

## بررسی خصوصیات ناپیوستگی‌ها به منظور تولید مدل شبکه گسسته شکستگی - مطالعه موردی: مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان

عباس کمالی بندپی<sup>۱</sup>

کوروش شهریار\*<sup>۲</sup>

مصطفی شریف زاده<sup>۳</sup>

پرویز معارف وند<sup>۴</sup>

### چکیده

یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه تأثیر سیستم ناپیوستگی‌ها بر روی توده سنگ، تولید مدل شبکه گسسته شکستگی بر مبنای خصوصیات هندسی و فیزیکی آن‌ها است. در این مقاله خصوصیات ۶۳۹ ناپیوستگی برداشت‌شده به وسیله روش‌های نمونه‌برداری خطی و سطحی مربوط به مغار نیروگاه طرح رودبار مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده و تصحیح انواع سو یافتگی (اریب)، یک لایه‌بندی به همراه سه دسته درزه در منطقه وجود دارد. فعالیت‌های تکتونیکی و راستای تنش‌های اصلی در منطقه سبب شده است که برای هر یک از خصوصیات طول اثر و فاصله‌داری، تابع چگالی احتمال آن‌ها با توجه به ژنتیک دسته درزه‌ها با یکدیگر متفاوت باشند. نتایج خواص فیزیکی دسته درزه‌ها نیز مؤید این موضوع است. میانگین طول اثر محاسبه شده به روش خط برداشت و روش سطحی برای یک دسته درزه کاملاً به هم نزدیک و برای دسته درزه دیگر ۲۶ درصد متفاوت است. اختلاف چگالی واقعی بین پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی برای دسته‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب ۷ و ۱۵ درصد است. اختلاف بین شدت واقعی و ظاهری در حالت پنجره دایره‌ای برای دو دسته مذکور به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد است. همچنین محاسبه شدت حجمی به روش‌های مختلف نشان می‌دهد که برآورد این خصوصیت در منطقه بسیار مشکل است.

### واژه‌های کلیدی

ناپیوستگی، خصوصیات هندسی و فیزیکی، مغار، تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان.

۱. دانشجوی دوره دکتری مکانیک سنگ، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲. استاد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. k.shahriar@aut.ac.ir.

۳. دانشیار، دانشکده معدن و متالورژی، مدرسه معدن استرالیای غربی، دانشگاه کرتین، استرالیا.

۴. دانشیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

## مقدمه

بسیار متغیر است و یا هنگامی که درجه اطمینان بالاتری برای طراحی نیاز باشد اندازه‌گیری بیشتری نیاز است (پرست<sup>۸</sup>، ۱۹۹۳). با توجه به عدم قطعیت در داده‌های برداشت‌شده روش‌های متعددی برای تصحیح خطاهای نمونه‌برداری توسعه داده شده است؛ بنابراین، تصحیح انواع خطاها بر روی پارامترهای شیب، جهت شیب، فاصله‌داری<sup>۹</sup>، فراوانی و طول ناپیوستگی‌ها انجام شده است. از طرف دیگر به علت طبیعت ناهمگن و تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده سنگ، انجام آنالیزهای آماری لازم است (هوک<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۸). انجام آنالیزهای عدم قطعیت و احتمالاتی بر روی داده‌ها به همراه نگرش زمین‌ساختاری می‌تواند منجر به اخذ خصوصیات قابل اعتماد برای ناپیوستگی‌ها شود. از این رو، با توجه به ماهیت ذاتی آماری هندسه ناپیوستگی‌ها، تحلیل آماری بر روی داده‌های تصحیح شده، انجام گردید. همچنین پارامترهای ثابت فیشر<sup>۱۱</sup> و مقادیر شدت (خطی، سطحی و حجمی) و چگالی سطحی برای هر دسته ناپیوستگی محاسبه گردید.

## مواد و روش‌ها

مهم‌ترین مرحله در بررسی نفوذپذیری، تغییر شکل و پایداری توده سنگ، تعریف دقیق شبکه ناپیوستگی‌ها (ساخت مدل هندسی) بر اساس خصوصیات هندسی بیان شده در جدول (۱) است؛ بنابراین درک صحیح و برداشت خصوصیات هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌ها برای ساخت مدل‌های هندسی و مکانیکی توده سنگ لازم است. مدل‌های هندسی توده سنگ شامل اندازه بلوک، شکل بلوک، قفل‌شدگی بلوک‌ها، اتصال ناپیوستگی‌ها و طبقه‌بندی ساختاری توده سنگ هستند. از این رو موضوع توصیف دقیق سه‌بعدی ساختار توده سنگ همیشه از چالش‌های مهم محققین است. در این راستا شبکه گسسته شکستگی (DFN)، می‌تواند سیستم شکستگی توده سنگ را به روش‌های آماری مدل‌سازی نماید. مدل DFN با ایجاد یک

ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ تأثیر بسزایی بر روی تغییر شکل، مقاومت، رابطه تنش و کرنش و شکست توده سنگ دارند (بی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)؛ بنابراین به منظور بررسی رفتار توده سنگ و تعیین اندرکنش سازه‌ها با آن علاوه بر خواص فیزیکی ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر و همچنین شرایط مرزی، توصیف فرا سنج‌های هندسی ناپیوستگی‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. خصوصیات هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌ها، شرایط مرزی و خصوصیات توده سنگ جهت تولید مدل‌های مهندسی شبکه گسسته شکستگی<sup>(۲) DFNE</sup> در جدول (۱) ارائه شده است، (شریف‌زاده<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). در این تحقیق، پارامترهای هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌های مربوط به توده سنگ مغار طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار در کشور ایران توسط روش‌های نمونه‌برداری خطی و سطحی (دایره‌ای و مستطیلی) مورد بررسی قرار گرفته است. از خصوصیات مهم منطقه مورد مطالعه می‌توان به قرارگیری مغار در زون کششی طاق‌دیس و تکتونیزه<sup>۴</sup> بودن منطقه به دلیل وجود پهنه زاگرس بلند اشاره نمود.

اولین قدم در مدل‌سازی هندسه ناپیوستگی<sup>۵</sup> در توده سنگ، شناسایی نواحی همگن آماری در محدوده مورد مطالعه است (کولاتیلاک<sup>۶</sup> و همکاران، ۱۹۹۰). با توجه به اینکه محل‌های برداشت ناپیوستگی‌ها در موقعیت‌های مختلف بوده است برای کنترل همگن بودن داده‌ها و بررسی پهنه توده سنگی تقریباً یکسان، آزمون‌های متفاوت آماری انجام شده است. بر اساس ۶۳۹ عدد ناپیوستگی برداشت‌شده و خوشه‌بندی انجام شده دو دسته درزه اصلی، لایه‌بندی به همراه یک دسته درزه دیگر به‌عنوان دسته درزه امتدادی در منطقه وجود دارد. در ۵ الی ۱۵ ناحیه نمونه‌برداری که معرف شرایط سنگ‌شناسی و زمین‌ساختاری محدوده مورد مطالعه است، باید ۱۵۰ تا ۳۵۰ ناپیوستگی برداشت شود. البته در مناطقی که سنگ‌های<sup>۷</sup> مختلفی وجود دارد، خصوصیات ناپیوستگی

<sup>7</sup> Lithology

<sup>8</sup> Priest

<sup>9</sup> Spacing

<sup>10</sup> Hoek

<sup>11</sup> Fisher

<sup>1</sup> Ye

<sup>2</sup> Discrete Fracture Network Engineering

<sup>3</sup> Sharifzadeh

<sup>4</sup> Tectonized

<sup>5</sup> Sharifzadeh

<sup>6</sup> Discountinuity

سری از شکستگی‌های مجزا بر اساس مشاهدات میدانی خواص شکستگی نظیر اندازه، جهت‌داری و شدت، ایجاد می‌شود.

لذا در این پژوهش خصوصیات ناپیوستگی سازه مغار طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان به روش‌های مختلف برداشت

جدول (۱): طبقه‌بندی خصوصیات اصلی توده سنگ به‌منظور تولید مدل‌های DFN (شریف‌زاده، ۲۰۱۵)

شرایط اولیه و مرزی توده سنگ	خصوصیات توده سنگ		خصوصیات هندسی (ناپیوستگی‌ها و زون ضعیف)
تنش برجا	ناپیوستگی‌ها و زون ضعیف	سنگ بکر	جهت‌داری (شیب و جهت شیب)
فشار آب زیرزمینی	زبری	نوع سنگ	فاصله‌داری و فرکانس (شدت خطی)
تنش‌های قائم	بازشدگی (ضخامت زون ضعیف)	مقاومت فشاری	تعداد دسته ناپیوستگی‌ها
	طول پل سنگ (تداوم)	ضریب پواسون	طول ناپیوستگی‌ها - طول پل سنگ (تداوم)
	خواص مواد پرکننده		بازشدگی ناپیوستگی و عرض زون ضعیف
	هوازدگی و دگرسانی		محل
	ژنتیک		شدت سطحی و حجمی
	مقاومت دیواره		چگالی سطحی و حجمی
	آب محتوی و نفوذپذیری		شکل
			قطر (اندازه)

### زمین‌شناسی و زمین‌ساخت<sup>۱</sup> منطقه

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان با هدف تولید برق موردنیاز شبکه سراسری در زمان اوج مصرف از طریق ذخیره آب مازاد در یک مخزن جداگانه در حال انجام است. این طرح با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان از کشور ایران واقع شده است. دهانه آبگیر پایین این طرح در یک کیلومتری بالادست و در تکیه‌گاه راست قرار دارد.

بر مبنای طبقه‌بندی ساختمانی-رسوبی نبوی (۱۳۵۵)، گستره طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان در پهنه رسوبی-ساختاری زاگرس مرتفع قرار می‌گیرد. با توجه به خصوصیات ساختاری معرفی شده برای این پهنه، مشاهده گسل‌های متعدد به‌ویژه از نوع راندگی، ایجاد شرایط توپوگرافی خشن،

خردشدگی و بروز ناپایداری در محل سازندهای سخت و مقاوم و نیز تشکیل طاقدیس و ناودیس‌های مکرر بدیهی است. در مقیاس ناحیه‌ای، سنگ پی این گستره از سنگ‌های دوران اول تا سوم زمین‌شناسی پوشیده شده است. از سوی دیگر بر مبنای مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و در مقیاس محلی، محدوده مغار نیروگاه از سازند دالان پوشیده شده است (شکل (۱)). برنزدهای<sup>۲</sup> سازند دالان با ضخامت حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر متشکل از آهک، آهک دولومیتی خاکستری تیره متوسط تا ضخیم لایه است. در شکل (۱) موقعیت‌های برداشت ناپیوستگی‌ها مشخص شده است.

مهم‌ترین گسل‌های موجود در گستره طرح شامل گسل‌های سراوند-بزنوید (S.B.F.)، چاله حاتم (CHA. F.) و رودبار (R.F.) است (شکل‌های (۱) و (۲)). در این بین، گسل سراوند

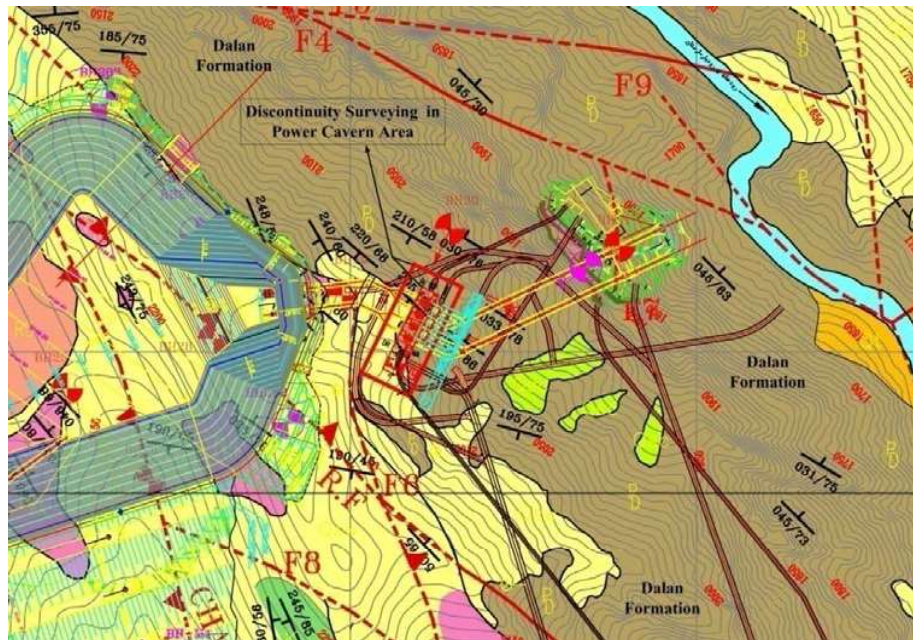
<sup>1</sup> Tectonic  
<sup>2</sup> Outcrop

قابل محاسبه نبوده ولی امکان تعیین شدت خطی وجود دارد. این روش می‌تواند تحت تأثیر اریب جهت‌داری، اریب اندازه، اریب قطع‌شدگی و اریب نامعلوم بودن انتهای اثر ناپیوستگی قرار گیرد. دلیل اریب، جهت‌داری شکستگی نسبت به خط برداشت است. نمونه‌برداری سطحی (روش پنجره‌ای و دایره‌ای) اطلاعات دوبعدی شبکه شکستگی نظیر چگالی و همچنین شدت سطحی را فراهم می‌نمایند (زیب<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). اندازه‌گیری‌های با روش پنجره برداشت نیز دارای تمام خطاها به غیر از خطای اندازه است. جهت بررسی و برآورد خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها در محدوده مغار نیروگاه از نمونه‌برداری به روش‌های خط برداشت و نمونه‌برداری سطحی شامل دایره‌ای و پنجره‌ای (مستطیلی و مربعی) استفاده شده است. در سقف مغار یک تونل به ابعاد ۶ در ۶ متر با مقطع نعل اسبی به طول ۱۲۰ متر به‌عنوان گالری اکتشافی حفاری شده است. همچنین گالری تزریق به ابعاد ۳ (عرض) در ۴ (ارتفاع) متر با مقطع نعل اسبی با طول ۵۱۴ متر به‌صورت پیرامونی در فاصله ۲۵ متری از محور مغار و ۲۰ متر بالاتر از سقف مغار حفاری شده است (شکل (۳)).

بزئوید با طول حدود ۹۶ کیلومتر که بخشی<sup>۱</sup> از گسل اصلی جوان زاگرس بوده مهم‌ترین گسل فعال (کواترنری) و لرزه‌زا است. این گسل بیشترین تأثیر را بر مقادیر پارامترهای جنبش نیرومند در ساختمانی خواهد داشت. گسل جوان زاگرس یک گسل کواترنری با عملکرد امتدادلغز (راستالغز) راست‌گرد است. مغار نیروگاه زیرزمینی در فاصله حدود ۱/۳ کیلومتری گسل سرآوند بزئوید قرار دارد. در شکل (۲) مدل ساختاری محدوده مورد مطالعه متشکل از یک ناودیس کلی (بنام رخ زرد)، روراندگی‌های مختلف و طاق‌دیس و ناودیس‌های متعدد قابل مشاهده است (گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح ۱۳۹۳).

### عملیات صحرایی به‌منظور برداشت خصوصیات ناپیوستگی‌ها

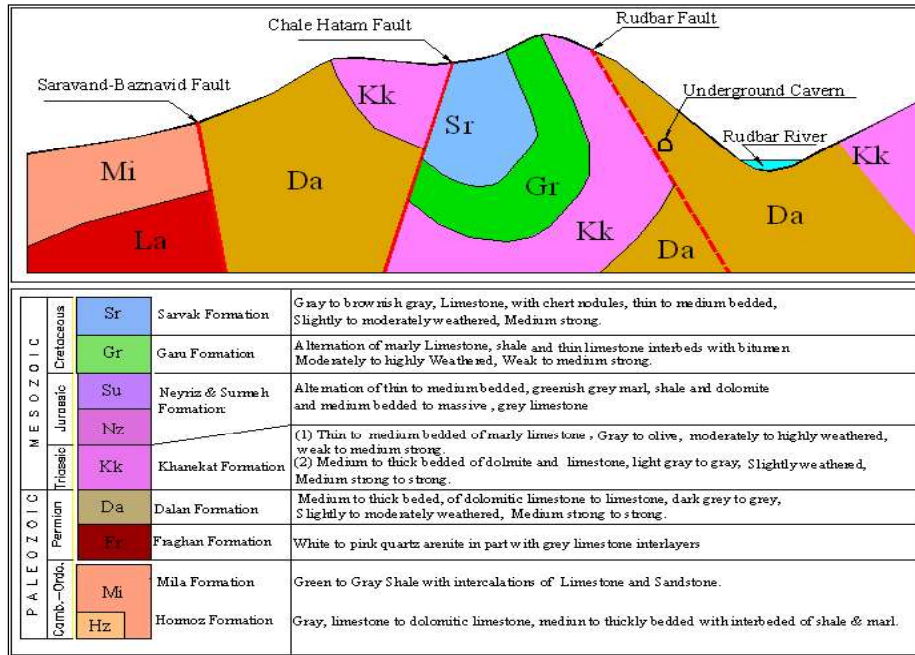
جهت ثبت پارامترهای هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌ها در رخنمون‌ها از روش‌های خط برداشت، نمونه‌برداری دایره‌ای یا مستطیلی استفاده می‌شود. روش خط برداشت به‌طور گسترده استفاده شده و امکان آنالیز سریع از خصوصیات شکستگی را فراهم می‌کند. با این روش چگالی شکستگی



شکل (۱): پلان طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان و نقشه زمین‌شناسی طرح محدوده طرح به همراه عوارض ساختاری، نیروگاه، گالری تزریق پیرامون نیروگاه و موقعیت برداشت ناپیوستگی‌ها (گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح ۱۳۹۳)

<sup>2</sup> Zeeb

<sup>1</sup> Segment



شکل (۲): مدل زمین‌شناسی ساختاری شماتیک (در راستای شمالشرق-جنوب غرب) از محدوده طرح (گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح ۱۳۹۳)

است که داده‌ها تا حدی نماینده منطقه باشند. برای کاهش اریب جهت‌داری سعی شده است، تعدادی از نمونه‌برداری‌های خطی و سطحی بر یکدیگر عمود باشند. به علت نمایان شدن سطح لایه‌بندی‌ها در عرض گالری اکتشافی امکان برداشت درزه وجود ندارد. برای هر عدد ناپیوستگی ۱۲ نوع خصوصیت هندسی و فیزیکی ثبت شده است. نمونه برداشت مشابه فرم ارائه شده توسط پرست (۱۹۹۳) است. با توجه به اینکه برداشت ناپیوستگی‌ها در دو موقعیت انجام شده است، برای بررسی همگن بودن داده‌ها، بر روی خصوصیات شیب و فاصله‌داری، آزمون‌های میانگین دو جامعه و تحلیل واریانس یک عامله (ANOVA<sup>۱</sup>) در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده همگن بودن داده‌ها در دو ناحیه برداشت است. در محدوده مورد مطالعه، برای لایه‌بندی و ناپیوستگی (BPJ<sup>۲</sup>) که به ترتیب دارای طول بزرگ‌تر از ۱۶ و ۲ متر هستند فقط روش خط برداشت استفاده شده است. با توجه به طول دسته درزه‌های I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub>، پنجره‌های نمونه‌برداری دایره‌ای و مستطیلی فقط برای آنالیز این دسته درزه‌ها مورد استفاده

یکی از معایب اندازه‌گیری خصوصیات ناپیوستگی‌ها در سطوح سنگی، وجود نواحی آسیب‌دیده در اثر عملیات آتشیاری و پوشیده شدن سطوح توسط خاک و گیاه است. از این رو به منظور رفع مشکل بالا کلیه سطوح نمونه‌برداری توسط آب با فشار مناسب شسته شده است (شکل ۴ الف)). جهت برداشت ناپیوستگی‌ها در موقعیت‌های بالا از ۱۱ خط برداشت با طول هریک ۱۰ الی ۱۶ متر استفاده شده است. طول کل خطوط برداشت برابر با ۱۱۸ متر است. ضمناً از ۱۱ پنجره برداشت دایره‌ای با شعاع ۷۰ سانتی‌متر الی ۱/۵ متر و ۱۵ پنجره برداشت مستطیلی با ابعاد حداکثر ۱/۹ در ۲/۲ متر نیز استفاده شده است. طبق تحقیقات انجام شده توسط ویس<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) نسبت ابعاد پنجره به میانگین طول اثر برابر با ۰/۷ الی ۲/۸ بوده است. در این تحقیق نیز این نسبت برابر ۱/۲ الی ۳ در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-ب) نمونه‌برداری دایره‌ای به قطر ۳ متر در موقعیت خط برداشت نشان داده شده است. تا حد امکان سعی شده است محل نمونه‌برداری سطحی در محل خط برداشت یا در نزدیکی آن باشد. موقعیت و راستای خطوط برداشت طوری انتخاب شده

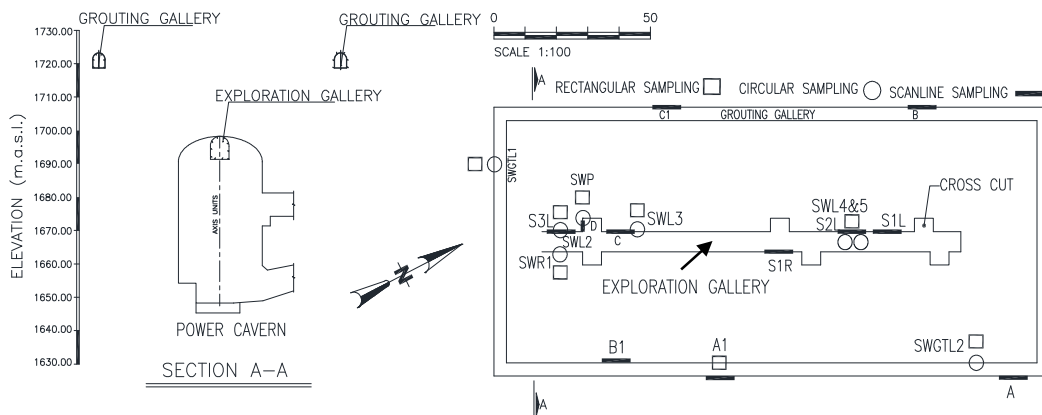
<sup>1</sup> Weiss  
<sup>2</sup> Analysis of Variance  
<sup>3</sup> Bedding Plane Joint

دارای یک انتهای قابل رؤیت باشند، مدنظر قرار گیرد (پرست، ۱۹۹۳). در این مطالعه تعداد ۶۳۹ ناپیوستگی برداشت شده است که قطب‌های آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین ۱۲ گسل کوچک و درزه اصلی وجود داشته ولی شکستگی‌های برشی اطراف گسل‌ها مشاهده نشده است.

#### تقسیم‌بندی زایشی سیستم ناپیوستگی

در تقسیم‌بندی زایشی شکستگی‌ها، سازوکار تشکیل درزه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بر اساس وضعیت تنش‌های اصلی و سازوکار دینامیکی، شکستگی‌های به انواع شکستگی‌های کششی، شکستگی‌های برشی و شکستگی‌های دوگانه یعنی شکستگی‌های کششی-برشی تقسیم می‌شوند (مندل<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵).

قرار گرفتند. درواقع این موضوع یک از ضعف‌های روش‌های نمونه‌برداری سطحی دوبعدی در شرایط اجرایی است (ویس، ۲۰۰۸). در چنین مواردی پیشنهاد می‌شود که از پنجره‌های نمونه‌برداری بزرگ‌تر استفاده شود (ژانگ<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰). این حالت برای منطقه مورد مطالعه با توجه به ارتفاع دیواره گالری تزریق (۲/۵ متر) و تونل اکتشافی سقف مغار (۴ متر) و همچنین نامناسب بودن یک متر دیواره تونل اکتشافی در نزدیک کف قابل کاربرد نبوده است. برای همه دسته درزه‌ها، طول خط برداشت ۲۰ الی ۳۲ برابر میانگین فاصله‌داری است. در مطالعه موردی تونل Arrowhead East Tunnel این مقدار برابر ۹ بوده است (کولاتیلاک<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). در همه برداشت‌های انجام شده تلاش شده است که توصیه و راهنمای کلی مبنی بر برداشت ۱۳۰ تا ۳۵۰ درزه در هر زون نمونه‌برداری که دست کم نیمی از آن‌ها



شکل (۳): موقعیت گالری اکتشافی در سقف مغار نیروگاه و گالری تزریق پیرامون آن به همراه موقعیت خطوط برداشت و نمونه‌برداری‌های سطحی (دایره‌ای و مستطیلی)

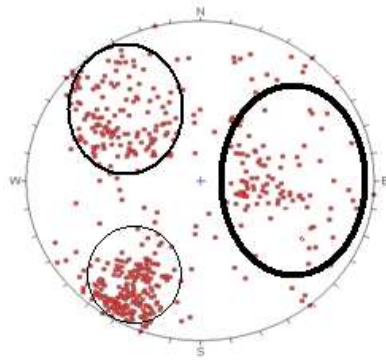


شکل (۴): الف) مراحل شستشوی سطح تونل قبل از انجام عملیات برداشت درزه ب) نمونه‌برداری دایره‌ای به قطر ۳ متر به همراه موقعیت خط برداشت

<sup>3</sup> Mandl

<sup>1</sup> Zhang

<sup>2</sup> Kulatilake



Number of discontinuities:

Joint set 1: 169  
 Joint set 2: 141  
 Joint set B.P.J.: 167  
 Bedding: 150  
 Others: 12

Scan line direction (Dip/D.D.):

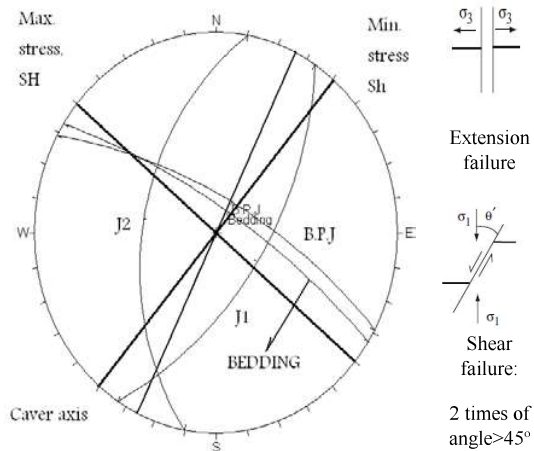
001/206  
 001/026  
 001/296  
 Equal Angle  
 Lower hemisphere  
 639 Poles  
 639 Entries

شکل (۵): کل قطب ناپیوستگی‌های برداشت‌شده به همراه تعداد ناپیوستگی در هر دسته و راستای خطوط برداشت با استفاده از نرم‌افزار **Dips**، دایره با ضخامت کم: لایه‌بندی، دایره با ضخامت متوسط:  $J_1$ ، دایره با ضخامت زیاد:  $J_2$

در کشور ایران باشد. این اعتقاد وجود دارد که محور تنش اصلی یا ناحیه‌ای منطبق بر روند شمال شرق- جنوب غرب (روند زاگرس) است ولی به علت ایجاد میدان تنش محلی در ناحیه لولای چین فشرده، محورهای تنش محلی متفاوت با محورهای تنش اصلی (ناحیه‌ای) هستند. در شکل (۶) راستای تنش افقی بیشینه و کمینه و همچنین راستای مغار و کلیه سیستم ناپیوستگی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، دسته درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$  از نوع برشی بوده و دسته درزه B.P.J از نوع کششی و موازی محور چین‌خوردگی است. درزه‌های برشی با روند محوری طاقدیس فرادیواره گسل رودبار (شکل (۲)) سازگار بوده ولی درزه‌های کششی منطبق با درزه‌های کششی حاصل از دگر ریختی جدید (مرحله‌ای که طاقدیس دچار فشردگی شده و در ناحیه لولا یک زون کششی به وجود آمد) هستند. به عبارت دیگر، درزه‌های برشی در فاز قبلی (زمان به وجود آمدن چین اصلی) و درزه‌های کششی در زمان فشردگی طاقدیس و ایجاد زون کششی در ناحیه لولای چین به وجود آمده است.

خش لغزش که از مشخصه‌های شکستگی‌های برشی است در مطالعات میدانی بر روی درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$  مشاهده شده است. همچنین بر اساس اندازه‌گیری انجام شده که در قسمت بازشدگی توضیح داده می‌شود، مقدار بازشدگی دسته درزه‌های کششی بیشتر از دسته درزه‌های برشی بیشتر است؛ بنابراین این موضوع نیز مؤید تفاوت ژنتیک بین دسته درزه‌ها است.

وضعیت بیشترین و کمترین تنش اصلی نسبت به شکستگی‌های برشی و کششی در سمت راست شکل (۶) نشان داده شده است. جهت تعیین بهینه محور مغار نیروگاه و در نظر گرفتن مسائل پایداری آن، ۲۸ آزمایش HF و در دو گمانه انجام شده است. بر این اساس راستای بیشینه تنش افقی اندازه‌گیری شده N130E است.



شکل (۶): راستای تنش افقی بیشینه و کمینه (خطوط مستقیم ضخیم) همراه با راستای مغار (خط مستقیم نازک) و همه سیستم ناپیوستگی - راستای تنش اصلی نسبت به شکستگی‌های کششی و برشی

به علت وجود گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد و دارای مؤلفه معکوس، فعالیت‌های کوهزایی جوان در محدوده مورد مطالعه و قرارگیری مغار نیروگاه در زون کششی طاقدیس (به‌عنوان یکی از ساختارهای محلی، شکل (۲)) سبب شده است جهت تنش اصلی در منطقه، عمود بر جهت تنش غالب

## نتایج

است. این زاویه جهت تبدیل شدت خطی و سطحی به شدت حجمی مورد نیاز است (وانگ<sup>۶</sup>، ۲۰۰۵).

## جهت‌داری ناپیوستگی

### طول ناپیوستگی

طول یا تداوم ناپیوستگی‌ها از مهم‌ترین خصوصیات توده سنگ است ولی به دلیل اینکه روش مستقیم قابل اعتماد برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد، کمی نمودن آن بسیار مشکل است (براون<sup>۷</sup>، ۱۹۸۱). بنابراین، روش قابل‌اعتمادی برای توصیف تداوم ناپیوستگی وجود ندارد. توصیف توزیع طول اثر اولین و مهم‌ترین قدم در برآورد سه‌بعدی توزیع اندازه شکستگی است. به همین دلیل برای محاسبه میانگین طول اثر ناپیوستگی‌ها از سه روش نمونه‌برداری خط برداشت، نمونه‌برداری مستطیلی و دایره‌ای استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده و مطالعات میدانی در فضای باز ساختگاه طرح، تداوم لایه‌بندی در ۸۰ درصد موارد بین ۱۰ الی ۲۰ متر (تداوم زیاد) و در ۲۰ درصد بزرگ‌تر از ۲۰ متر (تداوم بسیار زیاد) است؛ بنابراین بر اساس میانگین وزنی و مشاهدات صحرایی، میانگین و انحراف معیار طول اثر لایه‌بندی، به ترتیب ۱۶ و ۴ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به ابعاد فضاهای زیرزمینی و اینکه هر دو نقطه انتهایی طول اثر لایه‌بندی‌های برداشت شده (۱۵۰ عدد) نسبت به خط برداشت نامعلوم (سانسور شده) هستند (قابل مشاهده نیستند) برای بررسی مقدار طول اثر، فقط طول ناپیوستگی‌های  $J_1$ ،  $J_2$  و B.P.J به‌وسیله روش‌های بیان شده در نظر گرفته شده‌اند.

### روش خط برداشت

برای هر دسته ناپیوستگی داده‌های طول نیم اثر با توجه به خط برداشت می‌توانند به سه طبقه تقسیم می‌شوند (درشوئیتز و اینستاین<sup>۸</sup>، ۱۹۸۸). با توجه به محل قرارگیری خط برداشت و محدوده سطح برداشت در تونل مورد مطالعه، وضعیت انتهایی ناپیوستگی‌ها به سه حالت: هر دو انتها معلوم (نوع اول یا ۲-۲)، یک انتها در بالا یا پایین خط برداشت

ارزیابی ناپیوستگی‌ها و جهت‌داری آن‌ها در اکثر موارد یکی از مهم‌ترین خصوصیت زمین‌شناسی به‌منظور طراحی فضاهای زیرزمینی و سازه‌های بنا شده روی توده سنگ است. در توده سنگ سخت، به‌طور معمول ناپیوستگی‌ها به‌صورت درزه‌ها با جهت‌داری مشخص رخ می‌دهند (کولاتیلاک<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶). به‌طور کلی شکستگی‌های تشکیل شده در یک رخداد زمین‌شناسی مشابه دارای خواص مشابه (به‌عنوان مثال، جهت‌داری ترجیحی) هستند بنابراین قبل از پردازش آماری، دسته‌بندی شکستگی‌های به خوشه‌های مجزا بسیار مهم است (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس دسته‌بندی انجام شده چهار دسته ناپیوستگی (سه دسته درزه به همراه لایه‌بندی) مشخص شده است. دسته درزه سوم با توجه به موقعیت هندسی آن نسبت به لایه‌بندی، از نوع B.P.J است. داده‌های جهت‌داری شامل شیب و جهت شیب با توجه به راستای خط برداشت تصحیح (حذف خطا) شده و در جدول (۲) ارائه شده‌اند. جهت‌داری کلیه ناپیوستگی‌های با استفاده از توزیع فیشر مدل شده است. توزیع فیشر، زاویه جهت‌داری را بر اساس سه پارامتر (میانگین شیب، جهت شیب و ثابت فیشر) توصیف می‌کند. ضریب ثابت فیشر عددی مثبت بوده و درجه پراکندگی داده‌ها را نشان می‌دهد. مقدار بزرگ‌تر این ضریب نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها کمتر خواهد بود. ضریب فیشر عددی بین صفر تا ۷۰۰ است اما در علم مکانیک سنگ و تحلیل جهت‌داری دسته درزه‌ها معمولاً بین ضریب بین ۲۰ تا ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود (یانگ<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰). برای ثابت فیشر مقادیر ۱۸۴ الی ۴۳۶ (تورس<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸) و ۶ الی ۱۰ (باغبانان<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. مطابق جدول (۲) به‌غیر از لایه‌بندی، سایر ناپیوستگی‌ها دارای ثابت فیشر کمتر از ۲۰ بوده و این نشان‌دهنده بالا بودن فعالیت‌های تکتونیکی محدوده مورد مطالعه است. زاویه  $\rho$ ، زاویه بین خط برداشت و بردار قطب میانگین فیشر

<sup>6</sup> Wang

<sup>7</sup> Brown

<sup>8</sup> Dershowitz&Einstein

<sup>1</sup> Kulatilake

<sup>2</sup> Lei

<sup>3</sup> Young

<sup>4</sup> Torres

<sup>5</sup> Baghbanan

بودن تابع توزیع طول اثر دسته ناپیوستگی‌ها به علت تفاوت در فرایند مکانیکی ایجاد ناپیوستگی است (درشوئیتز و اینستاین، ۱۹۸۸). اگرچه توزیع‌های مختلفی برای توصیف توزیع طول ناپیوستگی وجود دارد ولی توزیع‌هایی مانند قانون توان بریده‌شده<sup>۴</sup>، لوگ نرمال، گاما و نمایی رایج هستند. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، طول اثر دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> که از نوع برشی هستند از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند.

معلوم (نوع دوم یا ۲-۳ یا ۳-۳) و هر دو انتها نامعلوم (نوع سوم یا ۳-۳) تقسیم شده است. تعداد کل ناپیوستگی‌های برداشت‌شده و تعداد نوع اول و دوم و همچنین درصد آن‌ها نسبت به کل در جدول (۳) ارائه شده است. به‌منظور بررسی و انتخاب بهترین تابع چگالی احتمال از سه آزمون مربع کای<sup>۱</sup>، اندرسون-دارلینگ<sup>۲</sup> و کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۳</sup> در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شده است. برای رتبه‌بندی توابع توزیع احتمال از مقدار آماره آزمون، مقدار P و نمودار P-P استفاده شده است (جدول (۳)). متفاوت

جدول (۲): مقادیر شیب و جهت شیب اصلاح شده و نشده به همراه مقادیر ثابت فیشر و زاویه ρ

نوع	شیب (درجه)		جهت شیب (درجه)		ثابت فیشر		زاویه ρ (درجه)	
	تصحیح نشده	تصحیح شده	تصحیح نشده	تصحیح شده	تصحیح نشده	تصحیح شده	در راستای 001/206 & 001/026	در راستای 001/296
Bedding	۷۷	۷۶	۰.۳۲	۰.۳۳	۲۸/۶	۲۵/۶	۱۵/۶	*
J1	۶۲	۶۰	۱۲۹	۱۲۳	۱۲/۵	۱۷/۳	۸۴	۳۰
J2	۴۵	۴۶	۲۶۳	۲۸۰	۶/۶	۹/۵	۷۸/۶	۴۷
B.P.J.	۷۳	۷۰	۰.۲۹	۰.۲۹	۱۱	۱۰/۴	۲۰/۲	*

جدول (۳): بهترین توابع توزیع احتمال طول اثر از رتبه ۱ تا ۴ و مقدار آن برحسب سانتی‌متر به تفکیک نوع ناپیوستگی و نوع

وضعیت انتهای ناپیوستگی نسبت به خط برداشت

ناپیوستگی	نوع	تابع چگالی احتمال						تعداد & %	روش ncr	
		رتبه ۱		رتبه ۲		رتبه ۳				رتبه ۴
J <sub>1</sub> (برشی)	All	گاما		لوگ نرمال		ویبول		*	۱۶۷ & ۱۰۰	*
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار			
		۶۲	۴۴	۶۳	۵۳	۶۰	۷۱			
	2-2	لوگ نرمال		گاما		ویبول		*	۷۵ & ۱۲۵	*
		۶۵	۴۹	۶۵	۴۴	۶۳	۷۲			
	2-3 & 3-2	لوگ نرمال		گاما		نمایی		ویبول	۴۲ & ۲۵	۶۰
۵۸		۶۵	۵۸	۵۷	۵۸	*	۵۴   ۷۰			
J <sub>2</sub> (برشی)	All	لوگ نرمال		ویبول		گاما		*	۱۳۳ & ۱۰۰	*
		۶۳	۶۳	۶۳	۷۳	۶۳	۵۷			
	2-2	لوگ نرمال		ویبول		گاما		*	۷۸ & ۱۰۳	*
		۶۸	۵۴	۶۴	۷۵	۶۸	۵۴			
	2-3 & 3-2	لوگ نرمال		ویبول		نمایی		گاما	۳۳ & ۲۲	۶۴
		۴۱	۵۳	۳۹	۵۴	۴۷	*	۴۷   ۶۷		
B.P.J. (کششی)	All	ویبول		گاما		لوگ نرمال		نمایی	۱۵۸ & ۱۰۰	*
		۱۶۱	۲۰۴	۱۶۳	۱۲۲	۱۷۶	۲۰۹	۱۶۳   *		
	2-2	ویبول		گاما		لوگ نرمال		*	۱۰۱ & ۶۴	*
		۹۴	۱۱۳	۹۸	۷۴	۱۰۰	۹۳			
	2-3 & 3-2	یکنواخت		لوگ نرمال		گاما		ویبول	۵۷ & ۳۶	۴۳۹
		۲۸۳	۹۹	۲۸۳	۱۰۵	۲۸۲	۹۹	۲۸۰   ۲۹۷		

<sup>3</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>1</sup> Chi-Square

<sup>4</sup> Pareto

<sup>2</sup> Anderson-Darling

انجام شده توسط نمونه برداری پنجره‌ای می‌تواند تحت تأثیر ارب‌های جهت‌داری، قطع‌شدگی و نامعلوم بودن انتهای اثر ناپیوستگی باشد (زیب و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به مقدار پایین ثابت فیشر دسته ناپیوستگی B.P.J و میانگین طول اثر محاسبه شده آن به روش خط برداشت، بر اساس بررسی عددی به عمل آمده باید قطر دایره برداشت مناسب ۴ الی ۵ متر باشد (کمالی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به مشکلات اجرایی و اینکه با ابعاد تونل موجود برای دایره‌ای با قطر ۵ متر پدیده اثر لبه تأثیرگذار می‌شود، از روش پنجره‌ای برای این نوع ناپیوستگی استفاده نشد. برای محاسبه میانگین طول اثر به روش نمونه‌برداری سطحی از روابط ارائه شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۰)، مولدون<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۱)، اندرسون و دوراستروپ (فررو و وامیلی<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱) و پاول و لاسلت (پرست، ۱۹۹۳) استفاده شده است. در شکل (۷) نتایج محاسبه میانگین طول اثر دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> توسط روابط مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه در زمان نمونه‌برداری در داخل برخی از پنجره‌های دایره‌ای دو سری پنجره مستطیلی ترسیم شده است، میانگین نتیجه دو سری پنجره مستطیلی در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج روش نمونه‌برداری پنجره‌ای محدوده میانگین طول اثر برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب، ۲۶ الی ۶۷ سانتی‌متر و ۳۷ الی ۱۰۰ سانتی‌متر است. میانگین طول اثر دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به روش سطحی (میانگین کل پنجره‌های برداشت) به ترتیب ۴۷ و ۶۸ سانتی‌متر محاسبه شده است. میانگین نتایج کلیه پنجره‌ها به روش‌های مختلف برای دو دسته درزه J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> محاسبه و با مقادیر به دست آمده از روش خط برداشت در شکل (۸) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف طول اثر میانگین محاسبه شده بین دو روش خطی و سطحی برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب ۲۶ و صفر درصد است. مقدار انحراف معیار دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> در روش سطحی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) به ترتیب ۱۳ و ۲۱ سانتی‌متر است. با توجه به در نظر گرفتن نتایج دو روش

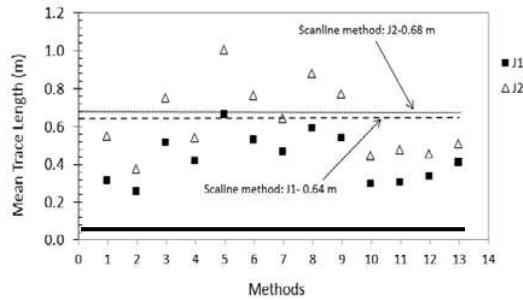
بر اساس نوع وضعیت انتهای طول اثر B.P.J، توزیع‌های ویبول و یکنواخت مناسب هستند. این نوع توزیع کمتر برای طول اثر گزارش شده است. با توجه به اینکه دسته درزه B.P.J از نوع شکستگی کششی است، یکی از دلایل اصلی مناسب بودن توزیع ویبول می‌تواند رژیم تنش حاکم بر منطقه مورد مطالعه باشد. با توجه به محدودیت نمونه‌برداری به روش خط برداشت و پنجره‌ای، برای محاسبه تداوم ناپیوستگی‌ها لازم است تصحیح خطا انجام شود. به همین دلیل این خصوصیت ناپیوستگی باید با تفسیر زمین‌شناسی و آنالیز عدم قطعیت اصلاح شود. با توجه به اندازه سطح محدود برداشت، خطاهای نامعلوم بودن انتهای اثر ناپیوستگی و کوتاه‌شدگی وجود دارد و باید تصحیح خطای طول انجام شود. برای حذف خطای کوتاه‌شدگی، طول حد ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع تابع چگالی احتمال و سطح کوتاه‌سازی برای تصحیح ارب ناپیوستگی‌های نوع سوم، از روش nCF استفاده شده (پرست و هادسون<sup>۱</sup>، ۱۹۸۱). در این روش n تعداد کل ناپیوستگی، c سطح کوتاه‌شدگی<sup>۲</sup> و r تعداد ناپیوستگی‌های که طول نیم اثر آن‌ها کمتر از مقدار c است، است. مقدار سطح کوتاه‌سازی برای J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub> و B.P.J به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۲۳۰ و ۴۰۰ سانتی‌متر محاسبه شده است. به همین ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار طول اثر ناپیوستگی‌های J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub> و B.P.J به ترتیب ۶۴ و ۵۳، ۶۸ و ۵۴، ۲۱۹ و ۱۰۸ سانتی‌متر محاسبه شده است. طبق طبقه‌بندی ISRM، دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> از نوع تداوم بسیار کم و دسته درزه B.P.J از نوع تداوم کم هستند.

### روش پنجره مربعی و دایره‌ای

برای محاسبه میانگین طول اثر شکستگی ۱۰ پنجره دایره‌ای برداشت با قطر بزرگ‌تر از اندازه بلوک و فاصله‌داری، ولی بسیار کوچک‌تر از ابعاد محدوده نمونه‌برداری مورد نیاز است (روهرباق<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). برای محاسبه طول اثر میانگین ناپیوستگی‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> از ۱۵ پنجره مستطیلی و ۱۲ پنجره دایره‌ای نیز استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های

<sup>4</sup> Kamali  
<sup>5</sup> Mauldon  
<sup>6</sup> Ferrero&Umili

<sup>1</sup> Priest&Hudson  
<sup>2</sup> Curtailment  
<sup>3</sup> Rohrbaugh



شکل (۸): میانگین طول اثر محاسبه شده به روش پنجره‌ای برای دو دسته درزه J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به همراه مقدار به دست آمده با استفاده از روش خط برداش و حد Termination (خط ضخیم)

در این مطالعه شکل ناپیوستگی‌ها دایره‌ای فرض شده است (کولاتیلاک<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۳) و خصوصیات طول اثر و قطر آن‌ها دارای تابع توزیع یکسان هستند. با توجه به مقادیر میانگین، انحراف معیار و نوع تابع چگالی احتمال طول اثر محاسبه شده برای چهار دسته ناپیوستگی، مقادیر میانگین و انحراف معیار قطر آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

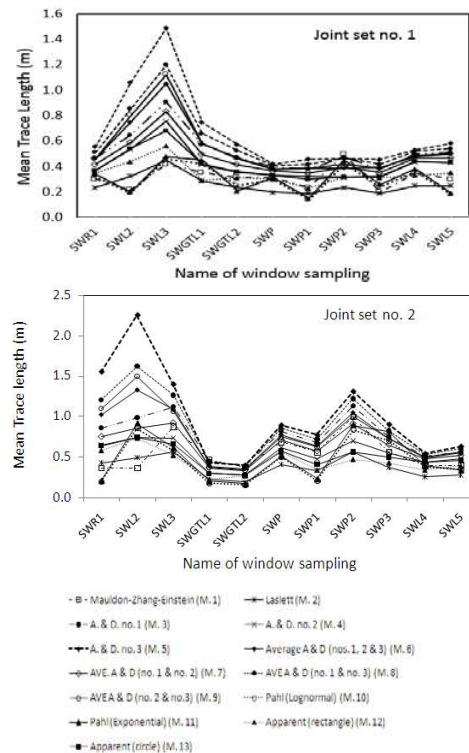
#### فاصله‌داری ناپیوستگی

فاصله‌داری، فاصله بین ناپیوستگی‌های مجاور هم است. مقدار فاصله‌داری برای توصیف محیط معادل پیوسته، پارامتر ورودی جهت طبقه‌بندی توده سنگ، تخمین RQD و توصیف هندسه بلوک‌های سنگی کاربرد دارد (مهتاب<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۵). در محدوده مورد مطالعه سه نوع فاصله‌داری شامل کل<sup>۵</sup>، فاصله‌داری هر دسته ناپیوستگی در راستای خط برداشت<sup>۶</sup> و در راستای بردار نرمال متوسط<sup>۷</sup> ناپیوستگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای داده‌های فاصله‌داری جهت انتخاب بهترین تابع چگالی احتمال و رتبه‌بندی آن‌ها از سه آزمون و سه روش توضیح داده شده در قسمت روش خط برداشت استفاده شده است. در جدول (۵) بهترین توابع توزیع احتمال از رتبه ۱ تا ۳ و مقدار فاصله‌داری برحسب

خطی و سطحی، میانگین طول اثر برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب ۵۶ و ۶۸ سانتی‌متر محاسبه گردید.

#### اندازه ناپیوستگی

تداوم (اندازه) ناپیوستگی که به صورت گسترش سطحی یا اندازه ناپیوستگی در راستای یک صفحه تعریف می‌شود، می‌تواند به طور تقریبی توسط طول اثر ناپیوستگی می‌شود (براون، ۱۹۸۱). به دلیل اینکه روش مستقیم قابل اعتماد برای اندازه‌گیری قطر شکستگی وجود ندارد، کمی نمودن آن بسیار مشکل است. همچنین تعیین توزیع اندازه ناپیوستگی‌ها نیز بسیار مشکل است. با توجه به عدم شناخت کافی از شکل ناپیوستگی‌ها، طول اثر درزه و تابع چگالی احتمال آن در راستای شیب و امتداد یکسان در نظر گرفته می‌شود (روبرستون<sup>۱</sup> و سانگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۶)) البته در این خصوص توافق عام وجود ندارد.



شکل (۷): نتایج میانگین طول اثر دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> استفاده از روابط مختلف

<sup>5</sup> Total spacing

<sup>6</sup> Set spacing

<sup>7</sup> Mean Normal Vector (MNV)

<sup>1</sup> Robertson

<sup>2</sup> Song

<sup>3</sup> Kulatilake

<sup>4</sup> Mahtab

جدول (۵): بهترین توابع توزیع احتمال فاصله‌داری از رتبه ۱ تا ۳ و مقدار فاصله‌داری (cm) به تفکیک نوع ناپیوستگی و نوع فاصله‌داری

ناپیوستگی	نوع فاصله‌داری	تابع چگالی احتمال						ضریب تغییرات
		رتبه ۳		رتبه ۳		رتبه ۳		
J <sub>1</sub> (برشی)	Set spacing	ویبول		لوگ نرمال		نمایی		۱/۵
		انحراف میانگین	انحراف معیار	انحراف میانگین	انحراف معیار	انحراف میانگین	انحراف معیار	
		۵۸	۸۸	۷۰	۱۴۴	۶۳	*	
	Normal	ویبول		لوگ نرمال		گاما		۱/۷
۱۷		۲۹	۲۴	۸۰	۲۱	۲۸		
J <sub>2</sub> (برشی)	Set spacing	ویبول		لوگ نرمال		نمایی		۱/۴
		۶۰	۸۵	۷۳	۱۴۲	۷۲	*	
	Normal	ویبول		لوگ نرمال		*		۱/۶
		۲۲	۳۵	۳۱	۸۶	*	*	
B.P.J (کششی)	Set spacing	لوگ نرمال		ویبول		نمایی		۱/۴
		۵۰	۷۲	۴۴	۵۹	۵۳	*	
	Normal	لوگ نرمال		ویبول		نمایی		۱/۵
		۴۶	۷۰	۴۰	۵۴	۴۸	*	
لایه‌بندی	Set spacing	لوگ نرمال		ویبول		نمایی		۱/۱
		۵۳	۶۰	۴۹	۶۱	۵۶	*	
	Normal	لوگ نرمال		ویبول		نمایی		۱/۱
		۵۰	۵۵	۴۶	۵۷	۵۳	*	

دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> که از نوع برشی هستند تابع چگالی احتمال ویبول و برای لایه‌بندی و دسته درزه B.P.J که از نوع کششی است تابع لوگ نرمال مناسب است. از دلایل مهم تفاوت تابع توزیع فاصله‌داری برای ناپیوستگی‌های مورد مطالعه فرآیند تشکیل ناپیوستگی، نوع و جهت تنش اعمالی بر سطح ناپیوستگی است. این موضوع نشان می‌دهد که فاکتور تنش محلی در منطقه بر نوع تابع چگالی احتمال تأثیرگذار است.

#### شدت ناپیوستگی‌ها

فرکانس یا شدت ناپیوستگی یکی از پایه‌ای‌ترین اندازه‌گیری‌ها به‌منظور محاسبه درجه شکستگی توده سنگ است (پریست، ۱۹۹۳). شدت دارای سه نوع خطی (P<sub>10</sub>)، سطحی (P<sub>21</sub>)، حجمی (P<sub>32</sub>) بوده که همگی دارای بعد L<sup>-1</sup> هستند؛ بنابراین با توجه به اهمیت زیاد، خصوصیت شدت

جدول (۴): مقادیر میانگین و انحراف معیار طول اثر و قطر دسته درزه‌ها

نوع	طول اثر (سانتی‌متر)			قطر (سانتی‌متر)		
	C.O.V.	S.D.	Mean	C.O.V.	S.D.	Mean
Bed.	۰/۱۳	۲۷۸	۲۰۷۵	۰/۲۵	۴۰۰	۱۶۰۰
J <sub>1</sub>	۰/۴۸	۲۸	۵۸	۰/۵۹	۳۳	۵۶
J <sub>2</sub>	۰/۴۶	۳۳	۷۲	۰/۵۶	۳۸	۶۸
B.P.J.	۰/۱۵	۴۰	۲۷۳	۰/۳۲	۷۱	۲۱۹

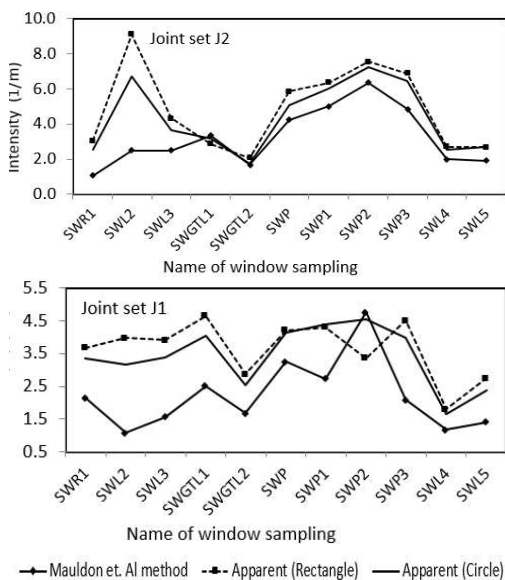
سانتی‌متر به تفکیک نوع ناپیوستگی و نوع فاصله‌داری ارائه شده است. مقادیر فاصله‌داری کل از هیچ توزیع پیروی نمی‌نماید.

جهت محاسبه فاصله‌داری نرمال، تصحیح اریب مطابق با توصیه پریست (۱۹۹۳) انجام شده است. تابع چگالی احتمال رایج برای پارامتر فاصله‌داری لوگ نرمال و نمایی بوده ولی تابع ویبول و گاما نیز قابل کاربرد است (استاوروپولو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). همان‌طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود، برای

<sup>1</sup> Stavropoulou

(۲۰۰۱) استفاده شد. در این راستا شدت ظاهری با پنجره‌های مستطیلی و دایره‌ای در شکل (۹) محاسبه شده است. مقدار میانگین شدت واقعی و همچنین شدت ظاهری با پنجره مستطیلی و دایره‌ای همه پنجره‌های نمونه‌برداری برای دسته درزه  $J_1$  به ترتیب برابر با  $3/4$  و  $3/6$  ( $m^{-1}$ ) و برای دسته درزه  $J_2$  به ترتیب برابر با  $4/3$  و  $4/3.8/7$  ( $m^{-1}$ ) محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود مقدار شدت ظاهری به روش‌های مستطیلی و دایره‌ای به هم نزدیک است (حداکثر اختلاف ۱۰ درصد) و برای هر دو دسته بزرگ‌تر از شدت واقعی است. دلیل بیشتر بودن مقدار شدت واقعی دسته درزه  $J_2$  نسبت به  $J_1$  به میزان ۱۹ درصد، بزرگ‌تر بودن طول اثر آن است.

با توجه به تغییر مقدار شدت سطحی برای هر دو دسته درزه  $J_1$  و  $J_2$  بهتر است ابعاد پنجره نمونه‌برداری افزایش یابد. در الگوی شکستگی همگن، خطای ۱۵ درصد برای مقدار شدت واقعی قابل‌قبول است (روهرباق و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل (۹) - شدت سطحی واقعی و ظاهری دسته درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$

### شدت حجمی

$P_{32}$  برابر با سطح شکستگی بر واحد حجم توده سنگ است. محاسبه شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در عمل بسیار مشکل

هر سه نوع آن برای ناپیوستگی‌های منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

### شدت خطی دسته درزه‌ها و فرکانس کل

فرکانس یا شدت خطی یکی از پارامترهای مهم برای کالیبره کردن مدل شبکه شکستگی مجزا است. شدت خطی ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع بوده و برای کل ناپیوستگی‌ها یا دسته ناپیوستگی‌ها به کار می‌رود (روهرباق و همکاران، ۲۰۰۲). شدت خطی برابر با تعداد شکستگی‌ها در واحد طول خط برداشت است. با توجه به مقادیر محاسبه شده فاصله‌داری، مقادیر شدت خطی به تفکیک دسته درزه‌ها در جهت بردار نرمال میانگین ( $^1MNV$ ) و خط برداشت در جدول (۶) ارائه شده است. مقدار فرکانس کل  $\lambda_s$ ، چهار دسته ناپیوستگی در جهت خط برداشت (N26E) با استفاده از رابطه (۱) برابر است با  $0.04 \text{ cm}^{-1}$  (جینگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷).

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^D \lambda_i \cos \delta_i \quad (-90^\circ \leq \delta_i \leq 90^\circ) \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $D$  = تعداد دسته ناپیوستگی،  $\lambda_i$  = فرکانس در جهت نرمال دسته ناپیوستگی  $i$ ام،  $\delta_i$  = زاویه حاده بین خط نمونه‌برداری و بردار نرمال دسته ناپیوستگی  $i$ ام.

جدول (۶): مقادیر شدت خطی به تفکیک دسته درزه‌ها در جهت‌های بردار نرمال میانگین و خط برداشت (1/cm)

نوع	Set spacing (Along Scanline)		Normal (Along M.N.V.)	
	P.D.F.	$P_{10}$	P.D.F.	$P_{10}$
Bedding	لوگ نرمال	۰/۰۱۹	لوگ نرمال	۰/۰۲
J1	ویبول	۰/۰۱۷	ویبول	۰/۰۰۶
J2	ویبول	۰/۰۱۷	ویبول	۰/۰۴۵
B.P.J.	لوگ نرمال	۰/۰۲۰	لوگ نرمال	۰/۰۲۲

### شدت سطحی

شدت سطحی برابر با طول اثر شکستگی بر واحد سطح نمونه‌برداری است (روهرباق، ۲۰۰۲). به‌منظور محاسبه شدت سطحی ( $P_{21}$ ) در برداشت پنجره دایره‌ای به‌عنوان شدت واقعی، از رابطه ارائه شده توسط مولدون و همکاران

<sup>1</sup> Mean Normal Vector

<sup>2</sup> Total frequency

<sup>3</sup> Jing

همچنین شدت حجمی کلیه ناپیوستگی‌ها به روش کولاتیلاک و همکاران و میانگین نتایج کلیه پنجره‌های نمونه‌برداری به روش ژانگ و اینشتین<sup>۳</sup> برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار اختلاف P<sub>32</sub> محاسبه شده به دو روش برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب ۳۸ و ۷ درصد است. این موضوع نشان‌دهنده این است که تخمین این خصوصیت در منطقه بسیار مشکل است.

جدول (۸): شدت حجمی (m<sup>-1</sup>) همه دسته درزه‌ها به روش کولاتیلاک و همکاران و میانگین نتایج شدت حجمی همه پنجره‌های نمونه‌برداری برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به روش ژانگ و اینشتین

ناپیوستگی	Kulatilake et al. method	Zhang & Einstein method
Bedding	۱/۸	*
J1	۶/۲	۳/۸
J2	۵	۵/۴
B.P.J.	۲/۳	*

### چگالی سطحی ناپیوستگی‌ها

چگالی سطحی (P<sub>20</sub>) برابر است با تعداد مرکز اثر شکستگی‌های بر واحد ناحیه سطح نمونه‌برداری (روهرباق و همکاران، ۲۰۰۲). برای محاسبه P<sub>20</sub> با پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی به‌عنوان چگالی واقعی، از روابط ارائه شده توسط مولدون و همکاران (۱۹۹۹ و ۲۰۰۱) استفاده شده است. همچنین چگالی ظاهری با پنجره مستطیلی و دایره‌ای نیز برای دسته ناپیوستگی‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> محاسبه شده و در شکل (۱۱) ارائه شده است.

میانگین مقادیر چگالی واقعی پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی و همچنین مقدار چگالی ظاهری برای هر دو نوع پنجره نمونه‌برداری برای دسته درزه J<sub>1</sub> به ترتیب برابر با ۷/۵، ۷/۸، ۹/۱ و ۱۱/۲ (m<sup>-2</sup>) و برای دسته درزه J<sub>2</sub> به ترتیب برابر با ۶/۲، ۶/۹، ۸/۷ و ۱۱ (m<sup>-2</sup>) محاسبه شده است. اختلاف بین چگالی واقعی در حالت پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی برای دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به ترتیب ۴ و ۱۰ درصد است

است. در این بررسی شدت حجمی به دو روش کولاتیلاک<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۳) و ژانگ و اینشتین<sup>۲</sup> (فررو و امیلی، ۲۰۱۱)، محاسبه شده است. در روش ژانگ و اینشتین نیاز به محاسبه تعداد ناپیوستگی‌ها نمونه‌برداری شده در واحد حجم است. لذا پنجره‌ای به ابعاد یک در یک متر با شبکه هاید در ده سانتی‌متر ساخته شده است (شکل (۱۰)). در روش کولاتیلاک و همکاران برای محاسبه P<sub>32</sub> به مقدار چگالی حجمی نیاز است. با توجه به اینکه فاصله‌داری درزه در دو بعد برای محاسبه فاصله‌داری درزه در سه بعد به کار گرفته می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵)، برای محاسبه چگالی حجمی از شدت خطی در جهت بردار نرمال میانگین (MNV) استفاده شده است. نتایج شدت حجمی دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به تفکیک پنجره‌های نمونه‌برداری به روش ژانگ و اینشتین در جدول (۷) ارائه شده است.



شکل (۱۰): پنجره نمونه‌برداری با شبکه‌بندی ۱۰\*۱۰ سانتی‌متر در موقعیت SWL2

جدول ۷- شدت حجمی (m<sup>-1</sup>) دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> به روش ژانگ و اینشتین

نام پنجره	J1	J2
SWR1	۳/۳	۳
SWL2	۲/۹	۵/۹
SWL3	۲/۶	۴/۹
SWGTL1	۳/۶	۵/۹
SWGTL2	۲/۶	۳/۴
SWP	۴/۹	۶/۹
SWP3	۴/۶	۶/۹
SWL4	۳/۳	۴/۹
SWL5	۳/۳	۴/۴

<sup>3</sup> Einstein

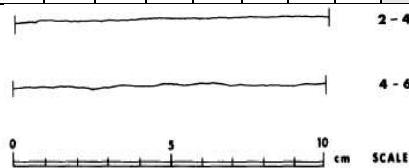
<sup>1</sup> Kulatilake

<sup>2</sup> Zhang & Einstein

و غیر تماسی وجود دارد (جی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). ضریب زبری همه ناپیوستگی‌ها به وسیله شانه بارتون (به طول ۳۰ سانتی‌متر) و بر اساس دستورالعمل توسط ISRM اندازه‌گیری و تخمین زده شده‌اند. شانه مورد استفاده با دقت یک میلی‌متر قادر به ثبت پروفیل سطح درزه است. مطابق با جدول (۹) و بر اساس دستورالعمل ISRM کلیه ناپیوستگی‌ها در مقیاس متر حالت موجدار و در مقیاس سانتی‌متر حالت زبر تا صاف (کلاس V و IV) دارند. در این مقاله ضریب زبری به‌عنوان یک پارامتر احتمالاتی در نظر گرفته نشده است. در نهایت بر اساس میانگین وزنی، ضریب زبری ناپیوستگی‌های Bedding، J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub> و B.P.J به ترتیب برابر با ۳/۳۵، ۳/۸۳، ۳/۸ و ۴/۶ است که پروفیل زبری مرتبط با این محدوده در جدول (۹) نشان داده شده است.

جدول (۹): درصد محدوده زبری به تفکیک ناپیوستگی‌ها

JRC	-۲	-۴	-۶	-۸	-۱۰	-۱۲	-۱۴	-۱۶
DED.	۰	۵۵	۲۷	۵	۵	۳	۱۶	۱۸
J <sub>1</sub>	۰	۶۲	۲۹	۵	۱	۰/۵	۳	۱
J <sub>2</sub>	۲	۵۸	۲۶	۱۱	۱	۰	۳	۰
B.P.J.	۲	۴۳	۳۷	۷/۵	۴	۰	۴	۲/۵

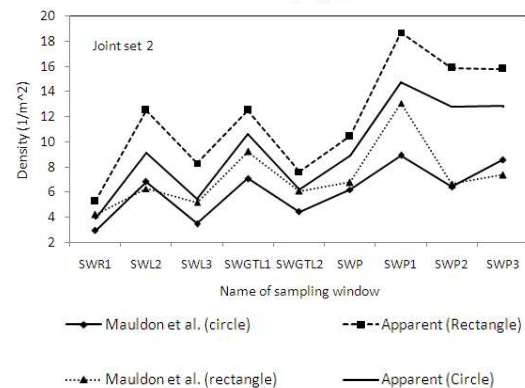
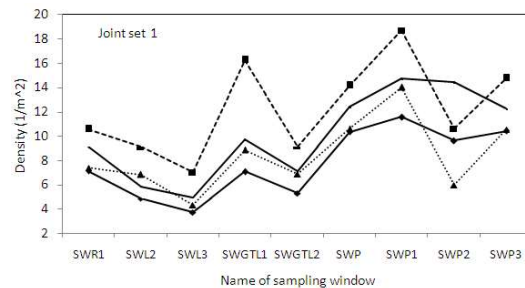


### بازشدگی

بازشدگی فاصله عمودی جدایش دیواره‌های سنگی یک ناپیوستگی باز است که با هوا یا آب پر شده است (براون، ۱۹۸۱). بازشدگی از پارامترهای مؤثر برای بررسی نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی توده سنگ است. این پارامتر نیز به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. مقدار بازشدگی با استفاده از روش‌های سوزن<sup>۲</sup>

که قابل قبول است. همچنین تفاوت ۱۷ و ۱۱ درصدی بین چگالی واقعی دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> در حالت پنجره دایره‌ای و مستطیلی به علت فاصله‌داری کمتر J<sub>1</sub> نسبت به J<sub>2</sub> است.

برای هر دو دسته درزه مورد اشاره چگالی ظاهری به علت نامعلوم بودن انتهای اثر ناپیوستگی، دارای مقدار بیشتر از چگالی واقعی جامعه آماری است. چگالی ظاهری به دلیل اثرات لبه به مقیاس وابسته است (مولدون و همکاران، ۱۹۹۹). در صورتی که ارزیاب‌های ارائه شده توسط مولدون (۲۰۰۱) به مقیاس وابسته نباشد، به‌طور خودکار موارد نامعلوم بودن انتهای اثر ناپیوستگی و اریب طول را تصحیح می‌نماید.



شکل (۱۱): چگالی سطحی واقعی و ظاهری دسته درزه‌های J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub>

### خواص مکانیکی ناپیوستگی‌ها

#### ضریب زبری ناپیوستگی‌ها

ضریب زبری از خصوصیات مهم ناپیوستگی در بررسی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری زبری سطح سنگ شامل روش‌های تماسی

<sup>1</sup> Ge  
<sup>2</sup> Needle



شکل (۱۲): پرشدگی لایه‌بندی توسط بیتومین

اکثر لایه‌بندی‌ها دارای پرشدگی بیتومین هستند. حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد سایر دسته درزها نیز فاقد پرکننده و بقیه آن‌ها دارای پرشدگی کلسیت، لوم و کمی بیتومین هستند. با توجه به نوع کانی، ضخامت و اندازه ذرات، ناپیوستگی‌های که فقط دارای بیتومین هستند نفوذپذیری کمتری نسبت به سایر ناپیوستگی‌ها دارند.

### هوازگی

کلیه ناپیوستگی‌ها در معرض هوازگی و آلتراسیون هستند. هوازگی بر روی میزان بازشدگی، نفوذپذیری و ایجاد شکستگی تأثیر می‌گذارد. در ناپیوستگی‌های مورد مطالعه آثار تجزیه و خرد شدن در سطح درزه و در مواد پرکننده قابل توجه نیست. لذا بر اساس توصیفات ارائه شده توسط ISRM، ۷۰٪ ناپیوستگی‌ها غیر هوازده و ۳۰٪ کمی هوازده هستند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بسیار مهم و نقش کلیدی ناپیوستگی‌ها در رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ، بررسی خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها برای تولید مدل‌های DFN بسیار ضروری است. در این مقاله برای بررسی خصوصیات هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌ها، مغار

آچار ضخامت‌گیری<sup>۱</sup>، کولیس مدرج<sup>۲</sup>، رنگ فلورسنت<sup>۳</sup>، پکر حساس، آزمایش هیدرولیکی، پروفیل سنج لیزری، فتوگرامتری دیجیتالی و پروفیل سنجی سایه‌ای<sup>۴</sup> اندازه‌گیری می‌شود (پریست، ۱۹۹۳). در این تحقیق از آچار فیلرگیری برای اندازه‌گیری این خصوصیت استفاده شده است. با توجه به شستشوی سطح سنگ و تأمین روشنایی مناسب سعی شده است تا حد امکان اثرات انفجار در این اندازه‌گیری تأثیر نگذارد. مقادیر بازشدگی مکانیکی اندازه‌گیری شده ناپیوستگی‌های Bedding، J<sub>1</sub>، J<sub>2</sub> و B.P.J به ترتیب برابر با ۲/۹۷، ۰/۲۲، ۰/۲۷ و ۰/۹۷ میلی‌متر است. مطابق با توصیف ارائه شده توسط ISRM ناپیوستگی‌های مورد اشاره به ترتیب نسبتاً عریض، بسته، نسبتاً باز و باز است. اغلب شکستگی‌های برشی دارای بازشدگی کمتری نسبت به نوع کششی هستند. بنابراین، مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد مقدار بازشدگی دسته درزه کششی (B.P.J) نسبت به بازشدگی دسته درزه‌های برشی (J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub>) حداقل ۳/۵ الی ۴ برابر است. مقادیر بازشدگی B.P.J، J<sub>1</sub> و J<sub>2</sub> از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند ولی بازشدگی ناپیوستگی Bedding بر اساس آزمون‌های آماری اندرسون-دارلینگ<sup>۵</sup> و کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۶</sup> در سطح معنی‌داری ۵ درصد از توزیع گاما پیروی می‌نماید.

### پرشدگی

پرکننده، مواد جداکننده دو دیوار مجاور ناپیوستگی است (پریست، ۱۹۹۳). بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده پرکننده‌های ناپیوستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه کلسیت، بیتومین و لوم است. البته در برخی موارد رگه‌های کلسیتی در بیتومین و همچنین لوم و کلسیت به‌طور هم‌زمان وجود دارد. پرکننده‌ها می‌توانند همگن یا غیر همگن باشند و به‌صورت کامل یا جزئی ناپیوستگی را پر نمایند. بیتومین به‌طور کامل سطح ناپیوستگی‌ها را پر نموده ولی پرشدگی کلسیت و لوم به‌صورت جزئی است (شکل (۱۲)).

<sup>4</sup> shadow profilometry

<sup>5</sup> Anderson-Darling

<sup>6</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>1</sup> feeler gauge

<sup>2</sup> vernier caliper

<sup>3</sup> fluorescent dye

شدت و چگالی محاسبه شده برای دسته درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$  به روش پنجره دایره‌ای دارای نوسان بوده و همچنین مقدار ثابت فیشر پایین است، توصیه شود شعاع پنجره نمونه‌برداری تا  $1/5$  متر افزایش یابد. از نکات قابل توجه دیگر این است که با وجود اینکه برخی از دسته درزه‌ها دارای ضریب زبری کم هستند ولی دارای پرشدگی بیتومین بوده که می‌تواند در راستای کاهش هدایت هیدرولیکی توده سنگ مؤثر باشد.

### سپاسگزاری

از حمایت فنی و مالی شرکت‌های توسعه منابع آب و نیروی ایران (IWPC)، مهندس مشاور مهتاب قدس و شرکت حراء (پیمانکار طرح) برای برداشت ناپیوستگی‌های محدوده مغار نیروگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

### مراجع

- 1- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. (۱۳۹۳). "گزارش زمین‌شناسی مهندسی، مطالعات مرحله دوم، طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان"، ایران.
- 2- Baghbanan, A. (2008). "Scale and Stress Effects on Hydro-Mechanical Properties of Fractured Rock Masses." PhD. Dissertation.
- 3- Brown, E. T. (1981). Editor. "ISRM suggested methods: rock characterization, testing and monitoring." London: Pergamon.
- 4- Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H. (1988). "Characterizing rock joint geometry with joint system models." *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*. 21, 21-51.
- 5- Ferrero, A. M. and Umili, G. (2011). "Comparison of methods for estimating fracture size and intensity applied to Aiguille Marbrée (Mont Blanc)." *Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 48, 1262-1270.
- 6- Ge, Y., Kulatilake, P. H. S.W., Tang, H. and Xiong, C. (2014). "Investigation of natural rock joint roughness." *Journal of Computers and Geotechnics*. 55(2014), 290-305.
- 7- Hoek, E. T. (1998). "Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان به‌عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس برداشت ۶۳۹ عدد ناپیوستگی در محدوده مغار نیروگاه سه دسته درزه به همراه لایه‌بندی مشخص شده است. از خصوصیات مهم منطقه مورد مطالعه می‌توان به فعالیت کوهزایی جوان، وجود غسل‌های فعال، آپلیفت تکتونیک، رواندگی‌های مختلف و قرارگیری مغار نیروگاه در زون کششی طاق‌دیس اشاره نمود. با توجه به رژیم تنش و تکتونیک منطقه دو دسته درزه از نوع کششی و دسته درزه دیگر از نوع برشی هستند. با توجه به فرآیند تشکیل و ژنتیک ناپیوستگی‌ها تابع چگالی احتمال طول اثر و فاصله‌داری دسته درزه‌های برشی با کششی تفاوت دارد. این موضوع نشان می‌دهد که فرآیند ساختاری و شرایط تنش منطقه مورد مطالعه (فاکتور تنش محلی) بر روی تابع چگالی احتمال پارامترهای هندسی شکستگی‌های بسیار تأثیرگذار است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، بازشدگی دسته درزه‌های کششی ۳ برابر بزرگ‌تر از دسته درزه‌های برشی است.

شرایط تکتونیک سبب شده است که مقدار ثابت فیشر سه دسته درزه بسیار پایین باشد. مقدار ثابت فیشر لایه‌بندی که در فرآیند فشاری ایجاد شده است ۵۳ الی ۷۳ درصد بزرگ‌تر از سه دسته درزه دیگر است. اختلاف طول اثر میانگین محاسبه شده بین دو روش خطی و سطحی برای دسته درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$  به ترتیب ۲۶ و صفر درصد است. همچنین توصیه می‌شود برای دسته درزه‌های با طول اثر بزرگ‌تر از یک متر، شعاع دایره و ابعاد پنجره مستطیلی نمونه‌برداری به ترتیب حداقل یک متر و  $1/8$  در  $1/8$  متر باشد.

مقدار شدت سطحی ظاهری توسط پنجره‌های مستطیلی و دایره‌ای به هم نزدیک بوده ولی بیشتر از شدت واقعی است. محاسبه شدت حجمی در منطقه بسیار مشکل است. مطابق نتایج به دست آمده، تفاوت بین دو روش محاسبه شدت حجمی برای دسته درزه‌های  $J_1$  و  $J_2$  به ترتیب ۳۸ و ۷ درصد است. البته تفاوت ۷ درصدی با توجه به ماهیت پارامتر موردقبول است. مقدار چگالی ظاهری بیشتر از چگالی واقعی و همچنین چگالی ظاهری پنجره مستطیلی بیشتر از دایره‌ای است. مقادیر شدت و چگالی به ترتیب متأثر از مقدار طول اثر و فاصله‌داری هستند. بنابراین، با توجه به اینکه مقادیر

- 16- Mandl, G. (2005). "Rock Joints, The Mechanical Genesis." Springer, ISBN-13.
- 17- Mauldon, M., Rohrbaugh, J. M. B., Dunne, W. M. and Lawdermilk, W. (1999). "Mean fracture trace length and density estimators using circular windows." *Journal of Rock mechanics for industry*. Balkema, Rotterdam, ISBN 9058090523.
- 18- Mauldon, M., Dunne, W. M. and Rohrbaugh, J. M. B. (2001). "Circular scanline and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces." *Journal of Structural Geology*. 23, 247-258.
- 19- Priest, S. D. (1993). "Discontinuity analysis for rock engineering." London: Chapman and Hall, 1993.
- 20- Priest, S. D., Hudson, J. A. (1981). "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys." *Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 18, 183-197.
- 21- Robertson, A. (1970). "The interpretation of geologic factors for use in slope theory." *In Proc. Symp. On the Theoretical Background to the Planning of Open Pit Mines with Special Reference to Slope Stability*. Johannesburg, South Africa, pp. 55-71.
- 22- Rohrbaugh, J. M. B., Dunne, W. M. and Mauldon, M. (2002). "Estimating fracture trace intensity, density and mean length using circular scan lines and windows." *The American Association of Petroleum Geologists. AAPG Bulletin*. 86(12), 2089-2104.
- 23- Sharifzadeh, M. (2015). "Characterizing rock mass geostructural features with emphasis on rock engineering applications." *ISRM 13<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada.
- 24- Song, J. J. (2006). "Estimation of areal frequency and mean trace length of discontinuities observed in Non-planar surface." *Journal of Rock mechanics and Rock Engineering*. 39(2), 131-146.
- 25- Stavropoulou, M. (2014). "Discontinuity frequency and block volume distribution in rock their impact on design." *Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 35(1), 63-68.
- 8- Jing, L. and Stephansson, O. (2007). "Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Application." *Developments in Geotechnical Engineering*. Chapter 5.
- 9- Kamali, A., Shahriar, K., Sharifzadeh M., Aalianvari, A. A. and Esmaeilzadeh, A. (2016). "Effect of shape and size of sampling window on the determination of average length, intensity and density of trace discontinuity." *EUROCK 2016*, Turkey, under press.
- 10- Kulatilake, P. H. S. W. (1986). "Bivariate normal distribution fitting on discontinuity orientation clusters." *Journal of Mathematical Geology*. 18(2), 181-195.
- 11- Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N., Poulton M. and Stephansson O. (1990). "Analysis of Structural homogeneity of Rock masses." *Journal of Engineering Geology*. 29, 195-211.
- 12- Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephansson, O. (1993). "Joint Network Modeling with a Validation Exercise in Stripa Mine, Sweden." *Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomech*. 30 (5), 503-526.
- 13- Kulatilake, P. H. S. W., Wang, M., Escandon, R. F., and Narvaiz, J. (2003). "Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA." *Journal of Engineering Geology*. 70, 131-155.
- 14- Lei, Q., Latham, J-P., Xiang, J., Tsang, C-F., Lang, P. and Guo, L. (2014). "Effects of geomechanical changes on the validity of discrete fracture network representation of realistic two-dimensional fractured rock." *Journal of Rock mechanics & Mining sciences*. 70, 507-523.
- 15- Mahtab, A., Xu, S., Grasso, P., and kendoriski, F. S. (1995). "Use of alternative distributions for characterizing joint extent and spacing. Fractured and jointed Rock masses." Balkema, Rotterdam. ISBN 9054105917.

- Proceeding international. conference, Vienna*, Balkema, Rotterdam, pp. : 543-550.
- 31- Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P. D., Virgo, S. and Blum, P. (2013). "Fracture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps." *Journal of Computers & Geosciences*. 60, 11-22.
- 32- Zhang, L. and Einstein, H. H. (2000). "Estimating the intensity of rock discontinuities." *Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 37, 819-837.
- 33- Zhang, L. and Ding, X. (2010). "Variance of non-parametric rock fracture mean trace length estimator." *Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 47, 1222-1228.
- 34- Zhang, W., Chen, J. P., Cao Z. X. and Wang, R. Y. (2013). "Size effect of RQD and generalized representative volume elements: a case study on an underground excavation in Baihetan dam, Southwest China." *Journal of Tunneling Underground Space Technology*. 35, 89-98.
- masses." *Journal of Rock mechanics & Mining Science*. 65, 62-74.
- 26- Torres, C. A. (2008). "Geometric Characterization of Rock Mass Discontinuities Using terrestrial Laser Scanner and Ground Penetrating Radar." M.S. Thesis.
- 27- Wang, X. (2005). "Multi-dimensional intensity measures for Fisher-distributed fractures in Civil Engineering." PhD. Dissertation.
- 28- Weiss, M. (2008). "Techniques for estimating fracture size: A comparison of methods, Technical note." *Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. 45, 460-466.
- 29- Ye, J., Zhang, Y., Sun, J. and Wu, F. (2012). "Correction of probabilistic density function of discontinuities spacing considering the statistical error based on negative exponential distribution." *Journal of Structural Geology*. 40, 17-28.
- 30- Young, D. S. (1990). "Joint Modeling for Rock Mechanics. In Rossmannith H.P.(ed), Mechanics of Jointed and Faulted Rock."

## Statistical Investigation of Discontinuity Properties to Generate Discrete Fractured Network - Case study: Cavern of Rodbar Lorestan Pumped Storage Power Plant

Abbas Kamali Bandpey <sup>1</sup>

Kourosh Shahriar <sup>\*2</sup>

Mostafa Sharifzadeh <sup>3</sup>

Parviz Marefvand <sup>4</sup>

### Abstract

Generating discrete fractured network (DFN) at the base of geometrical and physical characterizations of discontinuities is one the most important methods to study the discontinuity system effect on rock mass. In this paper characterizations of 639 discontinuities surveyed in powerhouse cavern of Rodbar Lorestan project have been studied by scanline and areal sampling methods. Based on the processes and corrections of bias types, one bedding and three joint sets were existed in the site. The tectonic activities and direction of principal stresses have caused differences in trace length and spacing characteristics and the probability distribution function of joint sets based on their genetic types. The calculated average trace length by scanline and areal method are very close for one joint set and for the other one the difference is 26%. The density differences between circular and rectangle sampling windows for joint sets  $J_1$  and  $J_2$  are 7% and 15%, respectively. The differences between actual and apparent intensity in circular sampling for joint sets  $J_1$  and  $J_2$  are 12% and 14%, respectively. Meanwhile, the volumetric intensity calculated by various methods have shown that the calculation of this characteristic is very difficult in the field.

### Keywords

Discontinuity, Geometrical and Physical Characterizations, Cavern, Rodbar Lorestan Pumped Storage.

---

1 PhD. Student, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2\* Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3 Associate Professor, Department of Mining Engineering and Metallurgy Engineering, Western Australian School of Mines (WASM), Curtin University, Australia.

4 Associate Professor, Department of Mining Engineering and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 2016/04/27

Accepted: 2016/07/26