹ رابطه بین Z<sub>2</sub> و JRC ارایه شده که در جدول ۴-۲، نشان داده شده است (Li and Zhang, 2015).

جدول ۴-۲- روابط ارایه شده بین  $Z_2$  و JRC (Li and Zhang, 2015)

No.	Equation	R	Range <sup>b</sup>	Reference
1	$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2)$	0.986	0.1019-0.4210	Tse and Cruden
2	$JRC = -4.41 + 64.46 Z_2$	0.968	0.0684-0.3787	
3	$JRC = -5.05 + 1.20 \tan^{-1}(Z_2)$	0.973	0.0736-0.3814	
4	$JRC = 32.69 + 32.98 \log(Z_2)$	0.993	0.1020-0.4123	Yang et al.
5	$JRC = 60.32Z_2 - 4.51$	0.968	0.0748-0.4063	Yu and Vayssade
6	$JRC = 64.28 \tan(Z_2) - 5.06$	0.969	0.0768-0.317	
7	$JRC = 116.3(Z_2)^2 - 2.30$	0.929	0.1460-0.4379	
8	$JRC = 56.15 \sqrt{Z_2} - 16.99$	0.967	0.0916-0.4108	
9	$JRC = 28.10 \log(Z_2) + 28.43$	0.951	0.0973-0.5012	
10	$JRC = 61.79Z_2 - 3.47$	0.973	0.0562-0.3798	
11	$JRC = 65.18 \tan(Z_2) - 3.88$	0.975	0.0595-0.3512	
12	$JRC = 130.87(Z_2)^2 - 2.73$	0.934	0.1444-0.4168	
13	$JRC = 54.42 \sqrt{Z_2} - 14.83$	0.973	0.0743-0.4096	
14	$JRC = 25.57 \log(Z_2) + 28.06$	0.954	0.0799-0.4839	
15	$JRC = 64.22Z_2 - 2.31$	0.983	0.0360-0.3474	
16	$JRC = 66.86 \tan(Z_2) - 2.57$	0.983	0.0384-0.3256	
17	$JRC = 157(Z_2)^2 - 3.00$	0.945	0.1382-0.3827	
18	$JRC = 51.85(Z_2)^{0.60} - 10.37$	-	0.0684-0.4100	Tatone and Grassell
19	$JRC = 55.85(Z_2)^{0.74} - 6.10$	-	0.0512-0.3649	

ضریب همبستگی بین این دو پارامتر در این ۱۹ رابطه بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ متغیر بوده است. در مطالعات انجام شده توسط تسه و کرودن با توجه به اینکه ضریب همبستگی خوبی بین این پارامتر و ضریب زبری درزه بدست آمده است، از این پارامتر بیشتر در منابع و برآورد زبری درزه استفاده شده است هر چند طی مطالعات مشخص شد که این پارامتر به فواصل نمونه برداری حساس است (Li and Zhang, 2015). پارامتر  $Z_2$  در مطالعات آماری این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و شکل ۴-۱۰ رابطه بین  $Z_2$  و JRC را نشان می‌دهد. رابطه ۴-۶ رابطه لگاریتمی بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی در این مطالعه ۰/۹۳ بدست آمده است.



شکل ۴-۱۰- رابطه بین  $Z_2$  و JRC

$$JRC = 4.0729 \ln(Z_2) + 13.86, R^2 = 0.85$$

(۶-۴)

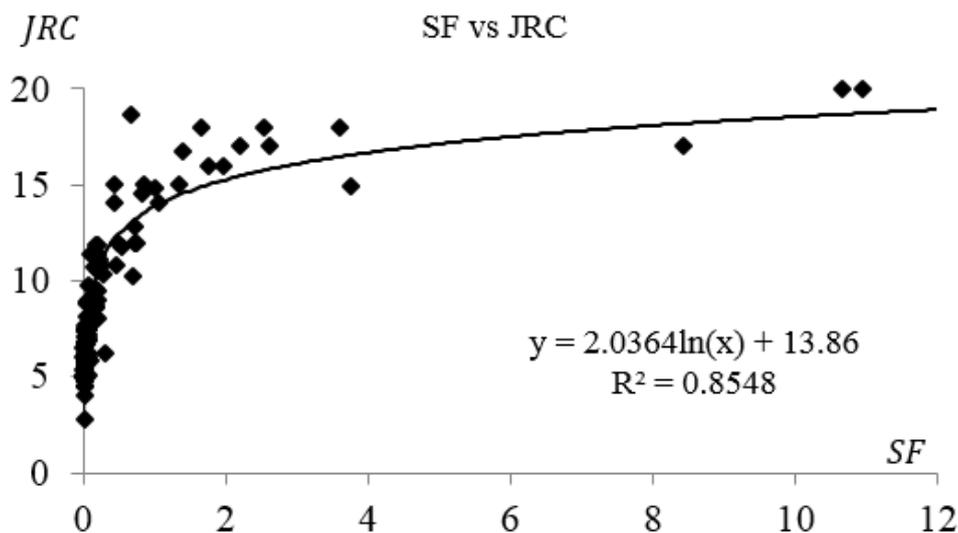
#### ۴-۲-۹- پارامتر SF

پارامتر SF به عنوان تابع ساختاری توسط سائلس و توماس (۱۹۷۹) ارایه شده است. این پارامتر نیز همانند پارامتر  $Z_2$  حساس به فواصل نمونه برداری بوده و ضریب همبستگی مناسبی در مطالعات محققین پیشین بین SF و JRC بدست آمده است. در روابط ارایه شده برای SF ضریب همبستگی بین دو پارامتر در بازه ۰/۹۱ تا ۰/۹۹ قرار می گیرد. این پارامتر نیز جزو پارامترهایی است که اخیراً در مطالعات زبری درزه سنگ بیشتر مورد استناد قرار می گیرد. در منابع تحقیق، ۸ رابطه بین SF و JRC ارایه شده که در جدول ۴-۳ ارایه داده شده است (Li and Zhang, 2015).

جدول ۴-۳- روابط ارایه شده بین SF و JRC (Li and Zhang, 2015)

No.	Equation	R	Range <sup>b</sup>	Reference
1	$JRC = 37.63 + 16.5 \log(SF)$	0.993	0.0052-0.0854	Yang et al.
2	$JRC = 2.69 + 245.70SF$	0.919	0-0.0705	Tse and Cruden
3	$JRC = 37.28 + 16.58 \log(SF)$	0.984	0.0056-0.0907	
4	$JRC = 239.27\sqrt{SF} - 4.51$	0.968	0.0004-0.0105	Yu and Vayssade
5	$JRC = 14.05 \log(SF) + 45.25$	0.951	0.0006-0.0160	
6	$JRC = 121.13\sqrt{SF} - 3.28$	0.972	0.0007-0.0369	
7	$JRC = 12.64 \log(SF) + 35.42$	0.954	0.0016-0.0603	
8	$JRC = 10.66 \log(SF) + 26.49$	0.950	0.0033-0.2461	

در مطالعه حاضر بر اساس جامعه آماری در اختیار، ضریب همبستگی بین SF و JRC برابر با ۰/۹۳ بدست آمده است. شکل ۴-۱۱ رابطه بین این دو پارامتر را نشان می دهد. همچنین رابطه ۴-۷، بیانگر رابطه لگاریتمی بین SF و JRC است.



شکل ۴-۱۱- رابطه بین SF و JRC

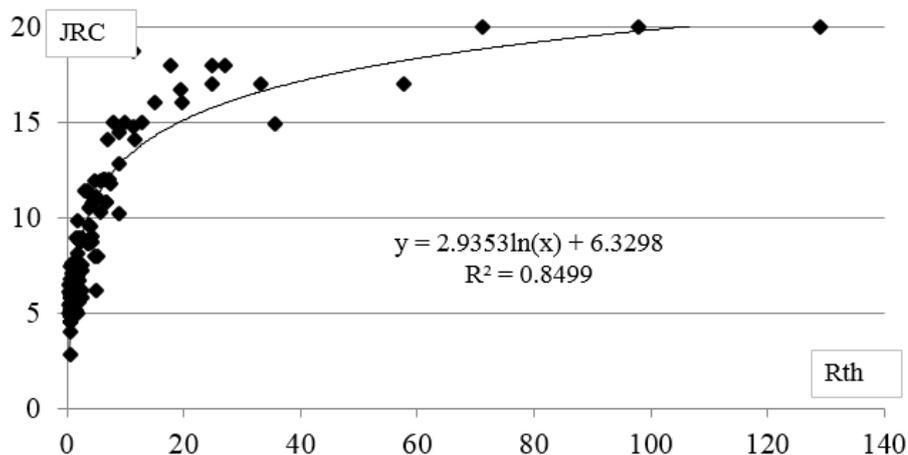
$$JRC = 2.0364\ln(SF) + 13.86, R^2 = 0.8548 \quad (۷-۴)$$

#### ۴-۲-۱۰- ارایه پارامتر جدید $R_{TH}$

در روابطی که برای پارامترهای کمی زبری درزه ارایه شده است، پارامترهایی که اختلاف ارتفاع دو نقطه مجاور سطح زبر درزه سنگ به عنوان پارامتر اصلی در رابطه آن استفاده می شود نسبت به سایر پارامترها دارای دقت بیشتری به لحاظ بیان زبری هستند. پارامترهای SF و  $Z_2$  از این گونه هستند. در این راستا پارامتر دیگری که در این تحقیق به عنوان پارامتر جدید ارایه می گردد، ریشه میانگین مربعات اختلاف ارتفاع نقاط است و به علامت  $R_{TH}$  معرفی شده است. این پارامتر به صورت رابطه ۴-۸، تعریف شده است.

$$R_{TH} = \text{RMS } \Delta H = \left[ \frac{1}{A} \int \Delta H^2 dA \right]^{0.5} \quad (۸-۴)$$

بر اساس رابطه ۴-۸، محاسبه پارامتر  $R_{TH}$  برای ۱۱۲ نمونه درزه سنگ صورت پذیرفته است و در نمودار شکل ۴-۱۲، همبستگی این پارامتر با JRC نشان داده شده است. رابطه ۴-۹ بیان گر رابطه بین JRC و  $R_{TH}$  است. ضریب همبستگی این پارامتر با ضریب زبری درزه برابر با ۰/۹۲ است.



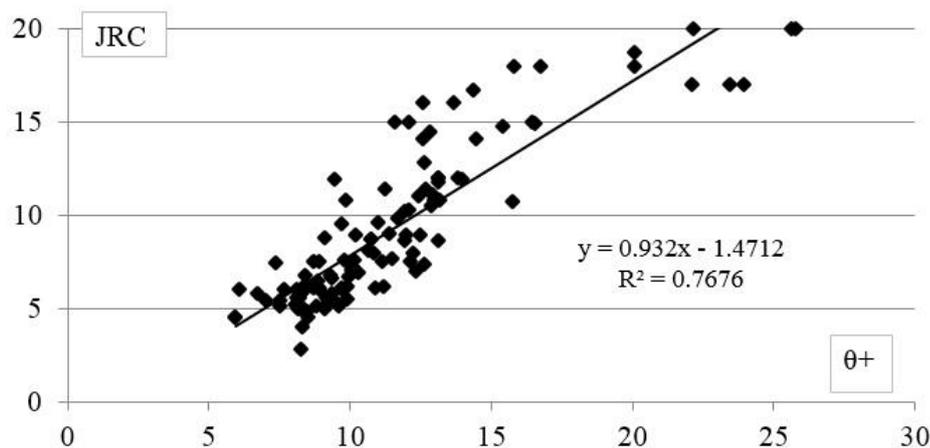
شکل ۴-۱۲- رابطه بین  $R_{TH}$  و JRC

$$JRC = 2.9353 \ln(R_{TH}) + 6.3298, R^2 = 0.85 \quad (۹-۴)$$

همبستگی خوبی در پارامتر پیشنهادی  $R_{TH}$  با ضریب زبری درزه همانند آنچه در پارامترهای SF و  $Z_2$  حاصل شد، بدست آمده است.

#### ۴-۲-۱۱- پارامتر زاویه میانگین درزه $\theta^+$

با توجه به اینکه زوایای سطوح درزه در مطالعات مقاومت برشی سطح درزه از اهمیت بالایی برخوردار است، پارامتر زاویه درزه یکی از پارامترهایی است که به عنوان پارامتر کمی تعیین زبری درزه استفاده می‌گردد. لازم به توضیح است که کمتر از پارامتر شیب در کمی‌سازی زبری درزه استفاده می‌شود و علت آن افزایش بیش از حد مقادیر شیب در محدوده‌هایی که سطح زبر به حالت قائم در می‌آید است. پارامتر زاویه میانگین درزه  $\theta^+$  در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته و افزایش میزان آن با افزایش مقادیر ضریب زبری درزه مطالعه شده است. با تقسیم‌بندی فواصل نمونه‌برداری در هر ۰/۴ میلی‌متر، اختلاف ارتفاع نقاط مجاور استخراج شده و زوایای سطوح ایجاد شده با شیب مثبت در نقاط مجاور درزه تعیین شده است. در شکل ۴-۱۳، ارتباط مقادیر  $\theta^+$  با JRC نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- رابطه بین  $\theta^+$  و JRC

ضریب همبستگی این پارامتر ۰/۸۷ بدست آمده است. رابطه خطی ۴-۱۰ رابطه بین JRC و  $\theta^+$  را نشان می‌دهد.

$$JRC = 0.932\theta^+ - 1.4712, R^2 = 0.77 \quad (۴-۱۰)$$

#### ۴-۳- بررسی کاستی‌های برآورد زبری

مطالعات کمی‌سازی سطح زبر درزه‌سنگ توسط ال‌سودانی، میرز، سایلز و توماس، یانگ، ونگ، بارتن و دیکوادرس<sup>۱</sup>، یو و وایساده، گراسلی و تاتون و تسه و کرودن، بر پایه داده‌های سطح زبر و به صورت روابط مختلف بین پارامتر کمی مورد نظر و ضریب زبری درزه ارائه شده است. پارامترهای تاثیرگذار در محتوی این روابط شامل اعمال ریاضی بر روی پارامترهایی همچون ارتفاع و شیب نقاط نمونه‌برداری و در روابط با اعتبار بیشتر از اعمال پارامترهای اختلاف ارتفاع بین نقاط نمونه‌برداری است. به عنوان مثال با مقادیر ثابتی از پارامتر CLA در بررسی آماری سطوح زبر مقادیر JRC متفاوتی بدست می‌آید. هم پارامترهای ساده همچون CLA و هم پارامترهایی با اهمیت بیشتر همچون  $Z_2$  و SF عموماً با افزایش مقادیر JRC افزایش می‌یابند اما این موضوع به معنای آن نیست که با مقدار ثابتی از پارامترهای مذکور همیشه محدوده ثابتی از ضریب زبری درزه بدست خواهد آمد. در واقع با استفاده از روابط ارائه شده توسط محققین همچنین روابط ارائه شده در این تحقیق (بر اساس مطالعات آماری تحقیق حاضر)

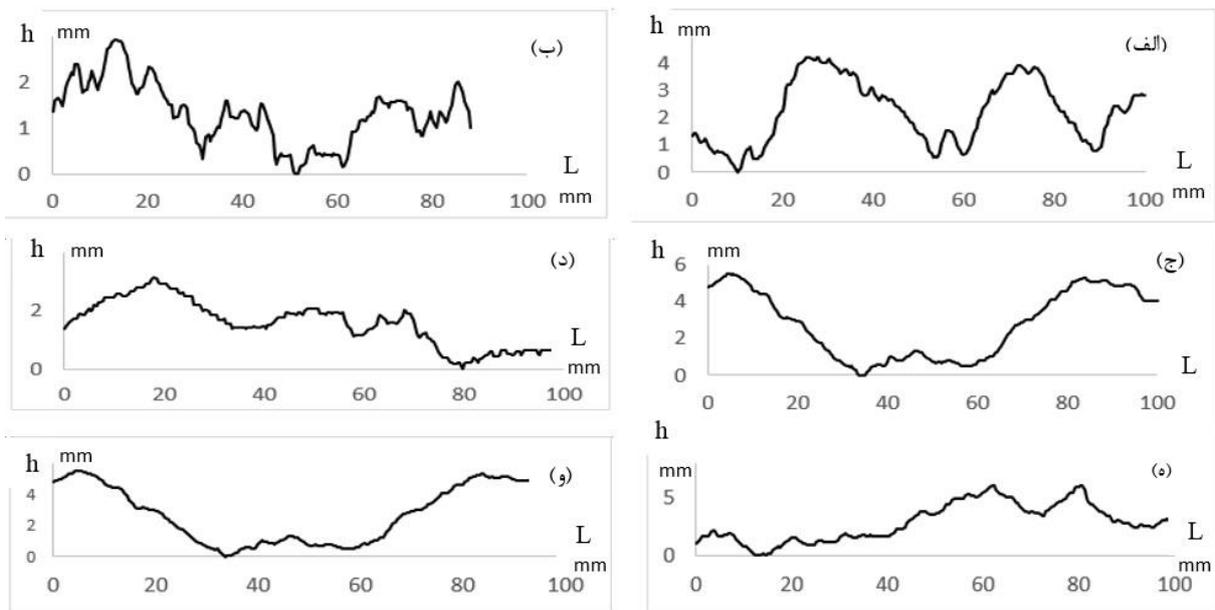
<sup>1</sup> De Quadros

همیشه بازه‌ای از خطا در برآورد ضریب زبری درزه وجود دارد. در خصوص برخی بازه‌های خطا در ادامه توضیح داده شده است.

نتایج حاصل از اشکال ۲-۴ تا ۱۳-۴ که بیان‌گر رابطه بین ضریب زبری درزه و پارامترهای کمی است، نشان می‌دهد که پراکندگی نتایج بین پارامترهای کمی همچون  $R_p$ ،  $R_q$ ،  $Z_2$ ،  $SF$ ،  $CLA$  و  $MSV$  با مقدار عددی  $JRC$  زیاد است. به عنوان مثال پراکندگی نتایج بدست آمده بین مقدار  $R_p$  و  $JRC$  نشان می‌دهد که در مقدار عددی  $R_p$  برابر با  $1/0.3$ ، ضریب زبری درزه مقادیری بین بازه ۷ تا ۱۶ حاصل می‌شود. البته این بازه در مقادیر دیگر این پارامتر دامنه کمتری را به خود اختصاص می‌دهد. پراکندگی نقاط بدست آمده بین مقدار عددی  $R_q$ ،  $SF$  و  $Z_2$  نیز پراکندگی محسوسی را نشان می‌دهد. به ازای  $R_q$  برابر با  $1/2$ ، مقدار عددی ضریب زبری درزه بین ۵ تا ۱۳ و به ازای  $Z_2$  برابر با  $0.5$ ، بازه مربوطه برای ضریب زبری درزه بین ۸ تا ۱۳ به دست می‌آید. گستره بازه به دست آمده برای پارامترهای مذکور، منجر به خطای محاسبات مقاومت برشی درزه می‌شود. با وجود این که روابط ارائه شده بین مقادیر پارامترهای کمی و  $JRC$  اغلب به صورت برازش بهترین خط بین نقاط پراکندگی حاصل شود، با این حال ضرایب همبستگی مطلوبی که بتواند خطاهای موجود را کاهش دهد، به دست نمی‌آید. بنابراین صرف استفاده از روابط بین پارامترهای کمی و ضریب زبری درزه نمی‌تواند تعریف صحیحی از وضعیت زبری درزه باشد. علت اصلی این موضوع، ضعف‌های ذاتی پارامترهای کمی موجود است. این پارامترها نمی‌توانند به طور هم‌زمان ارتفاع و شیب کلی سطح درزه، ارتفاع و شیب‌های موضعی سطح درزه، اختلاف ارتفاع نقاط سطح درزه، پله‌داری و وضعیت عمومی سطح درزه را بیان نمایند.

در ادامه برخی دیگر از نمونه‌های نقض و معایب پارامترهای کمی تعیین زبری در این تحقیق بررسی شده که تعدادی از این نمونه‌ها ارائه می‌شود. برای دو سطح ارائه شده در شکل ۴-۱۴ (الف و ب)، مقدار پارامتر  $Z_2$ ، برابر با  $0.32$  بدست می‌آید. در این شکل،  $L$  در محور طولی معرف طول درزه و  $h$  در محور عرضی نمودار، معرف ارتفاع درزه است. بر اساس رابطه تسه و کروندن، مقدار  $JRC$  برای دو سطح مذکور به ترتیب مقادیر عددی  $10/7$  و  $15$  بدست می‌آید. برای دو سطح ارائه شده در شکل ۴-۱۴ (ج و د)

مقدار عددی SF برابر با ۰/۰۴۴ بدست آمده است که بر اساس رابطه ارائه شده توسط یو و وایساده مقدار JRC برای دو سطح ۵/۸ و ۱۰/۸ حاصل شده است. به عنوان نمونه دیگر، پارامتر Rq برای دو سطح شکل ۴-۱۴ (ه، و) برابر با ۲/۱ بدست آمده است که نتایج متناظر عددی زبری درزه برای دو سطح برابر با ۱۰/۸ و ۱۶/۷ حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بازه تغییراتی که می‌تواند در نتایج منجر به مقاومت برشی درزه تاثیرگذار باشد، زیاد است.



شکل ۴-۱۴- برخی نمونه‌های نقص در پارامترهای کمی تعیین زبری همچون  $Z_2$ , SF و  $R_q$

علت نقص موجود در روابط، عدم امکان لحاظ کردن ترکیبی از پارامترهایی همچون ارتفاع کلی هندسه درزه، شیب عمومی هندسه درزه، تعداد دندانها و ... است. در مورد علت نقص رابطه بر اساس پارامتر  $Z_2$  می‌توان گفت که این پارامتر نمی‌تواند گویای روند شیب و تعداد دندانهای نمونه‌های واقعی باشد. بلکه فقط به میزان اختلاف ارتفاع دو نقطه کنار هم بستگی دارد و به صورت نسبی ارتفاع را در نظر می‌گیرد ولی در کل با ارتفاع نمونه ارتباط مستقیمی ندارد. بنابراین این پارامتر نمی‌تواند ارتفاع و شیب و دندانها را به طور کامل بیان کند. پارامتر SF همانند  $Z_2$  به اختلاف ارتفاع بستگی دارد و ارتفاع کل در این پارامتر دیده نمی‌شود. بنابراین این پارامتر نیز تعداد دندانها و لزوماً ارتفاع کلی سطح را در نظر

نمی‌گیرد. از این رو در این مطالعه تاثیر شکل (که متشکل از وضعیت شیب عمومی و تعداد دندانه‌ها می‌باشد) و ارتفاع کلی زبری سطح درزه‌سنگ در برآورد مقادیر JRC لحاظ و بررسی خواهد شد.

#### ۴-۴- بررسی هندسه سطح درزه‌سنگ

انتخاب یک معیار کلی برای تعیین مقاومت برشی درزه سنگ موضوعی است که طی چند دهه اخیر بسیار مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. مهم‌ترین مساله این است که چگونه زبری درزه‌سنگ اندازه‌گیری شود و در قالب یک عدد (به عنوان مثال ضریب زبری درزه) یا یک عبارت ریاضی بیان شود به طوری که معرفی کننده مورفولوژی سطح درزه‌سنگ باشد (Grasselli et al. 2002). در این مطالعه، بر اساس یک جامعه آماری گسترده از سطوح درزه سنگ شامل سطوح مختصاتی برداشت شده طی این تحقیق (با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه) و سطوح حاوی مختصات گردآوری شده از منابع مختلف، نسبت به بررسی مشخصات هندسی سطح درزه‌سنگ در قالب نمونه‌های ۱۰ سانتی‌متری اقدام شده است. هدف از بررسی اشکال هندسی درزه‌سنگ، استخراج شکل‌های غالب تشکیل‌دهنده سطح درزه بوده تا بتوان پس از دستیابی به این اشکال، نسبت به مشخصه‌دهی این اشکال اقدام نمود. برای رسیدن به این هدف، تمامی نمونه‌های سطح درزه‌سنگ (شامل ۲۰۳ نمونه) مورد بررسی قرار گرفته و شکل‌های مشابه هر نمونه ترسیم شده است. در این مطالعه آماری، اشکال مختلفی در تطبیق سطوح درزه به یک شکل استخراج شده‌اند که در ادامه به برخی از موارد تطبیق داده شده اشاره می‌شود.

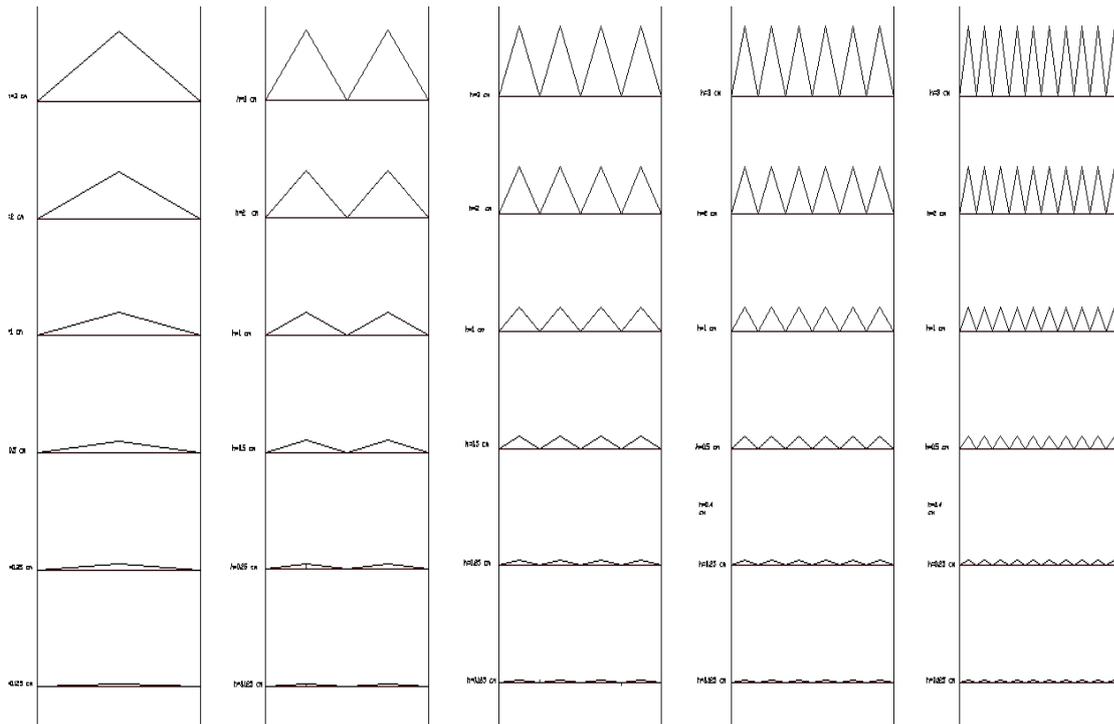
نتایج مطالعات در خصوص پارامترهای کمی تعیین زبری درزه‌سنگ، نشان‌گر این است که تنها یک پارامتر آماری برای کمی‌سازی زبری سطح درزه کافی نیست و لازم است پارامترهای بیشتری (خصوصیات هندسی زبری) در برآورد زبری وارد شوند. با وجود این که محققین روابط مختلفی بین پارامترهای عنوان شده و ضریب زبری درزه ارائه نموده‌اند با این حال ذاتاً این پارامترها نمی‌توانند خصوصیات زبر سطح درزه را به صورت کامل ارائه نمایند. با بررسی روابط این پارامترها مشخص می‌شود که به ازای مقادیر ثابتی از این پارامترها، ضریب زبری درزه متغیری گاه تا دو برابر مقدار کمینه بدست آمده است. این تغییرات بیان‌گر این است که پارامترهای تعریف شده به دلیل ضعف ذاتی در بیان زبری

درزه نمی‌توانند مبین مقدار زبری واقعی درزه باشند. در این تحقیق، فرایند زبر برای دستیابی به اشکال هندسی معرف (مدل هندسی معرف) صورت پذیرفته است:

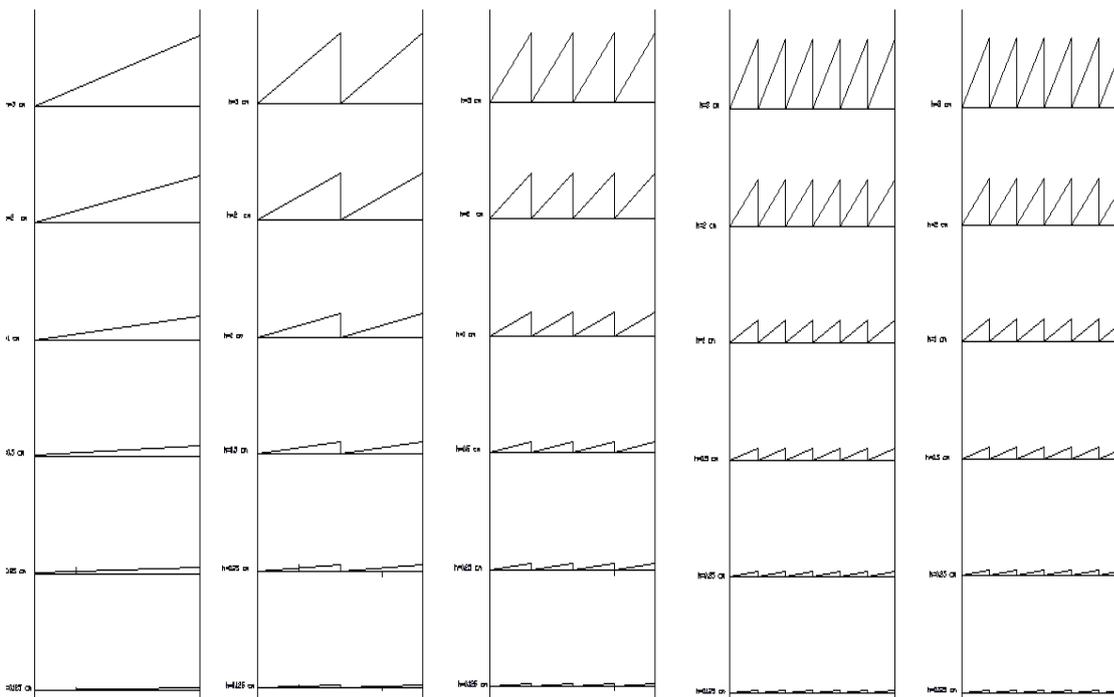
- بررسی آماری اشکال سطوح زبر درزه‌سنگ
- تعریف اشکال هندسی معرف بر اساس مطالعات آماری اشکال
- استفاده از پارامترهای کلی همچون شیب کلی، ارتفاع کلی و تعداد دندان‌های اشکال هندسی و پارامترهای کمی تعیین زبری برای اولویت‌دهی اشکال از نظر میزان زبری

#### ۴-۴-۱- اشکال هندسی منطبق بر نمونه‌های زبر درزه‌سنگ

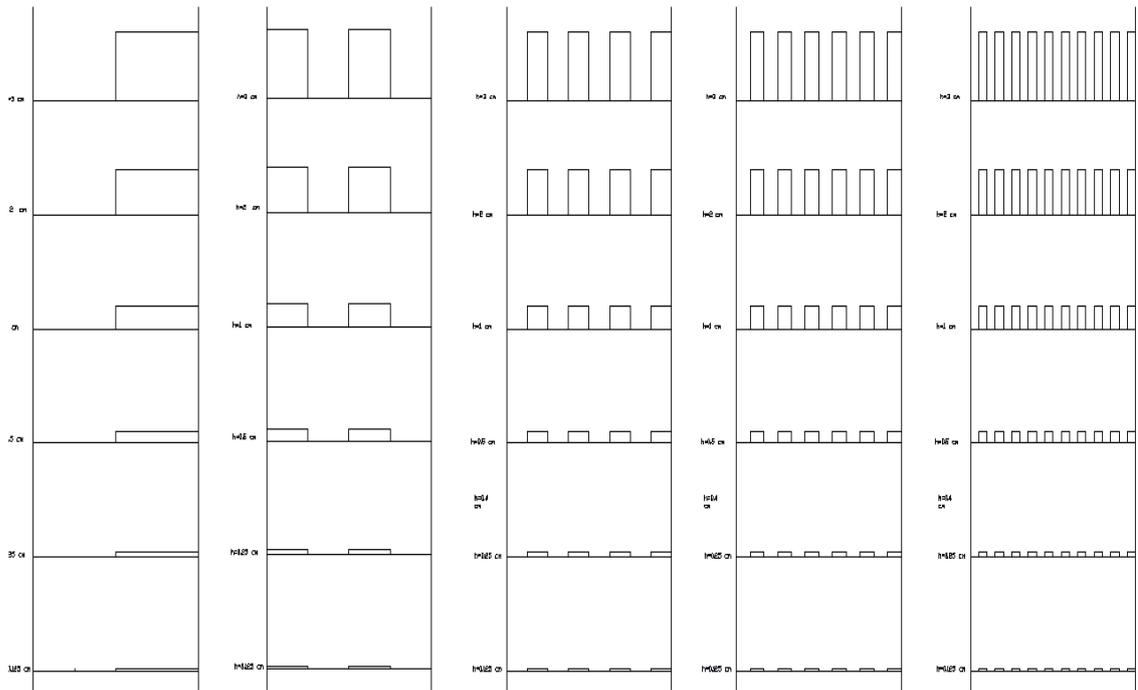
در این تحقیق در اولین قدم، بررسی لازم بر روی نمونه‌های سطح درزه‌سنگ صورت پذیرفته است و شکل‌هایی بر روی نمونه‌های درزه‌سنگ منطبق شده است. از طرفی برای دستیابی به چیدمان مناسب از اشکال هندسی به نوعی که بتوان ترتیب و توالی برای آن قائل شد، یک الگوریتم برای شکل‌های هندسی فرض شده است. در این الگوریتم، در شکل‌های هندسی که مدل‌های هندسی معرف نامیده می‌شوند، شیب سطح ناپیوستگی و تعداد دندان‌ها افزایش می‌یابد و شکل دندان‌ها از مثلثی به مستطیلی تغییر پیدا می‌کند. علاوه بر نوع شکل هندسی درزه‌سنگ برای پوشش ارتفاع‌های مختلف سطوح درزه، برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف، شش ارتفاع در بازه صفر تا ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱۵، مدل هندسی دندان‌های مثلثی را با تعداد دندان‌های مختلف و با ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش تعداد دندان‌ها، شیب سطوح درزه‌سنگ به تدریج افزایش می‌یابد. در ادامه، در شکل ۴-۱۶، مدل هندسی دندان‌های مثلثی یک‌طرفه با تعداد دندان‌های مختلف و با ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. در این مدل هندسی نیز با افزایش تعداد دندان‌ها، شیب سطوح درزه‌سنگ به تدریج افزایش می‌یابد. شکل ۴-۱۷، مدل هندسی دندان‌های مربعی و شکل ۴-۱۸، مدل هندسی با اشکال خاص (دندان‌های ترکیبی) را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در اشکال ۴-۱۵ تا ۴-۱۸، برای نمایش بهتر مدل‌ها، ارتفاع مدل‌های هندسی به صورت شماتیک نشان داده شده و در واقعیت نسبت ارتفاع به طول کمتر از ۰/۱۵ است.



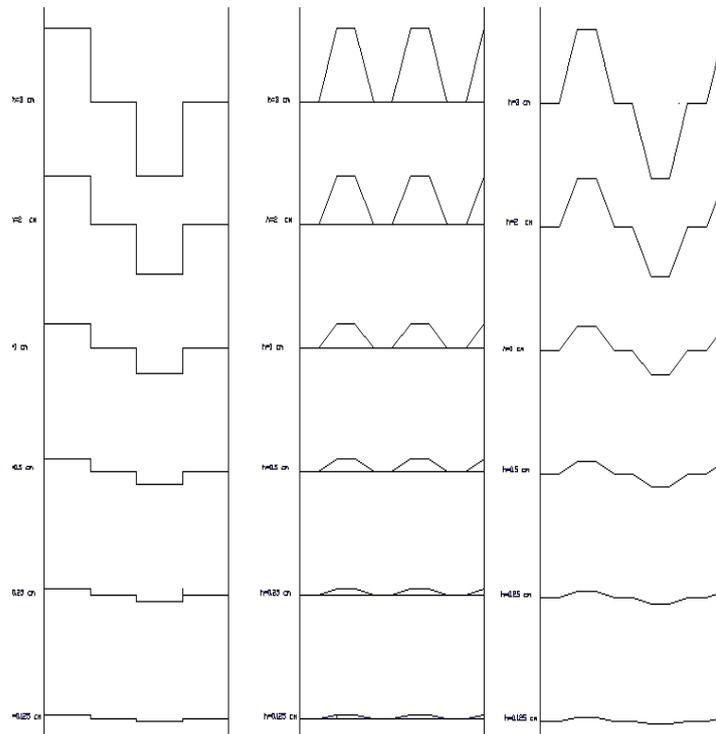
شکل ۴-۱۵- مدل هندسی دندانه مثلثی (افزایش شیب، تعداد دندانه و ارتفاع بیشینه در این مدل هندسی لحاظ شده است)



شکل ۴-۱۶- مدل هندسی دندانه مثلثی یک طرفه



شکل ۴-۱۷- مدل هندسی دندانه مستطیلی



شکل ۴-۱۸- مدل هندسی اشکال خاص (دندانه ترکیبی)

مدل‌های هندسی تعریف شده در اشکال ۴-۱۵ تا ۴-۱۸، با نمونه‌های سطوح زیر درزه سنگ (شامل ۲۰۳ نمونه) تطبیق داده شده است. به عنوان مثال، در اشکال ۴-۱۹ تا ۴-۲۳، تطبیق برخی نمونه‌های سطح

درزه‌سنگ به مدل‌های هندسی معرف، ارایه شده است. لازم به توضیح است با توجه به جامعه آماری تحقیق حاضر، در برخی از مدل‌های هندسی معرف تعداد نمونه‌های محدودی برای انطباق با سطوح درزه‌سنگ پیدا شده است (به عنوان مثال مدل هندسی ردیف ۲۰ در شکل ۴-۲۳).

ردیف	مدل هندسی معرف	نمونه‌هایی از درزه سنگ زبر					تعداد نمونه های تطابق یافته
۱							۱۰
۲							۱۲
۳							۷
۴							۹

شکل ۴-۱۹- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۱ تا ۴

ردیف	مدل هندسی معرف	نمونه‌هایی از درزه سنگ زبر					تعداد نمونه های تطابق یافته
۵							۷
۶							۶
۷							۵
۸							۶

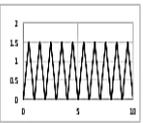
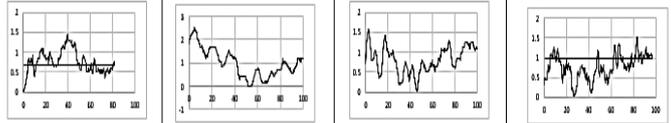
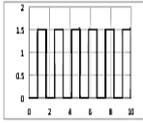
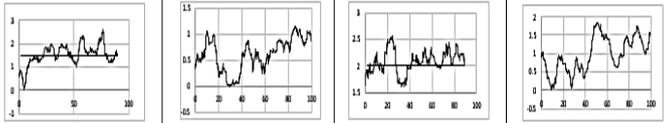
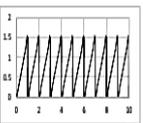
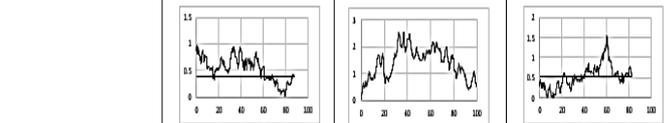
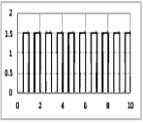
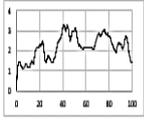
شکل ۴-۲۰- تطابق برخی سطوح هندسه درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف ۵ تا ۸

ردیف	مدل هندسی معرف	نمونه هایی از درزه سنگ زبر				تعداد نمونه های تطابق یافته
۹						۴
۱۰						۴
۱۱						۷
۱۲						۳

شکل ۴-۲۱- تطابق برخی سطوح هندسه درزه سنگ با مدل های هندسی معرف ۹ تا ۱۲

ردیف	مدل هندسی معرف	نمونه هایی از درزه سنگ زبر				تعداد نمونه های تطابق یافته
۱۳						۴
۱۴						۸
۱۵						۴
۱۶						۴

شکل ۴-۲۲- تطابق برخی سطوح هندسه درزه سنگ با مدل های هندسی معرف ۱۳ تا ۱۶

ردیف	مدل هندسی معرف	نمونه هایی از درزه سنگ زیر	تعداد نمونه های تطبیق یافته
۱۷			۴
۱۸			۴
۱۹			۳
۲۰			۱

شکل ۴-۲۳- تطابق برخی سطوح هندسه درزه سنگ با مدل های هندسی معرف ۱۷ تا ۲۰

برای تطبیق نمونه های درزه سنگ با بهترین گزینه از بین مدل های هندسی معرف، انحراف معیار اختلاف ارتفاع نمونه ها با مدل های هندسی، مورد بررسی قرار گرفته است. در نمونه هایی که احتمال انطباق یک نمونه درزه سنگ با دو مدل هندسی معرف وجود داشته، انحراف معیار برای هر دو مدل محاسبه شده و مدل هندسی معرفی که دارای کمترین انحراف معیار بوده است به عنوان مدل مدنظر انتخاب شده است.

#### ۴-۵- جمع بندی

با بررسی پارامترهای کمی تعیین زبری درزه نتایج زیر بدست آمده است:

- نتایج حاصل از اشکال ۴-۲ تا ۴-۱۳ که بیان گر رابطه بین ضریب زبری درزه و پارامترهای کمی هستند، نشان می دهد که پراکندگی نتایج بین پارامترهای کمی همچون  $R_p$ ،  $R_q$ ،  $Z_2$ ،  $SF$ ،  $CLA$  و  $MSV$  با مقدار عددی  $JRC$  زیاد است.
- با وجود این که روابط ارایه شده بین مقادیر پارامترهای کمی و  $JRC$  اغلب به صورت برازش بهترین خط بین نقاط پراکندگی حاصل شود، با این حال ضرایب همبستگی مطلوبی که بتواند خطاهای موجود را کاهش دهد، به دست نمی آید. بنابراین صرف استفاده از روابط بین

- پارامترهای کمی و ضریب زبری درزه نمی‌تواند تعریف صحیحی از وضعیت زبری درزه باشد. علت اصلی این موضوع، ضعف‌های ذاتی پارامترهای کمی موجود است.
- ترتیب پارامترهای کمی تعیین زبری درزه با توجه به نتایج بدست آمده بر حسب ضریب همبستگی با JRC، از ضریب همبستگی کم تا زیاد به صورت  $CLA, MSV, R_q, K, \delta, a/L, R_p, R_{TH}, Z_2$  و SF است.
  - پارامترهایی که در روابط آنها، یکی از عناصر اصلی تشکیل دهنده اختلاف ارتفاع ( $\Delta H$ ) دو نقطه مجاور درزه‌سنگ باشد، همبستگی بیشتری با ضریب زبری درزه دارند.
  - با وجود اینکه تمامی پارامترهای کمی ارایه شده به طور کلی با افزایش میزان JRC روند افزایشی از خود نشان می‌دهند (گاهی این موضوع تایید نمی‌شود). اما این موضوع نمی‌تواند موید این باشد که همبستگی بسیار خوبی بین پارامترها و ضریب زبری درزه وجود دارد.
  - علت اصلی عدم همبستگی مناسب پارامترهای کمی زبری با ضریب زبری درزه، عدم در نظرگیری مناسب هندسه سطح زبر درزه‌سنگ موثر در مقاومت برشی درزه‌سنگ است.
  - طی انجام مراحل این تحقیق یک پارامتر کمی دیگر با عنوان  $R_{TH}$  پیشنهاد شده است که به لحاظ ضریب همبستگی با JRC وضعیت مناسب و مشابه پارامترهای معروف همچون  $Z_2$  و SF دارد.
  - با بررسی اشکال هندسی درزه نمونه‌های سنگی، مدل‌های متفاوتی از اشکال با هندسه دندانه مثلثی، دندانه مستطیلی و دندانه ترکیبی (مثلثی و مستطیلی) پیشنهاد شده است که در نهایت منجر به مدل‌های هندسی معرفی می‌شود.

## فصل پنجم:

برآورد زبری درزه سنگ و ارایه  
طبقه بندی جدید

## ۵-۱- مقدمه

در فصل پیش، روش های برآورد کمی زبری درزه سنگ به همراه نقاط ضعف آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پارامترهایی همچون SF و  $Z_2$  جزو پارامترهایی هستند که نسبت به سایر پارامترهای کمی زبری درزه همبستگی بهتری با JRC دارند. همچنین در فصل پیشین، مدل های هندسی معرف درزه سنگ تعریف شده اند. در این فصل اشکال هندسی تعریف شده به کمک پارامترهای کلی همچون شیب، ارتفاع و تعداد دندانها همچنین به کمک پارامترهای کمی زبری درزه اولویت دهی می شوند و به عنوان عملگرهای هندسی، برای برآورد زبری درزه سنگ استفاده می شوند.

در این فصل، دو روش به منظور برآورد ضریب زبری درزه معرفی، بررسی و نتایج آن ارائه شده است.

- روش اول (عملگر شکل) برگرفته از مدل های هندسی معرف بوده که با استفاده از این روش کاربر می تواند با رجوع به شکل هندسی درزه و در اختیار داشتن برخی پارامترهای کمی، به عدد زبری درزه دست یابد.

- در روش دوم، یک طبقه بندی جدید به منظور برآورد زبری درزه سنگ به روشی منحصر به فرد ارائه شده است.

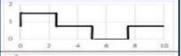
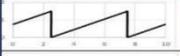
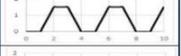
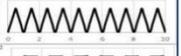
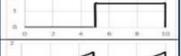
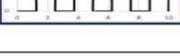
## ۵-۲- تعیین زبری درزه سنگ با استفاده از عملگر شکل

در این روش از عملگر شکل، حاصل از مطالعه آماری انجام شده برای اشکال هندسی درزه سنگ (مدل های هندسی معرف) به منظور برآورد زبری درزه استفاده شده است. هدف از ارائه این روش دخیل نمودن عامل شکل به همراه برخی پارامترهای کمی برای دستیابی به مقدار صحیحی از ضریب زبری درزه است.

### ۵-۲-۱- مدل های هندسی معرف

منظور از مدل ها یا شکل های هندسی معرف، انواع شکل های هندسی از هندسه زبری سطح است که بتواند معرف یا جایگزین سطوح برداشت شده درزه سنگ باشد. همان طور که توضیح داده شد، به دلیل وجود برخی از ضعفها در پارامترهای زبری موجود و عدم امکان تعریف جامعی از زبری، در این بخش

از تحقیق شکل‌های هندسی محتمل در سطوح زبر درزه مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های هندسی زبری معرف بر این اساس ارائه شده‌اند. برای ارائه مدل‌های هندسی معرف چهار روند بررسی مورد استناد قرار گرفته است. اول، استفاده از پارامترهای کلی همچون مقادیر شیب عمومی، ارتفاع کلی و تعداد دندانها است که در مدل‌های هندسی معرف برای دستیابی به روند افزایشی در مقادیر زبری، مقادیر این عوامل نیز افزایش یافته است. دوم، بررسی روند افزایش ناهمواری (زبری) مدل‌های هندسی معرف با استفاده از پارامترهای زبری موجود (همچون  $SF$ ،  $Z_2$ ،  $Rq$  و  $Rp$ ) که پارامترهای عنوان شده جزو معتبرترین پارامترهای ارائه شده برای برآورد کمی زبری درزه سنگ هستند، سوم، اعتبارسنجی روند افزایش زبری مدل‌های هندسی معرف با استفاده از مقادیر ضریب زبری سطوح زبر واقعی است و در نهایت برای ارائه مدل‌های هندسی معرف، شکل سطوح زبر واقعی که نتایج ضریب زبری آنها تحت آزمایش برش برآورد شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های ۲۰ گانه هندسی معرف در شکل ۵-۱، ارائه شده‌اند.

ردیف	مدل هندسی	ردیف	مدل هندسی	ردیف	مدل هندسی	ردیف	مدل هندسی
۱		۶		۱۱		۱۶	
۲		۷		۱۲		۱۷	
۳		۸		۱۳		۱۸	
۴		۹		۱۴		۱۹	
۵		۱۰		۱۵		۲۰	

شکل ۵-۱- مدل‌های هندسی معرف سطح زبر

مدل‌های هندسی معرف برای طول ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. برای هر کدام از مدل‌های ارائه شده، شش ارتفاع کلی (پارامتر  $K$ ) در نظر گرفته شده است. مقادیر ارتفاع کلی در هر یک از مدل‌ها ۰/۰۶۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تعریف شده است. ارتفاع بیشینه (یعنی ۱/۵ سانتی‌متر) بر اساس برداشت‌های انجام شده و نتایج مطالعات محققین پیشین بوده و مقادیر ارتفاعی کمتر برای پوشش توزیع ارتفاعی نمونه‌های درزه سنگ تعیین شده است. با توجه به شکل ۵-۱، مقادیر شیب‌ها و

تعداد دندانها از مدل اول تا مدل بیستم رو به افزایش است. با در نظر گرفتن شش ارتفاع برای هر مدل، به این ترتیب ۱۲۰ مدل هندسی معرف برای پوشش شکل‌های هندسی محتمل در طول ۱۰ سانتی‌متری نمونه‌های درزه‌سنگ انتخاب شده است.

در مرحله بعد اشکال هندسی معرف با نمونه‌های سطوح درزه واقعی تطبیق داده شده است. برای این منظور، نسبت به گردآوری داده‌های زبر سطوحی که توسط محققین مختلف تحت آزمایش برش قرار گرفته بودند، اقدام شده است. با مد نظر قرار دادن طول مدل‌های هندسی معرف (۱۰ سانتی‌متر)، اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از نمونه‌های زبر واقعی که تاکنون تحت برش قرار گرفته و نتایج عدد زبری آنها توسط محققین مختلف استخراج شده است، میسر خواهد شد. نمونه‌های واقعی سطح زبر درزه‌سنگ، استخراج شده توسط بارتن و چوبی برای بررسی مقاومت برشی درزه‌سنگ، مطالعات آزمایشگاهی باندیس به منظور بررسی تاثیر مقیاس در مقاومت برشی و تغییر شکل درزه‌سنگ، مطالعات انجام شده توسط بارتن و باندیس و مطالعات آزمایشگاهی گراسلی<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) که مجموعاً ۱۱۲ نمونه را تشکیل می‌دادند، مبنای بررسی مدل‌های هندسی معرف در این تحقیق قرار گرفته است (Grasselli, 2001, Barton, 1973, Barton and Chouby, 1977).

علاوه بر این، به منظور بررسی آماری شکل مدل‌های هندسی معرف، از ۹۱ نمونه زبر درزه‌سنگ که طی این تحقیق از سنگ‌های آذرین و رسوبی برداشت شده، استفاده شده است. طول درزه‌سنگ مورد مطالعه طی برداشت‌های صحرائی در اندازه‌های ۱۰ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفته است. سطوح نمونه‌های درزه‌سنگ با استفاده از دوربین عکاسی و به روش فتوگرامتری برد کوتاه برداشت شده است. پس از ایجاد شبکه فتوگرامتری برد کوتاه نسبت به ایجاد مقاطع دوبعدی از سطح درزه‌سنگ اقدام نموده و در نهایت مختصات درزه استخراج شده و شکل سطح درزه مورد مطالعه قرار گرفته است.

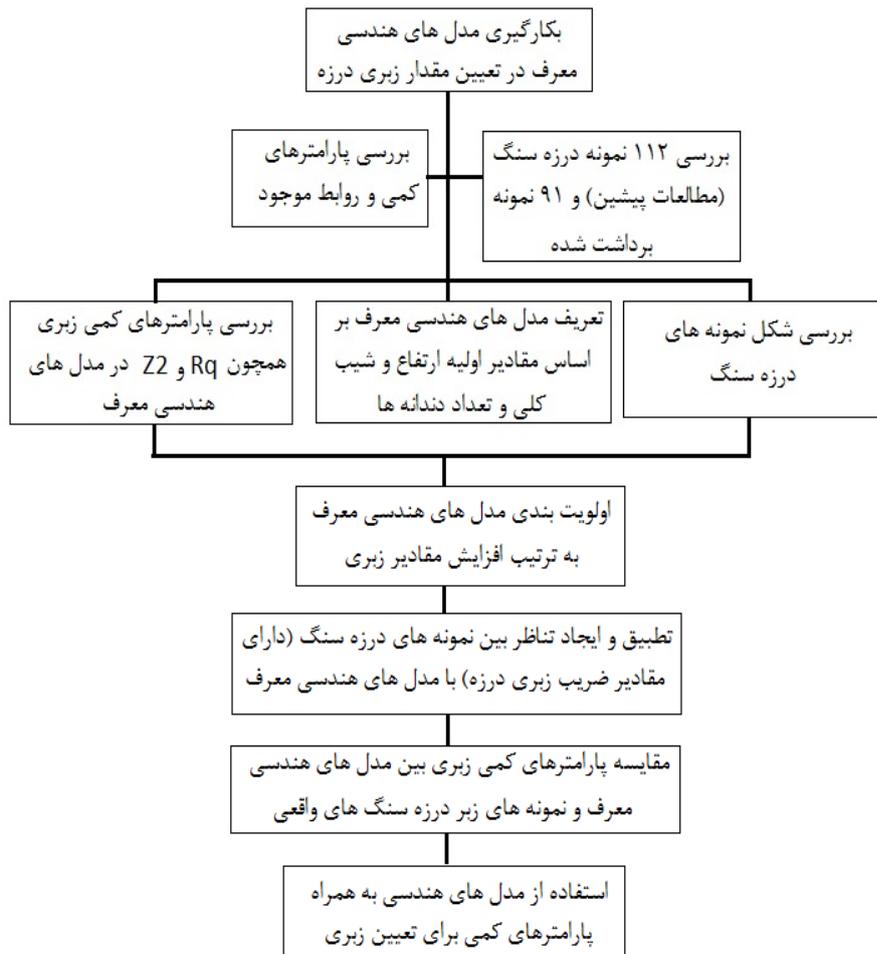
---

<sup>1</sup> Grasselli

با بررسی انجام شده در مورد مقاطع زبر درزه‌سنگ، متشکل از ۱۱۲ نمونه درزه‌سنگ (ارائه شده توسط محققین پیشین) و ۹۱ نمونه درزه‌سنگ (برداشت شده طی این تحقیق) مشخص شد که ۱۹۵ نمونه درزه‌سنگ برداشت شده از مجموع ۲۰۳ نمونه درزه‌سنگ ۹۶ درصد از مدل‌های هندسی معرف ارائه شده تبعیت می‌نمایند.

#### ۵-۲-۲- مراحل انجام کار (مدل عملگر شکل)

در این تحقیق، ابتدا با توجه به شکل‌های هندسی موجود در سطوح درزه‌سنگ نسبت به تعریف مدل‌های هندسی معرف اقدام شده است. مدل‌های هندسی معرف بر اساس میزان شیب و ارتفاع کلی و تعداد دندانه‌های موجود از مقادیر کم تا مقادیر بیشتر مرتب شده‌اند. از پارامترهای کمی تعیین زبری همچون پارامترهای  $Z_2$ ،  $SF$ ،  $R_p$  و  $R_q$  برای تعیین مقادیر زبری و اولویت‌بندی مدل‌های هندسی معرف استفاده شده است. لازم به ذکر است، پارامترهای کمی عنوان شده در مقایسه با سایر پارامترهای کمی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. برای اعتبارسنجی مدل، مدل‌های هندسی معرف با نمونه‌های گردآوری شده از سطح زبر که مقادیر ضریب زبری درزه (JRC) آن‌ها مشخص است، تطبیق داده شده است. به عبارت دیگر، نمونه‌های سطح زبر مذکور به لحاظ شکل هندسی به ۲۰ مدل هندسی معرف انطباق داده شده است. در نتیجه برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف، چند نمونه سطح زبر واقعی تطبیق داده شده است. پارامترهای کمی به دست آمده از نمونه‌های زبر واقعی با پارامترهای کمی حاصل از مدل‌های هندسی معرف مقایسه شده‌اند. با توجه به انطباق ایجاد شده بین مدل‌های معرف و نمونه‌های زبر واقعی، از مقادیر ضریب زبری درزه مربوط به نمونه‌های واقعی برای ارزیابی روابط بین مدل‌های هندسی معرف و ضریب زبری درزه (JRC) استفاده شده است. از این رو، با استفاده از روش تحلیلی و بررسی آماری داده‌های موجود و برداشت شده از سطوح زبر و با اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده با مقادیر ضریب زبری درزه از پارامترهای کمی و شکل هندسی سطوح درزه تعیین عدد زبری استفاده شده است. در شکل ۵-۲، مراحل انجام کار در قالب یک روندنما ارائه شده است.



شکل ۵-۲- روندنمای مراحل انجام کار (استفاده از عملگرهای شکل)

### ۵-۲-۳- اولویت بندی مدل های هندسی معرف

برای امکان لحاظ کردن تاثیر شکل سطح زیر درزه سنگ، ارتفاع کلی سطوح به همراه پارامترهای کمی، ۲۰ مدل هندسی معرف تعریف شده است. به منظور بررسی وضعیت اولویت مدل های هندسی نسبت به همدیگر از پارامترهای کمی نیز استفاده شده است. پارامترهای کمی زبری، برای شش ارتفاع کلی مختلف این مدل ها تعیین شده اند. شش ارتفاع کلی مورد نظر بر اساس جامعه آماری بیشینه ارتفاع نمونه های گردآوری شده و به منظور اعتبارسنجی بهتر مدل های هندسی معرف انتخاب شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع های مختلف برای هر یک از مدل های هندسی معرف، این مدل ها تقریباً اکثریت شکل های موجود در سطح درزه های سنگی در مقیاس اندازه گیری نمونه های با طول ۱۰ سانتی متری را

پوشش می‌دهند. در مدل‌های هندسی معرف از بالا به پایین شیب سطح ناپیوستگی و تعداد دندانها افزایش می‌یابد و شکل دندانها از مثلثی به مستطیلی تغییر پیدا می‌کند.

برای بررسی صحت افزایش روند زبری در مدل‌های ۲۰ گانه هندسه معرف، از پارامترهای کمی زبری همچون  $Rq$ ,  $Rp$ ,  $Z_2$  و  $SF$  استفاده شده است. روند افزایش مقادیر زبری مدل‌های هندسی معرف توسط پارامترهای مذکور تایید می‌شود. به عبارت دیگر مقادیر پارامترهای  $Rq$ ,  $Rp$ ,  $Z_2$  و  $SF$  برای هر کدام از هندسه‌های معرف محاسبه شده و بر اساس مقادیر افزایش این پارامترها، ترتیب افزایش ناهمواری‌ها (زبری) مدل‌های هندسی معرف، مشخص شده است. هر یک از پارامترهای کمی تعیین زبری، ترتیب و توالی خاصی از مدل‌های هندسی معرف را نشان می‌دهند. به عنوان مثال ترتیب مدل‌های هندسی برای پارامترهای  $SF$  و  $Z_2$  در شکل ۳-۵ و در پارامترهای  $Rq$  و  $Rp$  در شکل ۴-۵، نشان داده شده است. همین ترتیب با جزئی تغییرات در مورد سایر پارامترهای کمی مورد بحث در این تحقیق نیز رعایت شده است.

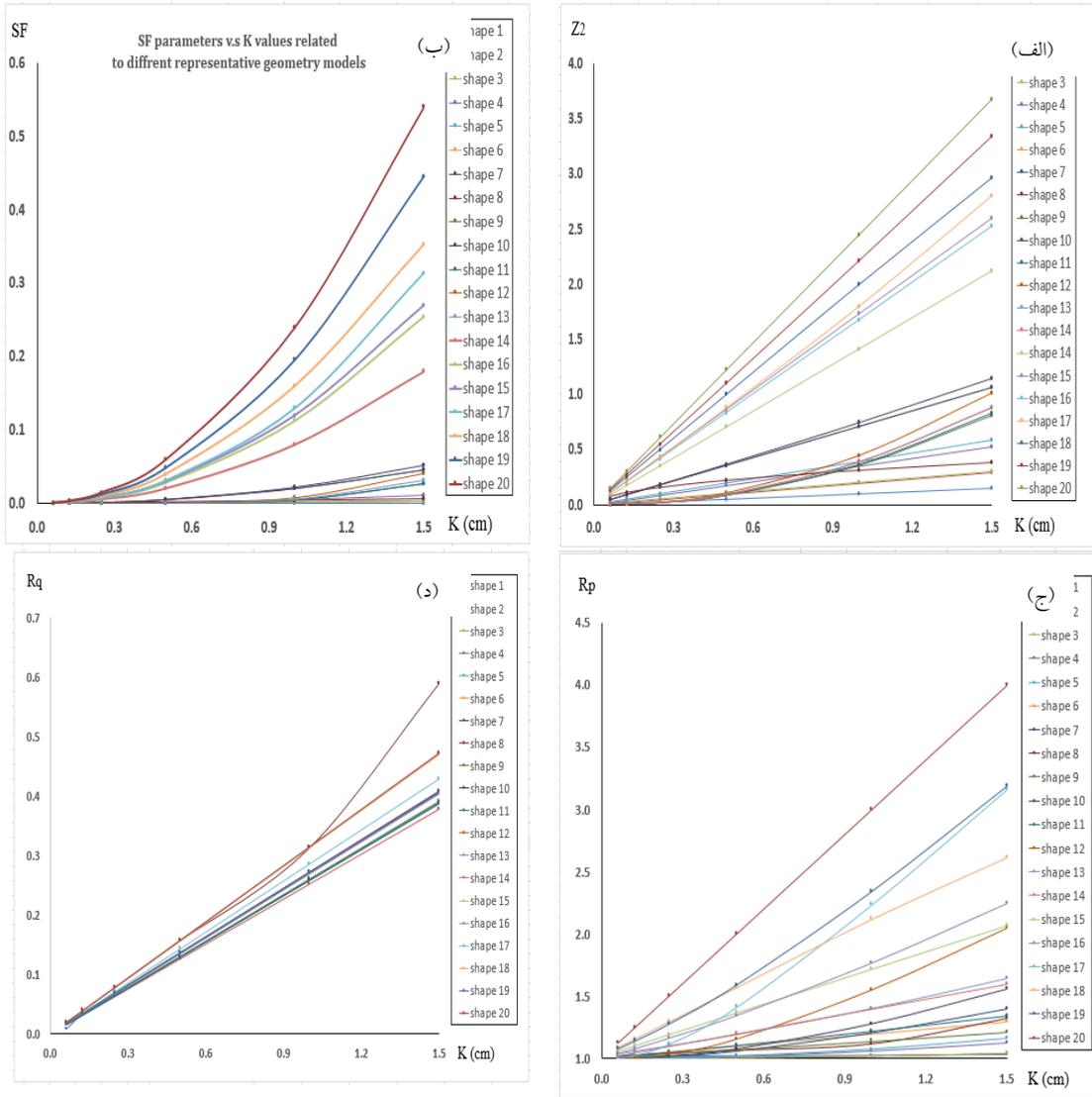
شماره مدل	میزان زبری کامل (K) بر حسب سانتی متر							شکل هندسی معرف	شکل هندسی معرف	میزان زبری کامل (K) بر حسب سانتی متر						
	۱.۵۰۰۰	۱.۰۰۰۰	۰.۵۰۰۰	۰.۲۵۰۰	۰.۱۲۵۰	۰.۰۶۲۵	۰.۰۳۱۲			۱.۵۰۰۰	۱.۰۰۰۰	۰.۵۰۰۰	۰.۲۵۰۰	۰.۱۲۵۰	۰.۰۶۲۵	
۱	۰.۱۵۳	۰.۱۰۱	۰.۰۵۰	۰.۰۲۵	۰.۰۱۳	۰.۰۰۶			۰.۰۰۹۴	۰.۰۰۴۱	۰.۰۰۱۰	۰.۰۰۰۳	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۰		
۲	۰.۱۹۴	۰.۱۹۶	۰.۰۹۸	۰.۰۴۹	۰.۰۲۴	۰.۰۱۲			۰.۰۰۳۴۶	۰.۰۰۱۵۴	۰.۰۰۰۳۸	۰.۰۰۰۱۰	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۱		
۳	۰.۳۰۰	۰.۲۰۰	۰.۱۰۰	۰.۰۵۰	۰.۰۲۵	۰.۰۱۳			۰.۰۰۳۶۰	۰.۰۰۱۶۰	۰.۰۰۰۴۰	۰.۰۰۰۱۰	۰.۰۰۰۰۳	۰.۰۰۰۰۱		
۴	۰.۵۳۰	۰.۳۵۴	۰.۱۷۷	۰.۰۸۸	۰.۰۴۴	۰.۰۲۲			۰.۰۱۱۲۵	۰.۰۰۵۰۰	۰.۰۰۱۲۵	۰.۰۰۰۳۱	۰.۰۰۰۰۸	۰.۰۰۰۰۲		
۵	۰.۵۸۸	۰.۳۹۲	۰.۱۹۶	۰.۰۹۸	۰.۰۴۹	۰.۰۲۴			۰.۰۱۳۸۲	۰.۰۰۶۱۴	۰.۰۰۱۵۴	۰.۰۰۰۳۸	۰.۰۰۰۱۰	۰.۰۰۰۰۲		
۶	۱.۰۶۱	۰.۷۰۷	۰.۳۵۴	۰.۱۷۷	۰.۰۸۸	۰.۰۴۴			۰.۰۲۵۰۰	۰.۰۱۲۰۰	۰.۰۰۵۰۰	۰.۰۰۱۲۵	۰.۰۰۰۳۱	۰.۰۰۰۰۸		
۷	۱.۰۶۱	۰.۷۰۷	۰.۳۵۴	۰.۱۷۷	۰.۰۸۸	۰.۰۴۴			۰.۰۲۵۰۰	۰.۰۱۲۰۰	۰.۰۰۵۰۰	۰.۰۰۱۲۵	۰.۰۰۰۳۱	۰.۰۰۰۰۸		
۸	۰.۳۸۷	۰.۳۱۶	۰.۲۲۴	۰.۱۵۸	۰.۱۱۲	۰.۰۷۷			۰.۰۰۶۰۰	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۲۰۰	۰.۰۰۱۰۰	۰.۰۰۰۵۰	۰.۰۰۰۲۴		
۹	۰.۸۱۴	۰.۳۶۲	۰.۰۹۰	۰.۰۲۳	۰.۰۰۶	۰.۰۰۱			۰.۰۲۶۵۱	۰.۰۰۵۲۴	۰.۰۰۰۳۳	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰		
۱۰	۱.۱۴۶	۰.۷۴۵	۰.۳۶۶	۰.۱۸۲	۰.۰۹۱	۰.۰۴۶			۰.۰۵۲۵۰	۰.۰۲۲۱۸	۰.۰۰۵۲۷	۰.۰۰۱۳۳	۰.۰۰۰۳۳	۰.۰۰۰۰۸		
۱۱	۰.۸۱۹	۰.۳۶۸	۰.۰۹۲	۰.۰۲۳	۰.۰۰۶	۰.۰۰۱			۰.۰۲۷۴۶	۰.۰۰۵۴۲	۰.۰۰۰۳۴	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰		
۱۲	۱.۰۱۱	۰.۴۴۹	۰.۱۱۲	۰.۰۲۸	۰.۰۰۷	۰.۰۰۲			۰.۰۴۰۸۸	۰.۰۰۸۰۷	۰.۰۰۰۵۰	۰.۰۰۰۰۳	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰		
۱۳	۰.۸۸۶	۰.۳۹۴	۰.۰۹۸	۰.۰۲۵	۰.۰۰۶	۰.۰۰۲			۰.۰۳۱۴۲	۰.۰۰۶۲۱	۰.۰۰۰۳۹	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۰		
۱۴	۲.۱۲۱	۱.۴۱۴	۰.۷۰۷	۰.۳۵۴	۰.۱۷۷	۰.۰۸۸			۰.۱۸۰۰۰	۰.۰۸۰۰۰	۰.۰۲۰۰۰	۰.۰۰۵۰۰	۰.۰۰۱۲۵	۰.۰۰۰۳۱		
۱۵	۲.۵۹۸	۱.۷۳۲	۰.۸۶۶	۰.۴۳۳	۰.۲۱۷	۰.۱۰۸			۰.۲۷۰۰۵	۰.۱۲۰۰۱	۰.۰۳۰۰۰	۰.۰۰۷۵۰	۰.۰۰۱۸۸	۰.۰۰۰۴۷		
۱۶	۲.۵۲۴	۱.۶۷۶	۰.۸۳۶	۰.۴۱۸	۰.۲۰۹	۰.۱۰۴			۰.۲۵۴۷۳	۰.۱۱۲۲۵	۰.۰۲۹۹۴	۰.۰۰۶۹۸	۰.۰۰۱۷۴	۰.۰۰۰۴۴		
۱۷	۲.۸۰۲	۱.۸۰۰	۰.۹۰۰	۰.۴۳۷	۰.۲۱۸	۰.۱۰۹			۰.۳۱۴۰۰	۰.۱۲۹۵۸	۰.۰۳۰۰۰	۰.۰۰۷۶۳	۰.۰۰۱۹۰	۰.۰۰۰۴۸		
۱۸	۲.۹۷۱	۲.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۲۵۰	۰.۱۲۵			۰.۳۵۳۰۲	۰.۱۶۰۰۲	۰.۰۴۰۰۰	۰.۰۱۰۰۰	۰.۰۰۲۵۰	۰.۰۰۰۶۳		
۱۹	۳.۳۳۷	۲.۲۱۱	۱.۱۰۱	۰.۵۵۰	۰.۲۷۵	۰.۱۳۸			۰.۴۴۵۵۴	۰.۱۹۵۵۶	۰.۰۴۸۵۲	۰.۰۱۲۱۱	۰.۰۰۳۰۳	۰.۰۰۰۷۶		
۲۰	۳.۶۷۵	۲.۴۵۰	۱.۲۲۵	۰.۶۱۲	۰.۳۰۶	۰.۱۵۳			۰.۵۴۰۱۲	۰.۲۴۰۰۲	۰.۰۶۰۰۰	۰.۰۱۵۰۰	۰.۰۰۳۷۵	۰.۰۰۰۹۴		

شکل ۵-۳- روند مقادیر پارامترهای  $Z_2$  و SF در مدل‌های هندسی مختلف با مقادیر مختلف K

مقادیر پارامترهای  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $Z_2$  و SF به ازای میزان زبری کامل (K) مختلف و برای مدل‌های هندسی معرف در شکل ۵-۵، نشان داده شده است. در شکل مذکور، تاثیر شکل هندسی درزه مشهود است و لزوم استفاده عامل شکل درزه به همراه سایر پارامترهای کمی را بیان می‌نماید. از مدل هندسی اول تا بیستم مقادیر پارامترهای کمی زبری افزایش می‌یابند. مقادیر پارامترهای  $R_p$ ,  $Z_2$  و SF در مدل‌های هندسی یک تا بیست، گاه تا حدود ۷ تا ۸ برابر افزایش می‌یابد. افزایش مقادیر پارامتر  $R_q$  در مدل‌های هندسی به صورت محدودتر است و در نهایت به میزان ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

شماره شکل	پارامتر Rq	میزان زیر کامل (K) بر حسب سانتی متر						شماره شکل	پارامتر Rp	میزان زیر کامل (K) بر حسب سانتی متر					
		۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰۰	۱۲۵۰	۶۲۵			۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰۰	۱۲۵۰	۶۲۵
۱		۰.۳۸۷	۰.۲۵۸	۰.۱۶۹	۰.۰۶۴	۰.۰۳۲	۰.۰۱۶	۱		۱.۰۳۱	۱.۰۲۵	۱.۰۲۱	۱.۰۲۰	۱.۰۲۰	۱.۰۲۰
۲		۰.۳۷۸	۰.۲۵۲	۰.۱۶۶	۰.۰۶۳	۰.۰۳۱	۰.۰۱۶	۲		۱.۰۴۲	۱.۰۱۹	۱.۰۰۵	۱.۰۰۱	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰
۳		۰.۴۸۸	۰.۲۵۹	۰.۱۶۹	۰.۰۶۵	۰.۰۳۲	۰.۰۱۶	۳		۱.۰۴۴	۱.۰۲۰	۱.۰۰۵	۱.۰۰۱	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰
۴		۰.۴۰۵	۰.۲۷۰	۰.۱۳۵	۰.۰۶۷	۰.۰۳۴	۰.۰۰۸	۴		۱.۱۲۵	۱.۰۵۹	۱.۰۱۵	۱.۰۰۴	۱.۰۰۱	۱.۰۰۰
۵		۰.۳۸۹	۰.۲۵۹	۰.۱۳۰	۰.۰۶۵	۰.۰۳۲	۰.۰۱۶	۵		۱.۱۶۰	۱.۰۷۴	۱.۰۱۹	۱.۰۰۵	۱.۰۰۱	۱.۰۰۰
۶		۰.۴۰۷	۰.۲۷۱	۰.۱۳۶	۰.۰۶۸	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۶		۱.۳۰۰	۱.۲۰۰	۱.۱۰۰	۱.۰۵۰	۱.۰۲۵	۱.۰۱۳
۷		۰.۴۰۶	۰.۲۷۰	۰.۱۳۵	۰.۰۶۸	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۷		۱.۴۰۱	۱.۲۰۷	۱.۰۵۹	۱.۰۱۵	۱.۰۰۴	۱.۰۰۱
۸		۰.۵۹۰	۰.۳۱۳	۰.۱۵۷	۰.۰۷۸	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۸		۱.۳۲۰	۱.۱۲۰	۱.۰۷۰	۱.۰۴۵	۱.۰۳۳	۱.۰۲۶
۹		۰.۳۹۲	۰.۲۶۱	۰.۱۳۱	۰.۰۶۵	۰.۰۳۳	۰.۰۱۶	۹		۱.۲۱۵	۱.۱۴۰	۱.۰۷۵	۱.۰۴۶	۱.۰۳۳	۱.۰۲۶
۱۰		۰.۴۰۴	۰.۲۶۹	۰.۱۳۵	۰.۰۶۷	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۱۰		۱.۵۶۲	۱.۲۸۱	۱.۰۷۷	۱.۰۲۰	۱.۰۰۵	۱.۰۰۱
۱۱		۰.۳۸۸	۰.۲۵۹	۰.۱۶۹	۰.۰۶۵	۰.۰۳۲	۰.۰۱۶	۱۱		۱.۳۴۴	۱.۲۲۰	۱.۱۰۵	۱.۰۵۱	۱.۰۲۵	۱.۰۱۳
۱۲		۰.۴۰۷	۰.۲۷۱	۰.۱۳۶	۰.۰۶۸	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۱۲		۲.۰۴۵	۱.۵۵۱	۱.۱۵۸	۱.۰۳۷	۱.۰۰۴	۰.۹۹۶
۱۳		۰.۴۰۴	۰.۲۶۹	۰.۱۳۵	۰.۰۶۷	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۱۳		۱.۶۴۰	۱.۳۹۹	۱.۱۹۰	۱.۱۰۰	۱.۰۵۹	۱.۰۳۹
۱۴		۰.۴۷۰	۰.۳۱۳	۰.۱۵۷	۰.۰۷۸	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۱۴		۱.۶۰۰	۱.۴۰۰	۱.۲۰۰	۱.۱۰۰	۱.۰۵۰	۱.۰۲۵
۱۵		۰.۴۷۱	۰.۳۱۴	۰.۱۵۷	۰.۰۷۸	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۱۵		۲.۰۷۰	۱.۷۲۰	۱.۳۷۰	۱.۱۹۵	۱.۱۰۸	۱.۰۶۴
۱۶		۰.۴۰۴	۰.۲۶۹	۰.۱۳۵	۰.۰۶۷	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۱۶		۲.۲۴۵	۱.۷۶۶	۱.۳۴۴	۱.۱۶۱	۱.۰۷۸	۱.۰۳۸
۱۷		۰.۴۶۹	۰.۲۸۶	۰.۱۴۳	۰.۰۷۲	۰.۰۳۶	۰.۰۱۸	۱۷		۳.۱۶۲	۲.۲۳۶	۱.۴۱۴	۱.۱۱۸	۱.۰۳۱	۱.۰۰۸
۱۸		۰.۴۷۱	۰.۳۱۴	۰.۱۵۷	۰.۰۷۹	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۱۸		۲.۶۱۸	۲.۱۲۰	۱.۵۷۰	۱.۲۹۵	۱.۱۵۸	۱.۰۸۹
۱۹		۰.۴۰۹	۰.۲۷۲	۰.۱۳۶	۰.۰۶۸	۰.۰۳۴	۰.۰۱۷	۱۹		۳.۱۸۹	۲.۳۴۲	۱.۵۹۰	۱.۲۷۶	۱.۱۴۰	۱.۰۷۸
۲۰		۰.۴۷۱	۰.۳۱۴	۰.۱۵۷	۰.۰۷۹	۰.۰۳۹	۰.۰۲۰	۲۰		۴.۰۰۰	۳.۰۰۰	۲.۰۰۰	۱.۵۰۰	۱.۲۵۰	۱.۱۲۵

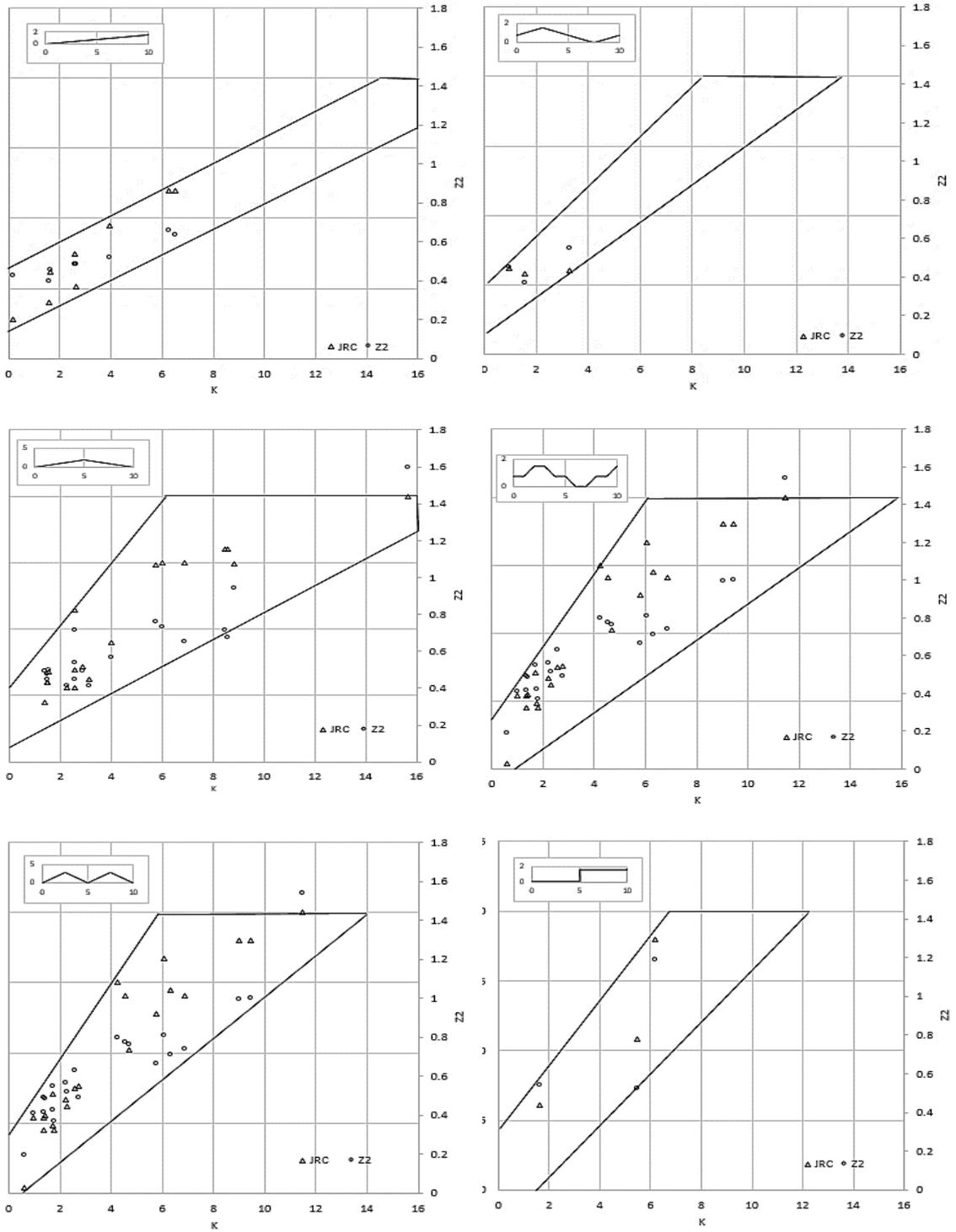
شکل ۵-۴- روند مقادیر پارامترهای Rq و Rp در مدل‌های هندسی مختلف با مقادیر مختلف K



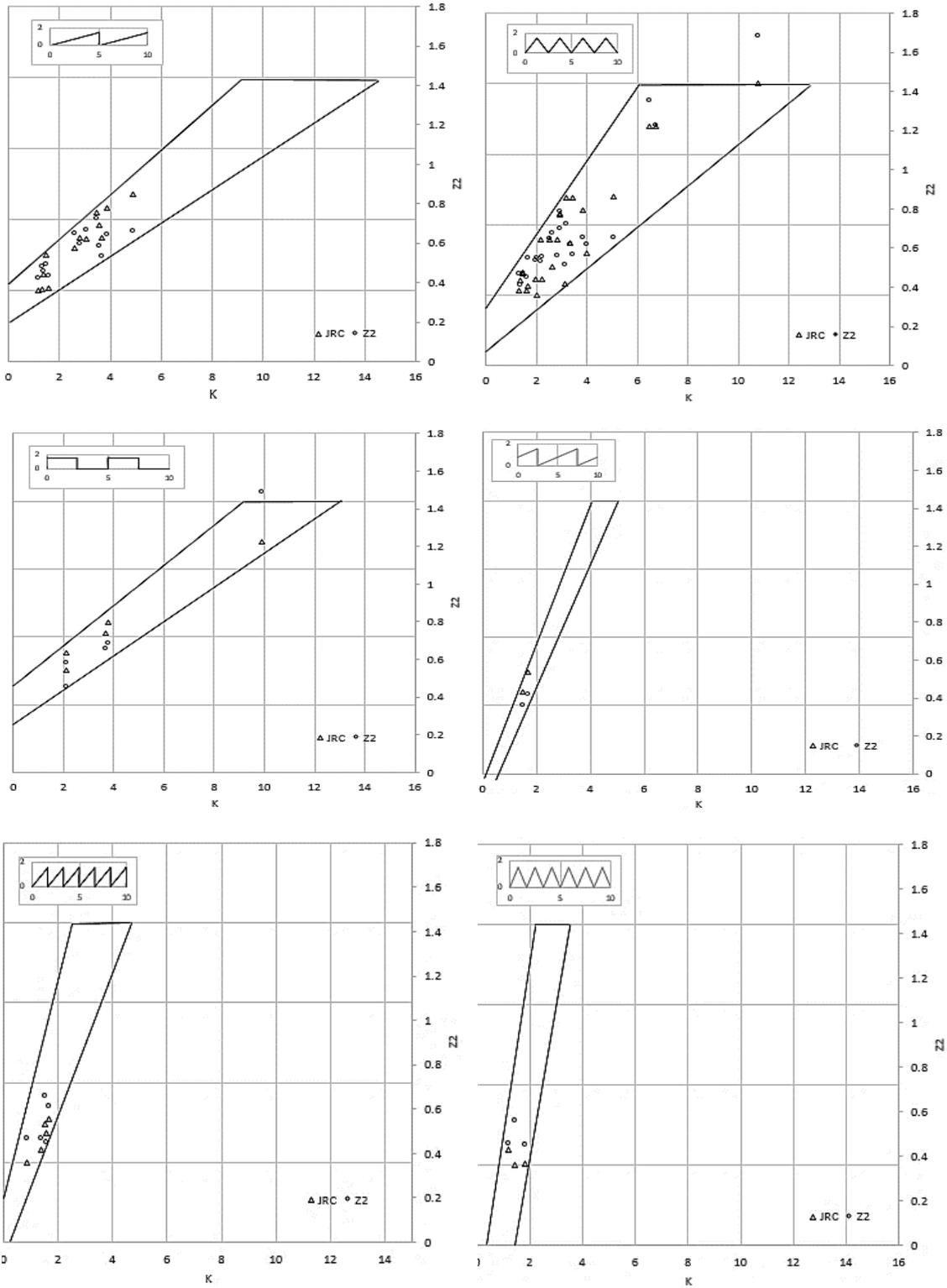
شکل ۵-۵- تاثیر مدل‌های هندسی معرف در مقادیر پارامترهای کمی زبری (الف)  $Z_2$ ، (ب) SF، (ج) Rp و (د) Rq

برای اعتباردهی به مدل‌های هندسی از ۱۱۲ نمونه سطح زبر واقعی که مقادیر JRC آنها تحت آزمایش برش استخراج شده، استفاده شده است. شکل کلی نمونه‌های زبر گردآوری شده با مدل‌های هندسی معرف تطبیق داده شده‌اند. برای اکثر مدل‌های هندسی معرف، نمونه‌های زبر واقعی به خوبی تطبیق داده شده‌اند و تنها برای تعداد محدودی از مدل‌های هندسی معرف، معادل واقعی خوبی بدست نیامده است. علت عدم تطبیق نمونه‌های زبر واقعی برای برخی مدل‌های محدود، نبود مقادیر عدد زبری درزه متناظر برای آن مدل‌ها است. کمبود اطلاعات بیشتر در مدل‌های هندسی در مقادیر K زیاد و تعداد دندان‌های بیشتر است. تطبیق‌های نمونه سطح درزه‌سنگ با مدل‌های هندسی معرف در فصل چهارم ارائه شده است. بعد از تطبیق نمونه‌های سطح زبر واقعی با مدل‌های هندسی معرف، برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف، تعدادی از نمونه‌های سطح زبر واقعی بدست می‌آید. برای این نمونه‌ها نتایج پارامترهای کمی (همچون  $Z_2$ , SF, Rp و Rq)، میزان زبری کامل (K) و مقدار ضریب زبری درزه JRC برای هر کدام از شکل‌های هندسی مورد بررسی قرار گرفته است.

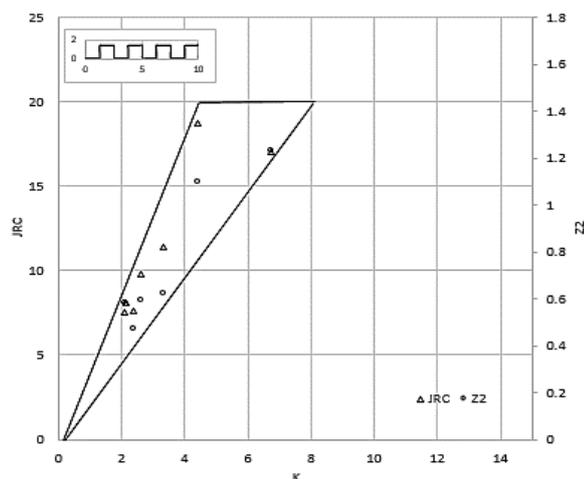
نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب زبری درزه در مدل‌های هندسی مختلف متفاوت بوده و همانند روند استخراج شده برای ۲۰ مدل هندسی معرف، مقادیر ضریب زبری درزه برای مدل‌های ۱ تا ۲۰ افزایش یافته است. بنابراین تاثیر مهم نوع شکل سطح بر میزان زبری درزه با استفاده از مقادیر ضریب زبری درزه اعتبار می‌یابد. در شکل ۵-۵، نمودار پارامتر  $Z_2$  نسبت به K و JRC برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۵-۶ دیده می‌شود، با افزایش شماره مدل‌های هندسی معرف از یک تا ۲۰، محدوده مقادیر در نمودارها به سمت چپ متمایل می‌شود و شیب کلی محدوده نقاط بیشتر می‌شود. این موضوع موید تاثیر شکل هندسی درزه بر مقادیر زبری درزه بوده و لزوم استفاده از شکل هندسی درزه به همراه پارامترهای کمی دیگر را بیان می‌کند. روابط تجربی متناظر برای هر مدل هندسی معرف در شکل ۵-۷، ارائه شده است. بهترین ضرایب همبستگی در روابط ارائه شده در شکل ۵-۷ به صورت توابع لگاریتمی حاصل می‌شود.



شکل ۵-۶- مقادیر  $Z_2$ ,  $K$  (محور افقی) و  $JRC$  (محور قائم) برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف



ادامه شکل ۵-۶- مقادیر  $Z_2$ ,  $K$  (محور افقی) و  $JRC$  (محور قائم) برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف



ادامه شکل ۵-۶- مقادیر  $Z_2$ ,  $K$  (محور افقی) و  $JRC$  (محور قائم) برای هر کدام از مدل‌های هندسی معرف

رابطه	ضریب همبستگی	جامعه آماری	شکل	شماره مدل	ردیف
$JRC = 2.5611 \ln(k) + 5.3956$	۰/۹۶	۸		۱	۱
$JRC = 6.5635 \ln(k) + 2.6826$	۰/۹۳	۱۸		۳	۲
	۰/۹۱	۶		۴	
	۰/۹۴	۲۰		۵	
$JRC = 4.3173 \ln(k) + 4.3283$	۰/۹۵	۱۳		۹	۳
$JRC = 6.8514 \ln(k) + 2.4875$	۰/۸۷	۶		۷	۴
	۰/۸۸	۴		۸	
	۰/۹۰	۷		۱۰	
$JRC = 11.585 \ln(k) + 1.3027$	۰/۹۲	۳		۱۱	۵
	۰/۸۹	۴		۱۲	
$JRC = 5.6871 \ln(k) + 3.6575$	۰/۹۳	۵		۱۴	۶
$JRC = 3.8192 \ln(k) + 5.3432$	۰/۹۱	۵		۱۶	۷

شکل ۵-۷- اشکال هندسی معرف و روابط تجربی متناظر

با توجه به بررسی انجام شده لازم است ترکیبی از پارامترها به همراه تفکیک شکل عمومی سطح ناپیوستگی شامل شیب، ارتفاع و دندانه استفاده شود. در تعیین زبری سطوح زبر، با تعیین شکل هندسی کلی سطح و تطبیق آن با اشکال هندسی معرف تعریف شده، می‌توان از پارامترهای کمی نظیر  $Z_2$ ، SF، Rp و Rq استفاده نمود.

به عبارت دیگر، در این روش به منظور دستیابی به ضریب زبری درزه هم از پارامترهای کمی تعیین زبری و هم از عامل شکل هندسی درزه (مدل‌های هندسی معرف تعریف شده در این تحقیق)، با تطبیق بین هندسه درزه مورد نظر با مدل‌های هندسی گفته شده استفاده می‌شود. پس از مشخص شدن گروه شکلی و بیشینه ارتفاع درزه می‌توان مقدار عددی ضریب زبری درزه را تخمین زد. در این حالت خطاهای حاصل از بازه گسترده مقادیر JRC نسبت به پارامتر کمی زبری مشخص، محدود خواهد شد.

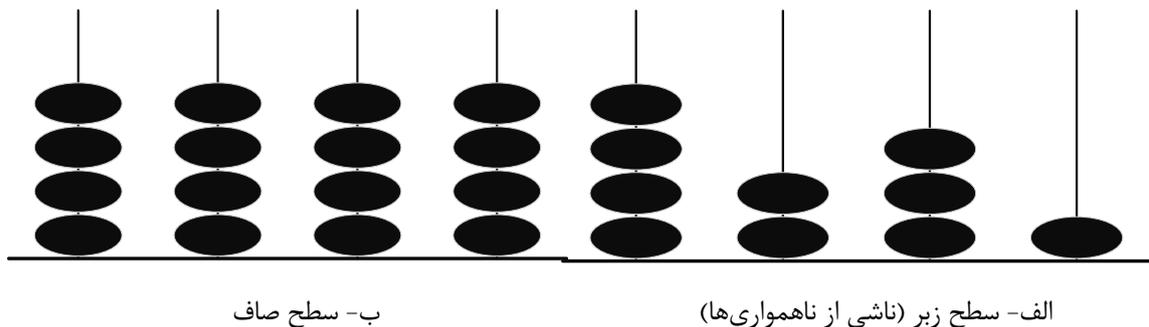
### ۵-۳- ارایه طبقه‌بندی جدید (مدل چرتکه‌ای)

پارامترهای کمی تعریف شده تاکنون به دلیل ضعف ذاتی در بیان زبری درزه نمی‌توانند مبین مقدار زبری واقعی درزه باشند. در واقع پارامتر کمی که بتواند ویژگی‌هایی همچون ارتفاع بیشینه، تفاضل ارتفاع‌ها، شیب‌ها و تکرار اختلاف ارتفاع‌ها را مد نظر قرار دهد، ارائه نشده است. در این بخش از تحقیق سعی شده است خصوصیات هندسی زبری سطح درزه همچون ارتفاع بیشینه، اختلاف ارتفاع و تکرارپذیری اختلاف ارتفاع‌ها که از مشخصه‌های اصلی سطح زبر هستند در قالب یک طبقه‌بندی جامع رده‌بندی شده و دستیابی به زبری درزه‌سنگ به صورت چند پارامتری و با استفاده از یک روند منطقی صورت پذیرد.

### ۵-۳-۱- ساختار مدل چرتکه‌ای

همانطور که توضیح داده شد، به دلیل وجود برخی از ضعف‌ها در پارامترهای زبری موجود و عدم امکان تعریف جامعی از زبری، در این بخش از تحقیق حالات ممکن در ایجاد سطوح زبر درزه مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های هندسی زبری معرف بر این اساس ارایه شده‌اند. زبری یک سطح به دلیل اختلاف ارتفاع دو نقطه مجاور به وجود می‌آید. اگر دو نقطه مجاور هم اختلاف ارتفاعی نداشته باشند بدیهی

است در آن گستره زبری وجود ندارد. زمانی که اختلاف ارتفاع بین دو نقطه ایجاد می‌شود، سطح ناهموار و در واقع زبری به وجود می‌آید. اگر هر نقطه روی یک سطح نسبت به یک سطح مبنا به عنوان یک ستون از یک چرتکه در نظر گرفته شود، ارتفاع هر ستون متناسب با تعداد مهره‌های آن ستون از چرتکه در نظر گرفته شده و بیان‌گر ارتفاع آن نقطه نسبت به سطح مبنا است. اگر دو ستون چرتکه ارتفاع یکسانی داشته باشند، سطحی صاف را نمایش خواهند داد. بدیهی است در این شرایط، زبری سطح متناسب با اختلاف تعداد مهره‌ها در ستون‌های مجاور هم خواهد بود. در شکل ۵-۸، دو سطح زیر (الف) و سطح صاف (ب) نمایش داده شده است. با ایجاد حالات مختلف از قرارگیری مهره‌های چرتکه با ۴ ستون و در هر ستون چهار حالت با ارتفاع‌های صفر، یک، دو و سه، کل حالات ممکن برای ایجاد سطوح زیر ۲۵۶ حالت خواهد شد. در این حالت هر گونه سطح زیر درزه‌سنگ می‌تواند با یکی از حالات ممکن تطبیق داده شود.



شکل ۵-۸- وضعیت قرارگیری تعداد مهره‌های چرتکه و ایجاد سطح زیر

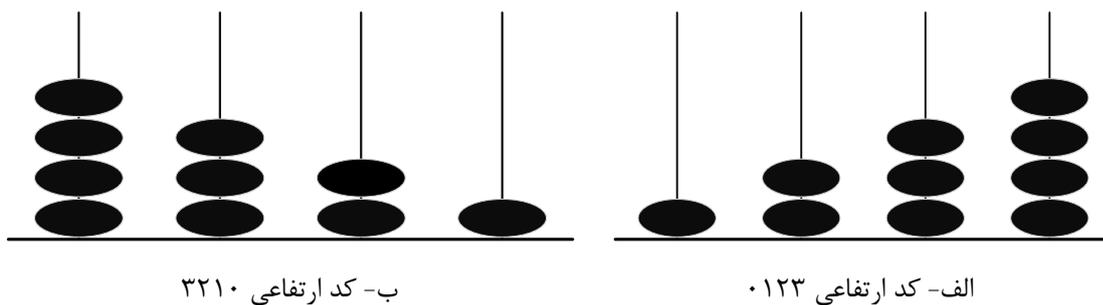
در مدل‌سازی چرتکه‌ای، مجموع عرض ستون‌های چرتکه برابر عرض نمونه زبری در نظر گرفته می‌شوند. اگر تعداد ستون‌های کنار هم  $n$  عدد باشد، عرض هر ستون چرتکه معادل  $1/n$  عرض نمونه خواهد بود. برای مدل زبری می‌توان از  $n$  مساوی با ۴ استفاده نمود. از آنجا که عرض نمونه‌های واقعی زبری ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند، در این حالت عرض هر ستون چرتکه در مدل‌سازی ۴ تایی ستون‌ها، ۲۵ میلی‌متر تعریف می‌شود. در نمونه‌های سطوح زیر مطالعه شده، بیشترین ارتفاع موجود در بین نمونه‌ها ۱۵ میلی‌متر بوده است. در مدل‌سازی ۴ تایی ستون‌های چرتکه‌ای، برای سادگی کار هر ستون می‌تواند یکی

از چهار ارتفاع صفر، بین صفر تا ۳، بین ۳ تا ۶ و بالاتر از ۶ میلی‌متر را داشته باشد که برای بیان مدل زبری در این تحقیق به صورت قراردادی به ترتیب ارتفاع‌ها بصورت صفر، ۱، ۲ و ۳ نمایش داده می‌شوند.

### ۵-۳-۲- فضای نمونه

همان‌طور که بیان شد در مدل چرتکه‌ای حالات مختلف جایگشت ۴ ستون چرتکه با تعداد ۴ مهره تعریف می‌شود. در این مدل‌سازی، ۴ جایگشت با ۴ شی مختلف وجود دارد که در مجموع ۲۵۶ حالت ممکن با تکرار را به وجود می‌آورد. با توجه به ماهیت زبری درزه‌سنگ، تمامی حالات ممکن مورد بررسی قرار گرفته و برخی از این حالات از میان بررسی‌های آماری مطالعه حاضر به شرح زیر حذف شده‌اند. برای استخراج تمامی حالات ممکن سطح درزه‌سنگ در مدل چرتکه‌ای و حذف حالات تکراری از بین آنها، برنامه‌نویسی لازم در محیط Visual basic انجام شده است. کد نرم‌افزاری در پیوست ۱ ارایه شده است.

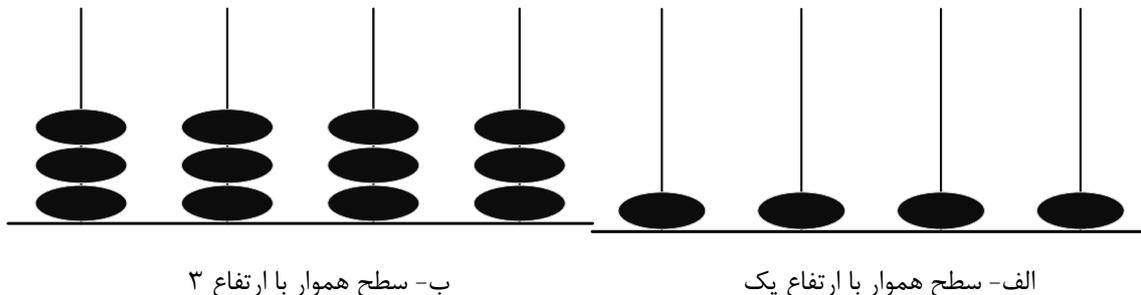
- از بین ۲۵۶ حالت ممکن، بعضی از حالات وجود دارند که به صورت قرینه بیان‌گر زبری مشابه هستند. تعداد این حالات نصف تعداد کل حالات ممکن می‌باشد. به عنوان نمونه، در شکل ۵-۹ شباهت حالت قرینه زبری با کد ارتفاعی ۰۱۲۳ (الف) که همان حالت ۳۲۱۰ (ب) است، نشان داده است.



شکل ۵-۹- شباهت حالات قرینه در مدل‌سازی چرتکه‌ای و حذف از حالات مورد بررسی

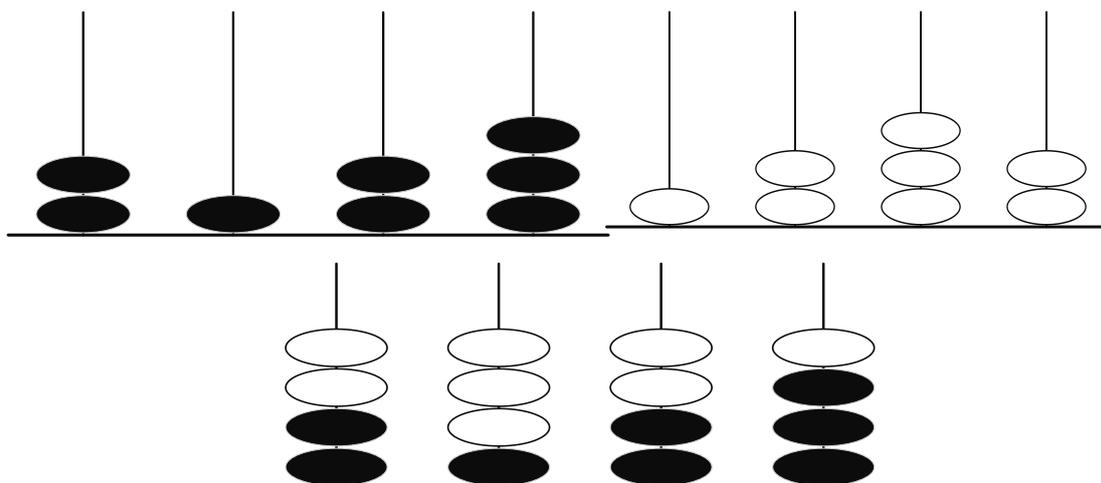
- در ادامه، از بین حالات باقیمانده ۴ حالت وجود دارد که تکرار عدد ارتفاع در آن رخ می‌دهد و شرایط یکسانی دارند که از مجموع کل حالات بررسی کسر می‌شوند. این چهار حالت عبارتند

از حالات ۰۰۰۰، ۱۱۱۱، ۲۲۲۲ و ۳۳۳۳ که واضح است مقدار زبری این چهار حالت با یکدیگر برابر است. در شکل ۵-۱۰، دو حالت از ۴ حالت عنوان شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰- حالت های با ارتفاع مشابه (سطح زبر یکسان)

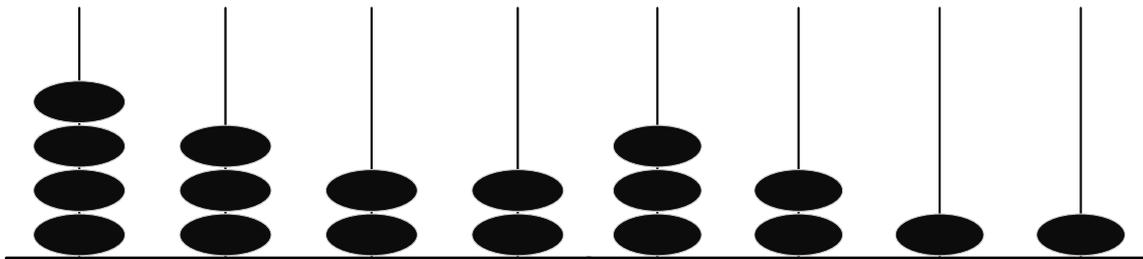
- همچنین، در بین حالات ممکن مواردی وجود دارند که دو حالت موجود، مکمل یکدیگر هستند یعنی اگر دو حالت روی هم بیافتند کاملاً همدیگر را تکمیل می کنند. در واقع با عکس نمودن صفحه زبر، مقدار عددی مشابه برای آن حالت بوجود می آید. در شکل ۵-۱۱، دو شکل زبری مکمل یکدیگر نشان داده شده است. به عنوان مثال دو حالت با کدهای ۲۱۲۳ و ۱۲۳۲ مکمل یکدیگر هستند. که باید از بین حالات ممکن حذف شوند. تعداد کل حالات کسر شده در این حالت برابر با ۴۰ حالت است.



شکل ۵-۱۱- نمایش حالات مکمل با سطح زبر مشابه

- از دیدگاه تعیین وضعیت زبری سطح درزه، بین حالات ۱۲۲۳ و ۰۱۱۲ نیز تفاوتی وجود ندارد. در شکل ۵-۱۲ دو نمونه سطح زبر با کدهای ارتفاعی ۲۱۰۰ (الف) و ۳۲۱۱ (ب) نشان داده

شده است که به لحاظ سطح زیر ایجاد شده تفاوتی ندارند. چون در این دو سطح صرفاً مبنای آن‌ها فرق می‌کند و وضعیت سطح زیر برای این حالات یکی است. تعداد کل حالات کسر شده در این وضعیت نیز ۳۱ حالت است.



الف- سطح با کد ارتفاعی ۲۱۰۰

ب- سطح با کد ارتفاعی ۳۲۱۱

شکل ۵-۱۲- نمونه‌ای از حالات با سطح زیر یکسان

این حالات نیز از بین حالات ممکن حذف شده‌اند. در نهایت، از کل حالات ممکن (۲۵۶ حالت)، تعداد حالات محتمل برابر با ۵۷ حالت باقی‌مانده است.

### ۵-۳-۳- طبقه‌بندی سطوح زیر

با حذف حالات تکراری، در این مرحله از مطالعه تمامی حالات محتمل باقیمانده به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند که از یک گروه به گروهی دیگر بعضی از خواص یا پارامترهای کمی و کیفی آن تغییر می‌کنند. مبنای طبقه‌بندی برای حالات بدست آمده در این مطالعه، بیشینه تعداد مهره‌های ستون‌ها، اختلاف ارتفاع دو ستون مجاور چرتکه و تکرارپذیری بیشینه اختلاف تعداد مهره‌های ستون‌ها است. از این رو ۵۷ حالت ممکن به ۱۸ رده طبقه‌بندی شده است.

در جدول ۵-۱، نحوه قرارگیری رده‌های مختلف در طبقه‌بندی حاضر ارائه شده است. سه گروه اصلی به صورت گروه‌های A، B و C، بیان‌گر بیشینه ارتفاع ستون‌های چرتکه تعریف شده است. اندیس  $i$  و  $j$  برای هر یک از گروه‌ها به صورت زیر تعریف شده است.

$$A_{ij} \quad (۵-۱)$$

که در آن:

A، اسم گروه بیان گر ارتفاع بیشینه در سطح درزه

i، بیشینه اختلاف بین ستون‌های چرتکه و

j، بیشینه تعداد اختلاف ارتفاع است.

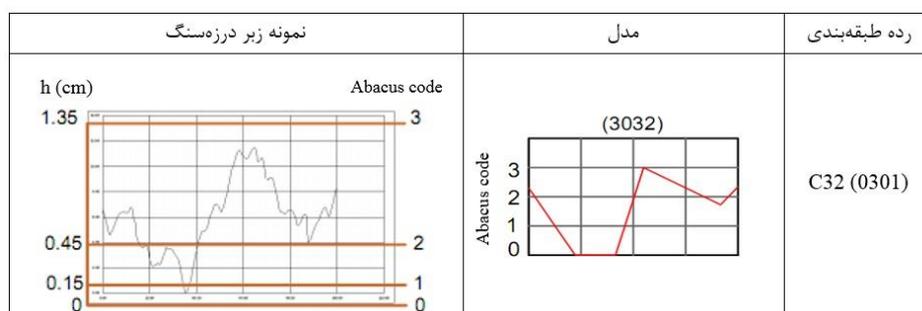
اندیس گروه B<sub>12</sub> بیان گر حالت‌هایی از سطح زبر درزه سنگ است که بیشینه ارتفاع درزه سنگ دو واحد، اختلاف ارتفاع بین ستون‌های مجاور یک و تکرارپذیری بیشینه اختلاف ارتفاع دو است. در طبقه‌بندی ارائه شده به عنوان مثال، حالت ۰۱۲۳ با حالت ۰۲۲۳ نمی‌توانند در یک گروه قرار بگیرند زیرا اختلاف ارتفاع بیشینه بین دو ستون مجاور هم، در حالت اول برابر با یک واحد ولی در حالت دوم اختلاف ارتفاع بیشینه بین دو ستون مجاور دو واحد است. همین‌طور دو حالت ۰۱۲۳ و ۰۲۲۱ نیز نمی‌توانند در یک گروه قرار بگیرند چون در حالت اول، بیشینه ارتفاع ستون‌ها سه است در صورتی که در حالت دوم، ارتفاع بیشینه ستون‌ها دو است. در نهایت تعداد ۱۸ اندیس گروه در این طبقه‌بندی ارائه شده است که پوشش‌دهنده تمام زبری‌های ممکن برای سطح درزه است.

جدول ۵-۱- طبقه‌بندی برای حالات مختلف سطح زیر درزه‌سنگ

اندیس گروه	تکرار اختلاف ارتفاع بیشینه (j)	بیشینه اختلاف ارتفاع (i)	بیشینه ارتفاع	گروه
A <sub>11</sub>	۱	۱	۱	A
A <sub>12</sub>	۲			
A <sub>13</sub>	۳			
B <sub>11</sub>	۱	۱	۲	B
B <sub>12</sub>	۲			
B <sub>13</sub>	۳			
B <sub>21</sub>	۱	۲		
B <sub>22</sub>	۲			
B <sub>23</sub>	۳			
C <sub>11</sub>	۱	۱	۳	C
C <sub>12</sub>	۲			
C <sub>13</sub>	۳			
C <sub>21</sub>	۱	۲		
C <sub>22</sub>	۲			
C <sub>23</sub>	۳			
C <sub>31</sub>	۱	۳		
C <sub>32</sub>	۲			
C <sub>33</sub>	۳			

### ۵-۳-۴-اعتبارسنجی مدل

در این مرحله برای اعتباردهی به مدل چرتکه‌ای ارایه شده، رده‌های طبقه‌بندی (در برگزیده تمامی حالات سطح زبر درزه) با نمونه‌های سطوح درزه واقعی تطبیق داده شده است. برای این منظور، بانکی از داده‌های سطوح زبر حاوی مختصات سطح و نتایج ضریب زبری درزه متناظر هر کدام که تحت آزمایش برش قرار گرفته، جمع‌آوری شده است. برای گردآوری داده‌های زبر سطوح از نتایج تحقیقات محققین پیشین استفاده شده است. نمونه‌های واقعی سطح زبر درزه‌سنگ، شامل نتایج مطالعات بارتن و چوبی، مطالعات آزمایشگاهی باندیس، مطالعات انجام شده توسط بارتن و باندیس و مطالعات آزمایشگاهی گراسلی که مجموعاً ۱۱۲ نمونه را تشکیل می‌دهند، مبنای تطابق در این مقاله قرار گرفته است. تمامی ۱۱۲ نمونه حاوی مقادیر ضریب زبری متناظر، طولی برابر با ۱۰۰ میلی‌متر دارند که با مدل چرتکه‌ای ۴ تایی مدل‌سازی شده، تطبیق داده شده‌اند. نحوه تطبیق به این صورت است که عرض تمامی نمونه‌ها (۱۱۲ نمونه) به چهار قسمت تقسیم شده و ارتفاع هر ستون چرتکه استخراج شده است. در این حالت برای هر کدام از نمونه‌های زبر، اندیس گروه متناظر قابل تعریف است. با توجه به اینکه نمونه‌های سطح زبر گردآوری شده دارای مقادیر ضریب زبری درزه حاصل از آزمایش برش هستند از این رو با انتساب نمونه‌های زبر درزه به اندیس گروه‌های مختلف، مقادیر ضریب زبری درزه برای اندیس گروه‌های مختلف این طبقه‌بندی بدست می‌آید. در شکل ۵-۱۳، یکی از ۱۱۲ نمونه تبدیل سطح درزه‌سنگ به مدل‌های چرتکه‌ای نشان داده شده است. تبدیل گفته شده به صورت دستی انجام پذیرفته است.



شکل ۵-۱۳- استخراج مدل‌های چرتکه‌ای از نمونه‌های سطح زبر درزه

برای تمامی ۱۱۲ نمونه درزه سنگ زبر تبدیل عنوان شده انجام شده است. در جدول ۵-۲، تعداد نمونه‌های تطبیق داده شده از سطوح زبر درزه گردآوری شده برای هر یک از گروه‌های طبقه‌بندی آورده شده است. در این جدول، پارامتر K برابر با ارتفاع بیشینه درزه از سطح مبنا است. همان‌طور که بیان شد پس از مرحله تطبیق نمونه‌های سطح زبر درزه سنگ‌های گردآوری شده با هر کدام از رده‌های طبقه‌بندی، مقادیر ضریب زبری درزه نمونه‌های درزه سنگ می‌تواند به هر کدام از رده‌ها منتسب شود. بعد از تطبیق گروه‌ها با نمونه‌های سطح زبر (حاوی مقادیر ضریب زبری درزه متناظر)، مقادیر JRC برای هر کدام از گروه‌ها شامل کمینه، متوسط و بیشینه مشخص شده است.

جدول ۵-۲- تعداد نمونه‌های تطبیق داده شده از نمونه‌های سطح زبر درزه سنگ به گروه‌های معرفی شده

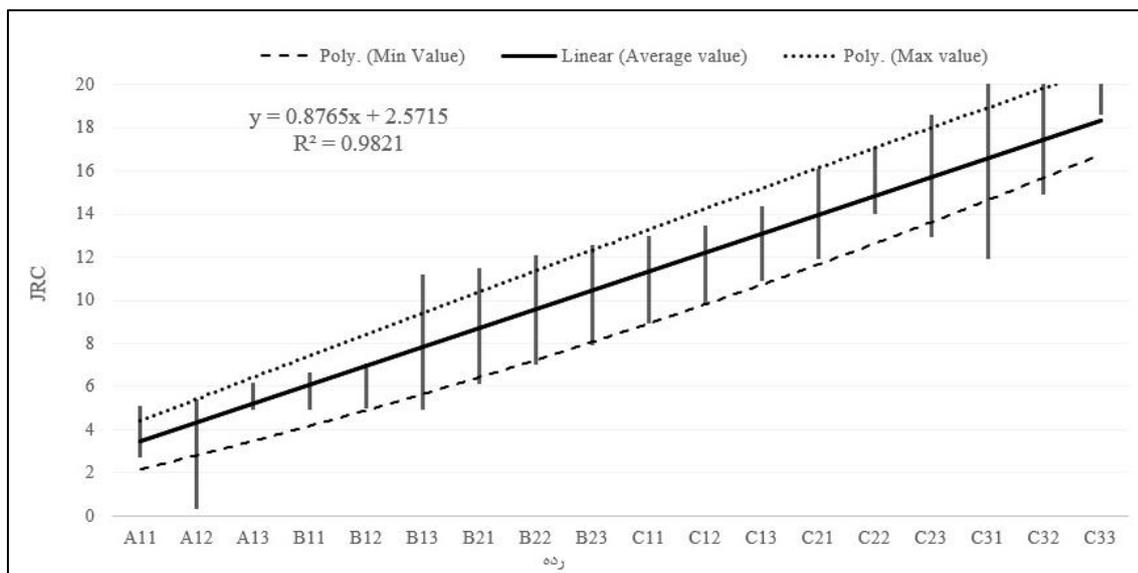
تعداد نمونه‌های تطبیق داده شده	بازه K برای گروه (میلی‌متر)	گروه
۲۵	۰ تا ۳	A
۵۷	۳ تا ۶	B
۳۰	۶ تا ۱۵	C

در جدول ۵-۳ مدل‌های چرتکه‌ای استخراجی از برخی نمونه‌های سطح زبر درزه سنگ ارایه شده است. در این جدول در سه ستون متوالی، K بیان‌گر ارتفاع کلی درزه، JRC ضریب زبری متناظر سطح درزه سنگ و مدل استخراجی ارایه شده است. شکل ۵-۱۴، بازه ضریب زبری درزه در هر کدام از رده‌های طبقه‌بندی ارایه شده را نشان می‌دهد. با طبقه‌بندی ارائه شده، بیشینه ارتفاع سطح درزه، اختلاف ارتفاع سطوح درزه نسبت به یکدیگر و تکرارپذیری اختلاف ارتفاع‌ها که بیان‌گر شرایط مناسبی از وضعیت سطح زبر درزه می‌تواند باشد ارائه شده است. شکل ۵-۱۳، نشان می‌دهد که بین گروه‌ها و عدد JRC متناظر سیر صعودی وجود دارد. از این رو با روش ارایه شده در این تحقیق، برای دستیابی سریع به مقدار ضریب زبری درزه‌ها ابتدا سطح درزه را به چهار قسمت تقسیم نموده و میانگین ارتفاع چهار بخش محاسبه می‌شود. سپس، چهار عدد برای سطح زبر درزه سنگ با رعایت ترتیب و توالی اعداد مد نظر قرار می‌گیرد.

برای بدست آوردن مقدار عددی JRC ابتدا سطح زیر درزه کددار با رده مربوطه تطابق یافته و در نهایت عدد زبری با استفاده از نمودار شکل ۵-۱۴، به دست می‌آید. در این شکل n تعداد ستون‌های چرتکه و h تعداد حالات پوشش دهنده ارتفاع هر ستون چرتکه است.

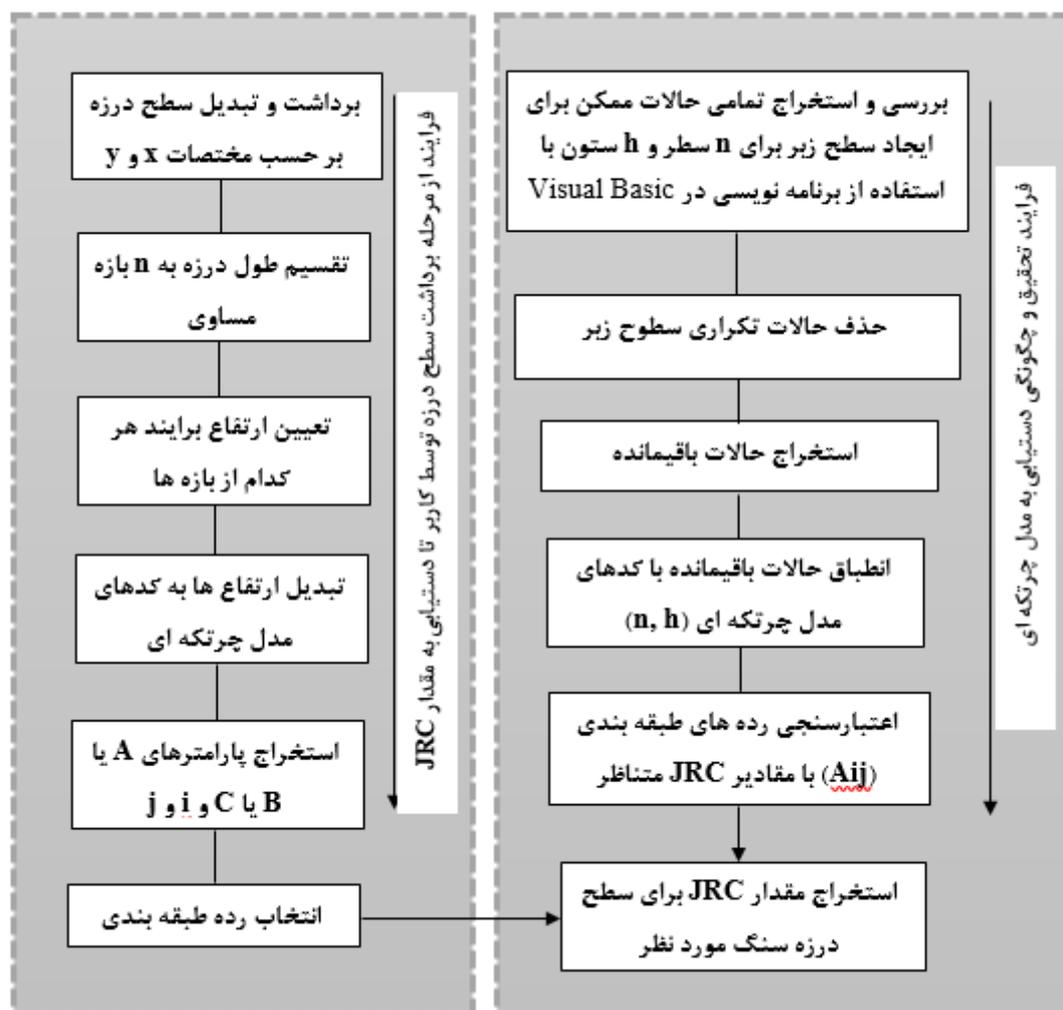
جدول ۵-۳- مدل‌های چرتکه‌ای استخراجی از برخی نمونه‌های سطح زیر درزه سنگ

K	JRC	مدل	K	JRC	مدل	K	JRC	مدل	K	JRC	مدل
1.7498	2.8	0111	3.134448	5.8	1210	2.573175	7.5	0212	3.31497	11.4	0212
1.578784	4	0011	1.489271	6	110	2.095525	7.5	0212	2.555094	11.4	0221
0.5993	0.4	1011	1.49114	6	1001	2.742017	7.6	0212	4.883048	11.8	1202
1.355767	4.5	1011	1.21524	6	101	2.374556	7.6	0212	3.185581	11.9	2021
1.776998	4.5	1011	3.261075	6	2110	1.664073	7.7	1021	3.424313	11.9	2021
1.735588	4.8	1110	1.500392	6	101	3.986705	8	1002	5.062125	12	0220
1.776998	4.5	1011	1.33172	6	1010	2.612171	8	1002	6.273336	12	0320
1.735588	4.8	1110	2.201175	6.1	1010	2.157128	8.1	0211	6.51885	12	0321
0.86844	5	0011	1.615055	6.1	1001	3.054005	8.6	2012	5.7838	12.8	1031
2.024297	5	2101	1.359846	6.1	1001	3.331767	8.65	0210	4.542023	14.1	2030
1.437346	5	0101	1.984159	6.1	12	2.797035	8.7	2021	6.874326	14.1	3120
1.146394	5	1001	0.949147	6.2	211	3.664281	8.7	2010	6.3057	14.5	2031
1.84666	5.1	0101	2.287599	6.2	1102	2.098633	8.8	1202	5.745409	14.8	2023
1.316031	5.1	0101	1.606675	6.2	112	2.541399	8.9	1220	8.824995	14.9	1301
2.631146	5.1	2110	3.107963	6.2	1002	2.185431	8.9	0211	6.901601	15	2032
1.559961	5.2	1001	1.446466	6.5	121	2.803511	8.95	1021	4.250234	15	0302
1.309237	5.3	1001	1.484614	6.6	1210	4.015764	9	2102	5.993349	15	2023
1.633394	5.3	1010	2.2178	6.7	2010	3.9485	9.5	0211	8.466892	16	0310
0.971487	5.4	1010	1.526735	6.8	21	3.557919	9.6	2022	8.585989	16	3102
1.364692	5.4	1010	1.557376	6.8	1010	2.610723	9.8	2021	6.0383	16.7	1031
1.416303	5.5	1010	2.556971	6.9	121	4.693055	10.2	2022	6.710963	17	1303
2.258808	5.6	1012	2.60557	7	112	3.669986	10.3	0201	9.891761	17	3203
1.673256	5.6	0101	1.697107	7.1	101	3.484947	10.5	0212	6.46551	17	3102
2.538639	5.6	2101	2.886103	7.2	1002	2.933796	10.7	2010	9.014359	18	2030
1.5665	5.8	1010	1.534632	7.4	1012	5.4694	10.8	2002	6.186498	18	0330
1.390393	5.8	1010	1.700213	7.45	2021	3.845797	10.8	2022	9.447612	18	3031
			2.595977	7.5	120	2.906316	10.8	0200	4.4144	18.7	0303
			1.498342	7.5	1102	3.834163	11	1021	10.671645	20	0303
						3.774044	11.1	2012	15.661037	20	3003
									11.474344	20	2031



شکل ۵-۱۴- تعیین مقدار ضریب زبری درزه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده ( $n=4$  و  $h=4$ )

روند مطالعه در شکل ۵-۱۵، نشان داده شده است. در این شکل در ستون راست، روند انجام تحقیق و دستیابی به مدل چرتکه‌ای با تعداد  $n$  ستون و  $h$  تعداد حالات پوشش دهنده ارتفاع هر ستون چرتکه نمایش داده شده است و در ستون چپ روند و چگونگی استفاده کاربر از مرحله برداشت سطح زبر درزه سنگ تا برآورد JRC ارایه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بازه تغییرات ضریب زبری درزه در رده‌های مختلف محدود بوده و در برخی رده‌ها از جمله رده  $C_{31}$  که بازه تغییرات نسبتاً بیشتری دارد ناشی از آزمایش‌ها و نمونه‌های محدود در دسترس برای این رده است.



الف- فرایند تحقیق و چگونگی دستیابی به مدل چرتکه ای      ب- روش استفاده از مدل چرتکه ای توسط کاربر

شکل ۵-۱۵- روند استفاده از مدل چرتکه ای

با مطالعه انجام شده، سطح زبر هر نوع درزه سنگ بدون هیچ گونه قضاوت شخصی - که این موضوع در روش های برآورد زبری مشاهده ای ایجاد خطای زیاد می نماید- بصورت استخراج داده های ارتفاعی هر ستون از چرتکه به یک رده از طبقه بندی ارایه شده منتسب می شود و مقدار عددی زبری درزه آن با استفاده از مطالعات آماری انجام شده به دست می آید.

رابطه خطی ۲-۵، بیانگر ارتباط بین رده های تعریف شده با مقادیر ضریب زبری درزه است. در این رابطه x (شماره رده) اعداد ۱ تا ۱۸ را به خود اختصاص می دهد که از عدد ۱ برای رده A<sub>11</sub> تا مقدار

عددی ۱۸ که بیان‌کننده رده C<sub>33</sub> است تعریف شده است. ضریب همبستگی در این رابطه ۰/۹۹ بدست آمده است.

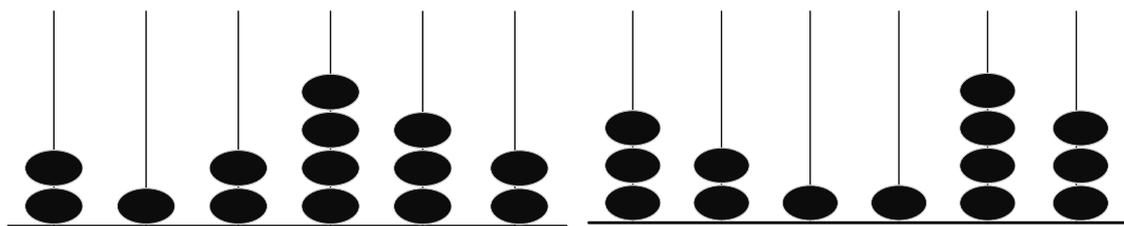
$$JRC = 0.876x + 2.57 \quad \text{و} \quad R^2 = 0.982 \quad (۲-۵)$$

با توجه به اینکه تحقیق حاضر برای نمونه‌های مختلف درزه‌سنگ ۱۰ سانتی‌متری صورت پذیرفته است بنابراین، رابطه اثر مقیاس ارایه شده توسط بارتن و باندیس (رابطه ۲-۳) می‌تواند برای درزه‌سنگ‌هایی با طول‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار بگیرد.

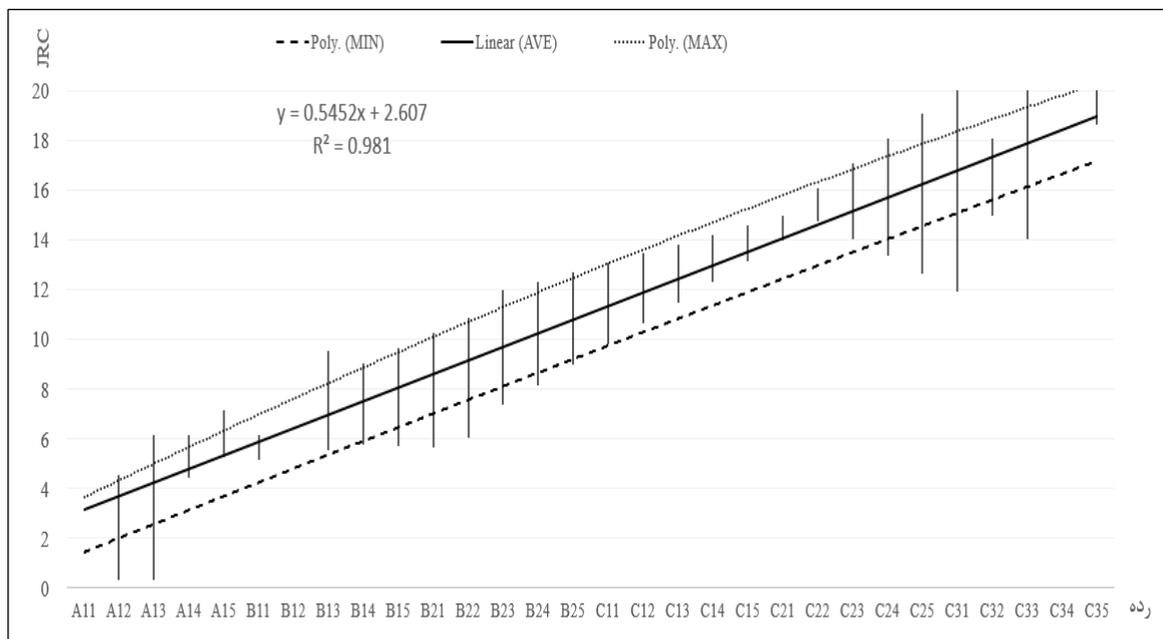
در ادامه تحقیق انجام شده، تعداد ستون‌های چرتکه به ۶ ستون با ۴ ارتفاع مختلف توسعه داده شده است. در شکل ۵-۱۶، دو مثال از نمونه‌های زبری حاصل از مدل تعریف شده آورده شده است. برای پوشش تمامی حالات ممکن برای زبری درزه، تعداد ۴۰۹۶ حالت محتمل به دست می‌آید که از تعداد حالات مذکور در این حالت نیز حالات قرینه، هم‌سطح، مکمل و سطوح با زبری یکسان حذف می‌شوند. از طرفی همچون عملیات انجام شده برای چرتکه با چهار ستون، در این حالت (چرتکه با ۶ ستون) عرض سطوح زبر برای نمونه‌های ۱۰۰ میلی‌متری درزه‌سنگ به ۶ قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت ارتفاع متناظر مشخص شده است. مدل‌های بدست آمده از حالات مختلف ممکن در تشکیل سطح زبر (مدل چرتکه‌ای ۶ ستونه با چهار ارتفاع مختلف) با نمونه‌های سطوح زبر واقعی تطابق داده شده و نتیجه بدست آمده در نمودار شکل ۵-۱۷، نشان داده شده است. در این شکل n تعداد ستون‌های چرتکه و h تعداد حالات پوشش دهنده ارتفاع هر ستون چرتکه است.

با در دست داشتن نمونه‌های سطح زبر که دارای مختصات سطح زبر بوده و تحت آزمایش برش مقادیر ضریب زبری درزه آنها مشخص شده‌اند، تطابق بین مدل‌ها و نمونه‌های سطح زبر درزه‌سنگ انجام شده است. بدیهی است تعداد ۱۱۲ نمونه در دسترس برای پوشش ۱۰۱۲ حالت ممکن کافی نخواهد بود، اما می‌توان روند افزایشی مقادیر زبری درزه با استفاده از مدل چرتکه‌ای ۶ با ۶ ستون را در توالی رده‌های این طبقه‌بندی نشان داد. در این شرایط نتایج حاصله، روند افزایش مشخصه‌های زبری درزه‌سنگ در

۱۷ رده از ۳۰ رده تعریف شده در طبقه‌بندی چرتکه‌ای ۶ ستونه را به وضوح نشان می‌دهد. در رابطه ۳-۵، ارتباط بین رده‌های انتخابی با مقادیر متناظر JRC ارایه شده است. ضریب همبستگی در این رابطه ۰/۹۹ به دست آمده است که بیان‌گر همبستگی خوب ناشی از روش طبقه‌بندی ارایه شده است. در این رابطه پارامتر x (شماره رده) مقادیر ۱ تا ۳۰ را برای رده‌های A<sub>11</sub> تا C<sub>35</sub> اختصاص می‌دهد. برای تکمیل و استخراج نتایج برای تمامی رده‌ها لازم است نمونه‌های خیلی بیشتری از سطوح زبر تحت آزمایش برش قرار گرفته و مقادیر JRC آنها مشخص شوند.



شکل ۵-۱۶- دو نمونه از سطوح زبر محتمل تشکیل شده با مدل چرتکه‌ای (n=۶ و h=۴)



شکل ۵-۱۷- تعیین مقدار ضریب زبری درزه بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده (n=۶ و H=۴)

$$JRC = 0.545x + 2.6 \quad \text{و} \quad R^2 = 0.981 \quad (۳-۵)$$

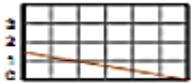
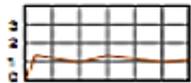
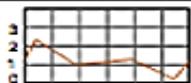
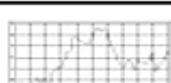
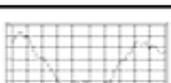
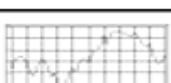
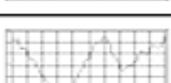
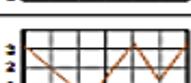
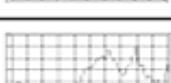
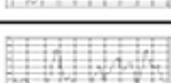
همان‌طور که بیان شد در این تحقیق از ۱۱۲ نمونه درزه‌سنگ برای مطالعات آماری طبقه‌بندی ارایه شده (مدل چرتکه‌ای) استفاده شده است. از این تعداد نمونه، ده نمونه مربوط به ده مقطع استاندارد

بارتن است. سطح درزه ده مقطع استاندارد بارتن در جدول ۴-۵، نشان داده شده است. در این جدول طبقه‌بندی حاصل از مدل چرتکه‌ای و اندیس‌های مربوطه نشان داده شده است. مقدار عددی جدول بارتن و مقادیر تخمینی از مدل چرتکه‌ای برای هر کدام از اندیس‌های ده مقطع استاندارد در این جدول نشان داده شده است.

لازم به تاکید است که در این طبقه‌بندی (مدل چرتکه‌ای) صرفاً از ۱۰ سطح درزه‌سنگ بارتن استفاده نشده است و برای این که مدل اعتبار بیشتری داشته باشد، از نمونه‌های بیشتر سطح درزه‌سنگ استفاده شده است. به عنوان مثال در رده  $A_{13}$  از ۱۲ نمونه درزه‌سنگ با سطح درزه مشخص (دارای مختصات) شامل مقادیر JRC مربوطه استفاده شده و بازه استخراجی برای این ۱۲ نمونه به عنوان مقدار تخمینی JRC برای اندیس مذکور در نظر گرفته شده است.

به عنوان مثال، مقطع سوم بارتن با کددهی مدل چرتکه‌ای به صورت ۰۱۰۱۱۰ تعریف شده و جزو رده  $A_{13}$  می‌باشد که با استفاده از این مدل مقدار ضریب زبری درزه بین ۴/۵ تا ۶/۱ بدست می‌آید. در واقع با چارچوب تعریف شده برای هر کدام از رده‌های این طبقه‌بندی، شکل‌های هندسی متفاوت اما با زبری مشخص می‌توانند تعریف شوند.

جدول ۴-۵- مدل چرتکه‌ای استخراج شده برای مقاطع استاندارد بارتن

Barton	Modelling	Classification	JRC Barton	ESTIMATED JRC BY ABACUS MODE
		A12 (000011)	0-2	2.8
		A11 (000001)	2-4	2.8
		A13 (010110)	4-6	4.5 - 6.1
		B13 (211101)	6-8	5.6 - 9
		B22 (002201)	8-10	6.1 - 10.8
		B24 (012210)	10-12	8.22-12.27
		C21 (100132)	12-14	14-14.9
		C23 (310213)	14-16	14.1-17
		C22 (202321)	16-18	14.8-16
		C34 (003030)	18-20	18.7

#### ۴-۵- جمع‌بندی

با بررسی پارامترهای کمی و روش‌های مشاهده‌ای در فصول پیشین، نیاز به بررسی اثر شکل درزه برای بهبود برآورد ضریب زبری درزه مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد با استخراج عملگر شکل که همانا ماهیت اصلی زبری درزه است، تخمین زبری درزه سنگ با دقت بهتری صورت می‌گیرد. با استفاده از مدل‌های هندسی معرف ارایه شده در این تحقیق، تمایز مناسبی بین مدل‌های تعریف شده بوجود آمده است که در واقع تاثیر شکل علاوه بر پارامترهای کمی تعیین زبری درزه مشهود بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب زبری درزه در مدل‌های هندسی مختلف متفاوت بوده و مقادیر ضریب

زبری درزه برای مدل‌های ۱ تا ۲۰ افزایش یافته است. بنابراین تاثیر مهم نوع شکل سطح بر میزان زبری درزه با استفاده از مقادیر ضریب زبری درزه اعتبار می‌یابد. روابط ارائه شده برای مدل‌های هندسی معرف تخمین بهتری از JRC با توجه به در نظرگیری هم‌زمان اثر شکل، ارتفاع و پارامترهای کمی به دست می‌دهد.

با استفاده از روش طبقه‌بندی چرتکه‌ای و با استفاده از نحوه تمایز ایجاد شده در رده‌های این مدل، پراکندگی نتایج حاصل در برآورد زبری درزه‌سنگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این طبقه‌بندی، اثرات قضاوت شخص در مورد تخمین مقدار زبری درزه حذف شده و به روشی ساده و با محاسباتی سریع می‌توان مقدار ضریب زبری درزه را مشخص نمود. در این تحقیق برای مقایسه این مدل با روش پارامترهای کمی تعیین زبری بر اساس داده‌های گردآوری شده، ضرایب همبستگی پارامترهای کمی از جمله پارامترهای  $R_q$ ،  $MSV$ ،  $Z_2$  و  $SF$  محاسبه شده است که مقادیر آن به ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۰/۸۷، ۰/۹۳ و ۰/۹۳ است. با توجه به این که مدل چرتکه‌ای از چندین پارامتر به صورت هم‌زمان برای رده‌بندی و تعیین زبری درزه‌سنگ استفاده می‌نماید، بنابراین دارای ضریب همبستگی بیشتری نسبت به سایر پارامترهای کمی است. از آن جایی که با استفاده از پارامترهای کمی بازه مقدار تخمینی JRC گاه به دو برابر می‌رسیده است، در این روش (مدل چرتکه‌ای) پراکندگی داده‌های حاصله کم شده است. ضریب همبستگی در این روش ۰/۹۹ بدست آمده است.



# فصل ششم: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۶-۱- جمع بندی

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق مشخص شده است که روش‌های کمی تعیین زبری درزه‌سنگ مقادیر ضریب زبری درزه را با خطای بالا برآورد می‌کنند. این خطاها ناشی از نحوه تعریف رابطه پارامترهای کمی است. به عبارت دیگر، پارامترهای کمی تعیین زبری نمی‌توانند تعریف جامعی از سطح درزه را ارائه نمایند. طی انجام این تحقیق، لزوم در نظرگیری ارتفاع کلی سطح درزه، شیب سطح درزه و شکل هندسی درزه با اهمیت بالا ارزیابی شده است. نیاز به لحاظ کردن عوامل موثر برای بهبود برآورد زبری درزه در این تحقیق احساس شده و از این رو نسبت به جستجوی روشی برای حل این موضوع اقدام شده است. دو روش برای برآورد بهتر ضریب زبری درزه پیشنهاد شده است. در روش اول، با بررسی جامعه آماری اشکال هندسی درزه‌سنگ نسبت به تعریف مدل‌های هندسی با فراوانی بیشتر اقدام شده است. مدل‌های هندسی معرف تفکیک مناسبی بین وضعیت سطح درزه در نمونه‌های تحت مطالعه ایجاد نموده است. با توجه به تمایز ایجاد شده در این اشکال، مدل‌های هندسی مربوطه اولویت‌بندی شده‌اند. با اعتبارسنجی این مدل‌ها توسط سطوح درزه‌سنگ دارای مقادیر JRC متناظر، اثر شکل سطح درزه وارد معادلات تخمین ضریب زبری درزه شده است. از این رو، برای دستیابی به مقادیر صحیحی از ضریب زبری درزه لازم است ابتدا شکل سطح درزه مورد بررسی قرار گرفته و سپس از پارامترهای کمی برای تخمین JRC اقدام نمود. در روش دوم، از یک روش ابتکاری (طبقه‌بندی چرتکه‌ای) برای طبقه‌بندی سطح درزه‌سنگ با لحاظ کردن عوامل موثر در بیان زبری درزه استفاده شده است. در این روش پارامترهایی همچون اختلاف ارتفاع، بیشینه ارتفاع و تکرار اختلاف ارتفاع‌ها، سطوح درزه‌سنگ را متمایز ساخته و با نحوه کدگذاری ارائه شده می‌توان به زبری درزه‌سنگ دست یافت. مزیت این روش عدم دخالت قضاوت‌های شخصی، سادگی، سهولت و سرعت در دستیابی به زبری درزه‌سنگ با مقدار خطای کمتر نسبت به سایر روش‌های کمی و مشاهده‌ای است.

## ۲-۶- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه حاضر که به بررسی آماری هندسه درزه به منظور برآورد زبری درزه‌سنگ پرداخته است نتایج زیر اخذ شده است:

- شکل هندسه درزه تاثیر بسیار مهمی در نحوه خصوصیت‌دهی و استخراج پارامتری زبری درزه‌سنگ دارد. با بررسی شکل هندسه درزه‌سنگ در نمونه‌های مختلف گردآوری شده و بررسی پارامترهای کمی تعیین زبری، وجوه تمایز مناسبی بین شکل‌های هندسی در تخمین ضریب زبری درزه‌سنگ ایجاد شده است.

- غالب پارامترهای کمی تعیین زبری دارای ضعف در تخمین مقادیر JRC هستند. برخی از پارامترهای کمی همچون SF و  $Z_2$  همبستگی بهتری نسبت به سایر پارامترهای کمی زبری درزه با JRC دارند.

- پارامتر کمی  $R_{TH}$  در این تحقیق تعریف شده است و نسبت به سایر پارامترهای کمی تعیین زبری از جمله پارامترهای با ضریب همبستگی بیشتر با JRC است. ضریب همبستگی این پارامتر در محدوده ضرایب همبستگی دو پارامتر SF و  $Z_2$  قرار دارد و به عنوان پارامتری مفید در بررسی‌های کمی زبری درزه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- در مورد پارامترهای کمی تعیین زبری، ضرایب همبستگی حاصل از این تحقیق نسبت به ضرایب همبستگی که توسط محققین پیشین ارائه شده است کمی کاهش می‌یابد. علت این موضوع بدلیل استفاده از جامعه آماری بیشتر در این مطالعات است. برای دستیابی به دقت در بررسی اثر شکل هندسی درزه، لازم است داده‌ها از مناطق مختلف برداشت و مورد مطالعه قرار گیرد. صرف استناد به ۱۰ یا ۲۰ نمونه برای بررسی پارامترهای شکل و پارامترهای کمی نتایج را با دقت کمتر مواجه خواهد ساخت.

- با استفاده از دوربین تصویربرداری مناسب و به کارگیری روش فتوگرامتری برد کوتاه و با طراحی مناسب شبکه فتوگرامتری، دقت‌های مورد نظر برای برداشت سطوح زبر درزه‌سنگ به میزان

۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی متر بدست می آید. که این میزان دقت برای مطالعه سطوح درزه سنگ کفایت لازم را دارد. لازم به ذکر است روش فتوگرامتری برد کوتاه این قابلیت را دارد تا در دقت‌های بیشتر از این نیز در صورت نیاز کاربر به دستیابی به جزئیات بیشتر عمل نماید که مستلزم تجهیز دوربین‌های خاص و هزینه بالاتر است.

- با توجه به اثر شکل هندسی درزه، که تمام شاخصه‌های آن را نمی‌توان توسط پارامترهای کمی زبری تعیین نمود، با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، ابتدا باید شکل عمومی سطح درزه‌سنگ با یکی از شکل‌های هندسی معرف (مدل‌های هندسی معرف تعریف شده در این تحقیق) تطبیق داده شده و پس از مشخص شدن گروه شکلی آن از پارامتر کمی زبری استفاده نمود. در این حالت خطاهای حاصل از بازه گسترده مقادیر JRC نسبت به پارامتر کمی زبری، محدود خواهد شد. در این روش، مدل‌های هندسی معرف جدایش مناسبی در مقادیر ضریب زبری درزه ایجاد می‌نمایند.

- در این تحقیق یک روش طبقه‌بندی موسوم به مدل چرتکه‌ای ارائه شده است که خصوصیات هندسی سطح درزه (زبری) همچون ارتفاع بیشینه، اختلاف ارتفاع و تکرارپذیری اختلاف ارتفاع‌ها که از مشخصه‌های اصلی سطح زبر هستند در قالب یک رده‌بندی جامع تعریف شده و دستیابی به زبری درزه‌سنگ به صورت چندپارامتری و با استفاده از یک روند منطقی صورت پذیرفته است. ضریب همبستگی در مدل چرتکه‌ای با توجه به جامعه آماری مطالعه بیش از ۰/۹۹ بدست آمده است. این ضریب همبستگی بیشتر از ضرایب همبستگی ناشی از پارامترهای کمی همچون  $Z_2$ ، SF، Rp، Rq و  $R_{TH}$  است.

- با نتایج بدست آمده از روش مدل چرتکه‌ای، سطح زبر هر نوع درزه‌سنگ بدون هیچ‌گونه قضاوت شخصی - که این موضوع در روش‌های برآورد زبری مشاهده‌ای ایجاد خطای زیاد می‌نماید - بصورت استخراج داده‌های ارتفاعی هر ستون از چرتکه به یک رده از طبقه‌بندی ارائه شده منتسب می‌شود و مقدار عددی زبری درزه بدست می‌آید.

### ۳-۶- پیشنهادها و آرایه زمینه‌های کاری آتی

بر اساس روش برداشت آرایه شده در این تحقیق و با توسعه دوربین‌های عکاسی همچون دوربین تلفن‌های همراه که روز به روز به کیفیت آنها افزوده می‌شود، فرایند برداشت سطح زبر درزه و دستیابی به مقدار عددی ضریب زبری درزه با سهولت بیشتر و سریع‌تر می‌تواند صورت پذیرد. پیشنهاد می‌گردد بر اساس مدل‌های آرایه شده در این تحقیق، کد نرم‌افزاری پردازش و تطبیق تصاویر سطح درزه با مدل‌های هندسی معرف یا کدهای طبقه‌بندی مدل چرتکه‌ای نگارش یابد تا پس از برداشت تصاویر از سطح درزه‌سنگ با سرعت بهتری به مقدار ضریب زبری درزه دست یافت.

بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق ضریب زبری درزه با دخالت عامل شکل درزه بدست می‌آید. برای تکمیل مطالعات، دستیابی به داده‌های بیشتری از سطوح زبر درزه‌سنگ حاوی مقادیر ضریب زبری متناظر، به مدل‌های هندسی مطالعه حاضر اعتبار بیشتری خواهد بخشید. چرا که برای برخی شکل‌های هندسی تعداد نمونه زیادی انطباق نیافت. کاهش انطباق‌ها بیشتر در نمونه‌هایی با ارتفاع بیش از ۱ سانتی‌متر و با تعداد زیاد دندان‌ها مشاهده شده است که نیازمند کارهای تکمیلی در این خصوص است. در مدل چرتکه‌ای آرایه شده با افزایش تعداد ستون‌ها ( $n$ ) و تقسیم‌بندی در طول درزه ( $\Pi$ )، میزان دقت مدل نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع منوط به در اختیار داشتن تعداد نمونه‌های بیشتری از سطوح درزه‌سنگ دارای مقادیر ضریب زبری درزه است. بنابراین با در اختیار داشتن نمونه‌های بیشتری از داده‌های حاوی مختصات سطح و مقدار عددی JRC، با توجه به منطق مدل آرایه شده می‌توان به دقت بالاتری از مدل دست یافت.

## مراجع

- اسماعیلی ف و عبادی ح، (۱۳۹۴)، کاربرد فتوگرامتری برد کوتاه در سنجش تغییر شکل بدنه اتومبیل در اثر برخورد با مانع، اولین کنفرانس مهندسی اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، دانشکده نقشه برداری.
- باباپور ه و توکلی پ، (۱۳۸۶)، بررسی دقت فتوگرامتری برد کوتاه در مدل سازی تجهیزات صنعتی، همایش ژئوماتیک، تهران، سازمان نقشه برداری کشور
- رفیعی م و کاظمی ف، (۱۳۹۴) رفتارسنجی سازه های ساختمانی با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه، هشتمین همایش مقررات ملی ساختمان، شیراز.
- رفیعی م و کاظمی ف، (۱۳۹۴) رفتارسنجی سازه های ساختمانی با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه، هشتمین همایش مقررات ملی ساختمان، شیراز.
- شاه کرمی ع و تقی پور س، (۱۳۸۱) مکانیک سنگ رفتار برشی درزه های سنگ (پایداری و تغییر شکل پذیری)، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، ISBN 964-6096-54-9.
- امینی ا، ورشوساز م، سعادت سرشت م، (۱۳۸۵)، بررسی تاثیر پارامترهای رابطه اساسی طراحی شبکه بر دقت نهایی فتوگرامتری برد کوتاه
- قاسمی ب، عبادی ح، فرنود ا و فرشید ط، (۱۳۹۴)، پیاده سازی یک سیستم فتوگرامتری جهت هدایت و کنترل اعمال جراحی ترمیمی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، دانشکده نقشه برداری
- وتوکوری وی. اس.؛ کاتسویاما، ک.، درآمدی بر مکانیک سنگ، ترجمه محمد فاروق حسینی، نشر کتاب دانشگاهی، ۱۹۹۴، ISBN 964-6904-10-6
- Amadei B, Wibowo J, Sture S, Price RH, (1998). Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions. *Geotech Geo Eng*, 16, 79-128.
- Asadollahi P, Tonon F. (2010). Constitutive model for rock fractures: revisiting Barton's empirical model. *Engineering Geology*. 113, 11-32.
- Barton N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Eng Geol*;7;287-332.
- Barton N, Choubey V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*; 10:1-54.
- Brown ET. (1981). *Rock characterization testing and monitoring (ISRM suggested methods)*. Oxford: Pergamon;
- Bandis S.C. Engineering properties and characterization of rock discontinuities. *Comprehensive rock engineering*, vol. 1, Hudson (ed), Pergamon press, pp 1-54.
- Barton N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; 13(9):255-79.
- Belem T, Homand-Etinne F, Souley M. (2000). Quantitative parameters for rock joint roughness. *Rock Mech. And Rock Eng*. 33(4), 217-242.
- Coggan J. C, Pine R. J, Stead D, Rance J., (2003), Numerical modeling of brittle rock failure using a combined finite-discrete element approach: Implications for rock engineering design. In

- ISRM technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, SAIMM Symposium Series; 2003, S33: 211-218.
- Cundall P. A., UDEC, (1980). A generalized distinct element program for modelling jointed rock. Report PCAR-1-80, Peter Cundall Associates, European Research Office, U.S. Army Corps of Engineers.
- Cundall P. A, Marti J., Beresford P. J., Last N. C. Assgian M. M., (1978). Computer modeling of jointed rock masses. Technical Report N-78-4. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Du H, Gao H, Hu Y, Huang M, Zhao H, (2015). A New Method for Determination of Joint Roughness Coefficient of Rock Joints. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi Publishing Corporation.
- Da Silveira A, Rodrigues F, Grossmann N, Mendes F., (1966). Qualitative characterization of the geometric parameters of jointing in rock masses. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> international congress on rock mechanics.*; p. 287–304.
- Dershowitz W. S., (1992). Interpretation and synthesis of discrete fracture orientation, size, shape, spatial structure and hydrologic data by forward modeling. *Proc. ISRM Regional Conf. on Fractured and Fractured Rock Masses (Preprints)*, pp. 680–687.
- El-Soudani SM. (1978). Profilometric analysis of fractures. *Metallography*; 11:247–336.
- Eberhardt E, Stead D, Coggan J. S, (2004). Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes – the Randa rock slide. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1):69–87.
- Einstein H. H, Baecher G. B., (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology – specific methods and examples. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16:39–72.
- Fardin N, Stephansson O, Jing L, (2004). “The scale dependence of rock joint surface roughness,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.38, no.5, pp.659–669,2001.
- Fardin N.; Feng Q. and Stephansson, 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, pp. 329–335.
- Fardin N. Stephenson O. and Jing L. (2001). “The scale dependence of rock joint surface roughness”. *Int. J. Rock Mech. Sc. Geomech. Abstr.* vol., 38: 659-669.
- Grasselli G. (2001). *Shear Strength of Rock Joints based on Quantified Surface Description*. Ph.D. Thesis n.2404.
- Grasselli G., Wirth J. (2002). Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing.
- Grün A. Niederer P (1990). Photogrammetry and remote sensing in medicine biostereometry and medical imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 45(4): p. i-iv.
- McQuaid G, Millar P, use of close range photogrammetry to assess the micro- texture of asphalt surfacing aggregate, *International Journal of Pavements Conference*, São Paulo, Brazil
- Hack H. R. G. K. (1998): *Slope stability probability classification (2nd edition)*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), No. 43, Enschede, The Netherlands, 258pp.
- Haberfield C.M. Johnston, I.W. (1994). A mechanistically based model for rough rock joints. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*; Vol. 31, No. 4, pp. 279-292.

- Haberfield C.M, Seidel J.P. (1998). Some recent advances in the modeling of soft rock joints in direct shear. roc. Int. Conf. Geomech/Ground Control in Mining & Underground Construction, University of Wollongong press, ol. 1, pp. 71-84.
- Hoek E. (1983). Strength of jointed rock mass, *Geotechnique*, 33, pp. 178-233.
- Hudson J. A, Fairhurst C., (1969). Tensile strength, Weibull's theory and a general statistical approach to rock failure. In: Proceedings of the Southampton 1969 civil engineering materials conference, p. 901-14.
- Hudson J. A, Priest S. D.; (1983), Discontinuity frequency in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20 (2), 73-89.
- Hudson J. A. and Priest S. D., (1979). Discontinuities and rock mass geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*; 16:339-362.
- Indraratna B, Haque A. (2000). *Shear Behavior of Rock Joints*. Rotterdam: A.A. Balkema, P.O.Box 1675, 3000BR Rotterdam, Netherlands.
- Indraratna B, Haque A, (2000). *Shear behavior of rock joints*. Balkema, Rotterdam.
- ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978). 'Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Vol. 15, pp. 319-368.
- Ivanova V, (1995). Three-dimensional stochastic modeling of rock fracture systems. M.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA.
- Jang H, Jang B, (2014). New Method for Shear Strength Determination of Unfilled, Unweathered Rock Joint, *International Journal of Rock Mechanics*.
- Jang B., Park H. (2006). A new method for determination of joint roughness coefficient. IAEG.
- Jing L, Nordlund E, Stephansson O, (1992). An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints. *Int. J Rock Mech. Min Sci Geomech Abstr*, 29, 535-42.
- Jing L., (1990). Numerical modeling of jointed rock masses by distinct element method for two and three dimensional problems. Ph.D. Thesis:90 D, Lulea ° University of Technology, Lulea °, Sweden, 1990.
- Kulatilake PHSW, Shou G, Huang T H, Morgan R M. (1995). New peak shear strength criteria for an isotropic rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*;32:673-97.
- Kishida K., T. Adachi and K. Tsuno. (2001). Modeling of the shear behavior of rock joints under constant normal confining conditions.
- Kodikara J.K. Johnston I.W. (1994). Shear behaviour of irregular triangular rock-concrete joints. *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, Vol. 31, No. 4, pp. 313-322.
- Kulatilake PHSW, Shou G, Huang T H, Morgan R M. (1995). New peak shear strength criteria for an isotropic rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; 32:673-97.
- Laubscher D. H. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *JS Afr. Inst. Metall*, 90(10), 267-273.
- Ladanyi B., and Archambault G., (1969). Simulation of shear behavior of a fractured rock mass. Chapter 7 in *Rock mechanics – theory and practice* (Proc. 11th US Symp. of Rock Mech., Berkeley, June 1969), pp. 105-125.

- Ladanyi B., Archambault G. (1970). Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass. Proc. 11<sup>th</sup> Symp. Rock Mech. (AIME), pp 105-125
- Lanaro F, Jing L. and Stephansson O., (1998). 3-D-laser measurements and representation of roughness of rock fractures. In: Rossmannith, H.-P. (ed.), Proc. of the Int. Conf. on Mechanics, Jointed and Faulted Rock, MJFR-3, Vienna, Austria, pp. 185–189. Balkema, Rotterdam.
- Lee Y. H., Carr J., & Hass C. J. (1990). The fractal dimension as a measure of roughness of rock discontinuity profile. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 27(6): 453-464.
- Li Y, Zhang Y. (2015). Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 77 -27-35.
- Lin H., Ping C, Young Z. (2010). Numerical simulation for direct shear test of joint in rock mass. *I.J Image Graphics and signal processing*, 1, 39-45.
- Maerz NH, Franklin JA, Bennett CP. (1990). Joint roughness measurement using shadow profilometry. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; 27:329–43.
- Muralha J., Pinto da Cunha A. (1990). Analysis of scale effects in joint mechanical behavior. *Scale Effects in Rock Masses*, Pinto da Cunha (ed.) Balkema, 191-200.
- Myers N. O. (1962). Characteristics of surface roughness. *Wear*. 5:182~189.
- Nilson M, Edelbro C, Sharrock G, (2012). “Small Scale joint surface roughness evaluation using digital photogrammetry”. *Eurock*.
- Patton FD. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. In: *Proceedings of the 1st international congress on rock mechanics*, vol.1, Lisbon, p.509-13.
- Priest S. D., (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall, London.
- Plesha M. E., (1987). Constitutive models for rock fractures with dilatancy and surface degradation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 11(4):345–362.
- Rasouli V., Harrison J. P. (2001). In-plane analysis of fracture surface roughness: anisotropy and scale effect in anisotropy. *Rock mechanics in the national interest*, Ellsworth, et al. (eds), Swets & Zeitlinger, pp.777-783.
- Rahman Z., Slob S. and Hack R. (2006). Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data, *IAEG2006 Paper number 437*.
- Saeb S. Amadei B. (1992). Modeling of rock joints under shear and normal loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr*, 29, pp. 267-278.
- Sayles RS, Thomas RR. The spatial representation of surface roughness by means of the structure functions, a practical alternative to correlation. *Wear* 1977; 42:263–76.
- Shirkhani A, (2007). *Evaluation of Close Range Photogrammetry in dam 3D Measurements*. MSc thesis, K.N.Toosi University Of Technology.
- Sakaguchi K, et al., (2008). Asperity height and aperture of an artificial tensile fracture of metric size. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 41pp 325-341.
- Scaioni M, Barazzetti L, *Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation, Application of surveying in land management*, 12145-014-015, Springer,
- Skinas CA, Bandis SC, Demiris CA, (1990). Experimental investigations and modeling of rock joint behavior under constant stiffness. In *Proc. Rock Joints*. Loen, Norway, pp. 301-8.

- Skinas C.A., Bandis S.C. and Demiris C.A. (1990). Experimental investigations and modeling of rock joint behaviour under constant stiffness, in Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Trondheim, Norway, Barton, N. and Stephansson, O. (eds), Balkema, A. A., Rotterdam, pp.301-8.
- Stephansson O. (ed.), (1985). Fundamentals of rock joints (Proc. of Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden, September 15–20, 1985). CENTIK Publishers, Luleå, Sweden.
- Stephansson O. and Jing L., (1995). Mechanics of rock joints: Experimental aspects. In: Selvadurai, A.P.S. and Boulon, M. J. (eds), Mechanics of geomaterial interfaces, pp. 317–342. Elsevier, Amsterdam.
- Su S., (2004). Effect of fractures on in situ rock stresses studied by the distinct element method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; 41:159–164.
- Sturzenegger M., Stead D. (2009). Close range Terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts, Engineering Geology, 106, 163-182.
- Tse R, Cruden DM. (1979). Estimating joint roughness coefficients. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr; 16:303–7.
- Tesfamariam E.K., (2007). Comparing discontinuity surface roughness derived from 3D terrestrial laser scan data with traditional field-based methods.
- Unala M., Yakar M., Yildiz F. (2004). Discontinuity surface roughness measurement techniques and evaluation of digital photogrammetric method. XXth ISPRS congress. Istanbul.
- Van Sint Jan, M.L. (1990). Shear tests of model rock joints under stiff normal loading, Rock joints: proceeding of the International Symposium on Rock Joints (Barton, N. and Stephansson, O., Eds.), Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam; Brookfield, pp.323-328.
- Wei Gong L, Nan L, (2015). Research on 3D tunnel modeling based on close-range photogrammetry, Advanced materials research, Vols 1073-1076 pp 1934-1940, Trans Tech Publications, Switzerland.
- Wang Q. (1982). Study on determination of rock joint roughness by using elongation rate R. In: Proceedings of the underground constructions. Jinchuan, China; p. 343–348.
- Wakabayashi N, Fukushige I. (1995). Experimental study on the Relation between fractal dimension and shear strength. Fractured and jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman & Tsang (eds). Balkema. Rotterdam, ISBN 9054105917: 125-131.
- William K. P, Haneberg C, (2001). Photogrammetric and LIDAR 3-D Rock Slope Discontinuity Mapping and Interpretation Surveys to Improve Baseline Information for Supporting Design and Construction of Capital Improvement Projects at Hydroelectric Facilities. American Rock Mechanics Association.
- Wu T. H. & Ali E. M. (1978). Statistical Representation of the joint roughness. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.15:259-262.
- Yang ZY, LoSC DiCC. (2001). Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using  $Z_2$ . Rock Mech Rock Eng 2001; 34:243–51.
- Yang ZY, LoSC, DiCC. (2001). Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using  $Z_2$ . Rock Mech Rock Eng 2001; 34:243–51.

Yang Z. C. Di, (2001). a directional method for directly calculating the fractal parameters of joint surface roughness.

Yu XB, Vayssade B. (1991). Joint profiles and their roughness parameters. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; 28:333–6.

```

Option Explicit
Sub JCR()
Dim h, n, size_h As Variant
Dim row_num, sym_row, supp_row, ave As Variant
Dim i, ii, j, k As Variant
Dim stdev As Variant
ActiveSheet.UsedRange.ClearContents
h = Array(0, 1, 2, 3)
n = 4
size_h = UBound(h) - LBound(h) + 1
'Cells(2, n + 3).Value = size_h
row_num = Application.WorksheetFunction.Power(size_h, n)
'Cells(2, n + 4).Value = row_num
'Dim counter() As Integer
'ReDim counter(1 To n, 1 To row_num) As Integer
For i = 1 To row_num
For j = 1 To n
Cells(i + 1, n - j + 1) = h(0)
Next j
Next i
Dim q() As Variant
ReDim q(1 To row_num, 1 To n) As Variant
Dim m() As Variant
ReDim m(1 To row_num, 1 To n) As Variant
For i = 1 To row_num
k = 1
ii = i - 1
sym_row = 0
Do
q(i, k) = Int(ii / size_h)
m(i, k) = ii - q(i, k) * size_h
Cells(i + 1, n - k + 1) = m(i, k)

```

```

ii = q(i, k)
sym_row = m(i, k) * WorksheetFunction.Power(size_h, n - k) + sym_row
k = k + 1
Loop Until ii = 0
Cells(i + 1, n + 2) = sym_row + 2
Next i
For i = 1 To row_num
stdev = WorksheetFunction.stdev(Range(Cells(i + 1, 1), Cells(i + 1, n)))
If Cells(i + 1, n + 2) = i + 1 And stdev = 0 Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 2), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 2)) = Range(Cells(i + 1, 1),
Cells(i + 1, n)).Value
ElseIf Cells(i + 1, n + 2) >= i + 1 Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 1), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 1)) = Range(Cells(i + 1, 1),
Cells(i + 1, n)).Value
ElseIf Cells(i + 1, n + 2) < i + 1 Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 2), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 2)) = Range(Cells(i + 1, 1),
Cells(i + 1, n)).Value
End If
Next i
For i = 1 To row_num
supp_row = 0
For j = 1 To n
supp_row = (h(size_h - 1) - Cells(i + 1, n - j + 1)) * WorksheetFunction.Power(size_h, j - 1) +
supp_row
Next j
Cells(i + 1, n + 3) = supp_row + 2
Next i

For i = 1 To row_num
If Cells(i + 1, n + 3) > i + 1 Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 3), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 3)) = Range(Cells(i + 1, 1 +
5 + (n + 1) * 1), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 1)).Value
ElseIf Cells(i + 1, n + 3) < i + 1 Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 4), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 4)) = Range(Cells(i + 1, 1 +
5 + (n + 1) * 1), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 1)).Value

```

```

End If
Next i
Dim zv As Range
For i = 1 To row_num
Set zv = Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 3), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 3)).Find(0)
If zv Is Nothing Then
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 6), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 6)) = Range(Cells(i + 1, 1 +
5 + (n + 1) * 3), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 3)).Value
Else
Range(Cells(i + 1, 1 + 5 + (n + 1) * 5), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 5)) = Range(Cells(i + 1, 1 +
5 + (n + 1) * 3), Cells(i + 1, n + 5 + (n + 1) * 3)).Value
End If
Next i
Cells(1, 1).Value = "nums" & "(total=" & row_num & ")"
Cells(1, n + 2).Value = "sym. row num"
Cells(1, n + 3).Value = "supp. row num"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 1).Value = "nums without sym." & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 1)) & ")"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 3).Value = "nums without sym. & supp." & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 3)) & ")"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 5).Value = "nums without sym. & supp. & comp." & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 5)) & ")"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 2).Value = "syms" & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 2)) & ")"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 4).Value = "supp." & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 4)) & ")"
Cells(1, 1 + 5 + (n + 1) * 6).Value = "comp." & "(total=" &
WorksheetFunction.CountA(Columns(1 + 5 + (n + 1) * 6)) & ")"
End Sub

```

# Determination of Roughness using Statistical Modeling of Rock Joint Geometry

## Abstract

Several researchers tried to investigate rock joint roughness by simplification and applying related assumptions. In Barton and Laubscher's presented methods the rock joint has to be compared visually with typical models which related to predefined number of roughness. Several researchers also used statistical methods considering quantitative estimations. Visual methods are simple and user friendly but they are subjected to errors which is related to judge in achieving best fits and distinction the amount of roughness of one joint to another. In quantitative methods applying one quantitative parameter can't accurately express the all specification of joint roughness. In this research two methods have been proposed in order to determine joint roughness coefficient by applying the shape of joint. In first method, by gathering rock joints surface data include 203 samples from site investigations and literatures its tried to define all probable geometry of rock joints. The shapes of probable geometries have been studied and shapes with more frequency introduced in 20 geometry model named representative geometry model (RGM). The representative geometry models have been evaluated and categorized with quantitative parameters such as  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $Z_2$  and SF. In this category, by comparing the rock joint surface with RGM's and considering parameter K the more accurate estimation of Joint roughness coefficient can be achieved. In second method, by statistical study of the condition of rock joints surface in 10 centimeter length a new category proposed for rock joint roughness. The surface of rock joint divided in four parts and for each part four level of height considered and accordingly 256 probable cases of roughness surface have been achieved. These probable cases presented in a new category named Abacus category that cover all probable kinds of rock joints. In this method, several groups of the presented category have been categorized by considering of maximum height of surface, differences of adjacent heights and frequency of adjacent height differences. The presented groups in this category by using an appropriate data (112 samples) of roughness joints which gathered from literatures have been attributed to joint roughness coefficient (JRC). The category also has been developed for six columns and results have been presented. In this model, Equations display higher correlation coefficients (0.99). By applying the category which proposed in this research, the amount of JRC can be achieved in a simple way, short time and with appropriate accuracy.

**Keywords:** Rock joint, Roughness, Joint roughness coefficient, Quantitative roughness parameters, Representative geometry model, Abacus category.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**Ph.D. Thesis in Mineral Exploitation**

**Determination of Roughness Using Statistical  
Modeling of Rock Joint Geometry**

**By: Alireza Talebinezhad**

Supervisors:

**Dr. Seyyed Mohammad Esmaeil Jalali**

**Dr. Reza Khaloo Kakaei**

September 2018