نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره نهم / تابستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 9 / September 2016

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

عباس کمالی بندپی [۱]
کوروش شهریار* [۲]
مصطفی شریف زاده [۳]
پرویز معارف وند [۴]

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 به‌وسیله 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_1 و J_2 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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

مقدمه

ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ تأثیر بسزایی بر روی تغییر شکل، مقاومت، رابطه تنش و کرنش و شکست توده سنگ دارند (یی[1] و همکاران، ۲۰۱۲)؛ بنابراین به‌منظور 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(DFNE[2]) در جدول (۱) ارائه شده است، (شریف‌زاده[3]،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[4] بودن منطقه به دلیل وجود پهنه زاگرس بلند اشاره نمود.

اولین قدم در مدل‌سازی هندسه ناپیوستگی[5] در توده سنگ، شناسایی نواحی همگن آماری در محدوده مورد مطالعه است (کولاتیلاک[6] 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[7] مختلفی وجود دارد، خصوصیات ناپیوستگی بسیار متغیر است و یا هنگامی‌که درجه اطمینان بالاتری برای طراحی نیاز باشد اندازه‌گیری بیشتری نیاز است (پریست[8]،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[9]، 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[10]، ۱۹۹۸). انجام آنالیزهای عدم قطعیت و احتمالاتی بر روی داده‌ها به همراه نگرش زمین‌ساختاری می‌تواند منجر به اخذ خصوصیات قابل اعتماد برای ناپیوستگی‌ها شود. ازاین‌رو، با توجه به ماهیت ذاتی آماری هندسه ناپیوستگی‌ها، تحلیل آماری بر روی داده‌های تصحیح شده، انجام گردید. همچنین پارامترهای ثابت فیشر[11] 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. ازاین‌رو 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

[1] Ye
[2] Discrete Fracture Network Engineering
[3] Sharifzadeh
[4] Tectonized
[5] Sharifzadeh
[6] Discountinuity
[7] Lithology
[8] Priest
[9] Spacing
[10] Hoek
[11] Fisher

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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 و به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل‌های DFN تحت آنالیز و پردازش قرار گرفته است.

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

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

زمین‌شناسی و زمین‌ساخت[1] 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)). برونزدهای[2] سازند دالان با ضخامت حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر متشکل از آهک، آهک دلومیتی 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)). دراین‌بین، گسل سراوند

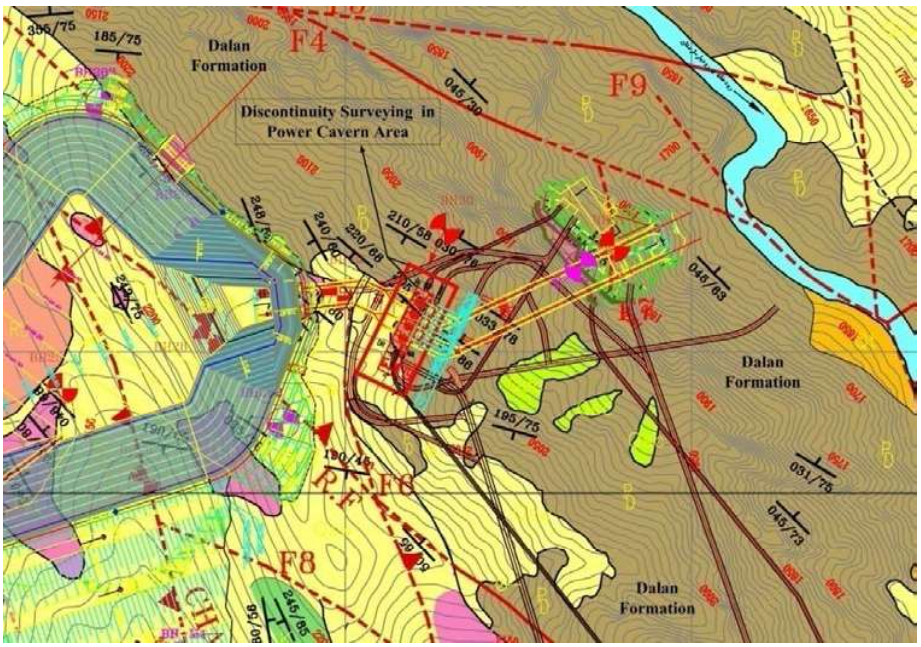
[1] Tectonic
[2] Outcrop

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

-بزنوید با طول حدود ۹۶ کیلومتر که بخشی[1] از گسل اصلی جوان زاگرس بوده مهم‌ترین گسل فعال (کواترنری) و لرزه‌زا است. این گسل بیشترین تأثیر را بر مقادیر پارامترهای جنبش نیرومند در ساختگاه خواهد داشت. گسل جوان زاگرس یک گسل کواترنری با عملکرد امتدادلغز (راستالغز) راست‌گرد است. مغار نیروگاه زیرزمینی در فاصله حدود ۱/۳ کیلومتری گسل سراوند بزنوید 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

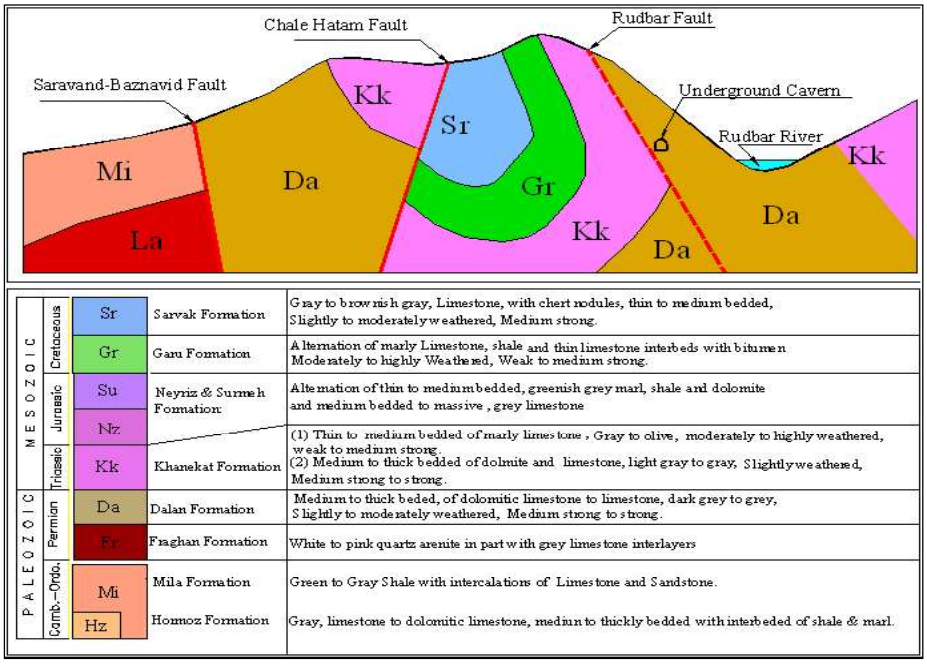
جهت ثبت پارامترهای هندسی و فیزیکی ناپیوستگی‌ها در رخنمون‌ها از روش‌های خط برداشت، نمونه‌برداری دایره‌ای یا مستطیلی استفاده می‌شود. روش خط برداشت به‌طور گسترده استفاده شده و امکان آنالیز سریع از خصوصیات شکستگی را فراهم می‌کند. با این روش چگالی شکستگی قابل محاسبه نبوده ولی امکان تعیین شدت خطی وجود دارد. 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[2] 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 حفاری‌شده است (شکل (۳)).



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)

[1] Segment
[2] Zeeb

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]



MESOZOIC	Cretaceous	Sr	Sarvak Formation	Gray to brownish gray, Limestone, with chert nodules, thin to medium bedded, Slightly to moderately weathered, Medium strong.
		Gr	Gam Formation	Alternation of marly Limestone, shale and thin limestone interbeds with bitumen Moderately to highly Weathered, Weak to medium strong.
	Jurassic	Su	Neyriz & Surmeh Formation	Alternation of thin to medium bedded, greenish grey marl, shale and dolomite and medium bedded to massive , grey limestone
		Nz		
	Triassic	Kk	Khanekat Formation	(1) Thin to medium bedded of marly limestone , Gray to olive, moderately to highly weathered, weak to medium strong. (2) Medium to thick bedded of dolmite and limestone, light gray to gray, Slightly weathered, Medium strong to strong.
PALEOZOIC	Permian	Da	Dalan Formation	Medium to thick beded, of dolomitic limestone to limestone, dark grey to grey, Slightly to moderately weathered, Medium strong to strong.
		Fr	Faraghan Formation	White to pink quartz arenite in part with grey limestone interlayers
	Camb.–Ordo.	Mi	Mila Formation	Green to Gray Shale with intercalations of Limestone and Sandstone.
		Hz	Hormoz Formation	Gray, limestone to dolomitic limestone, medium to thickly bedded with interbeded of shale & marl.

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

یکی از معایب اندازه‌گیری خصوصیات ناپیوستگی‌ها در سطوح سنگی، وجود نواحی آسیب‌دیده در اثر عملیات آتشباری و پوشیده شدن سطوح توسط خاک و گیاه است. ازاین‌رو به‌منظور 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[1] (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 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 پریست (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[2]) 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[3]) 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 J_1 و J_2، پنجره‌های نمونه‌برداری دایره‌ای و مستطیلی فقط برای آنالیز این دسته درزه‌ها مورد استفاده

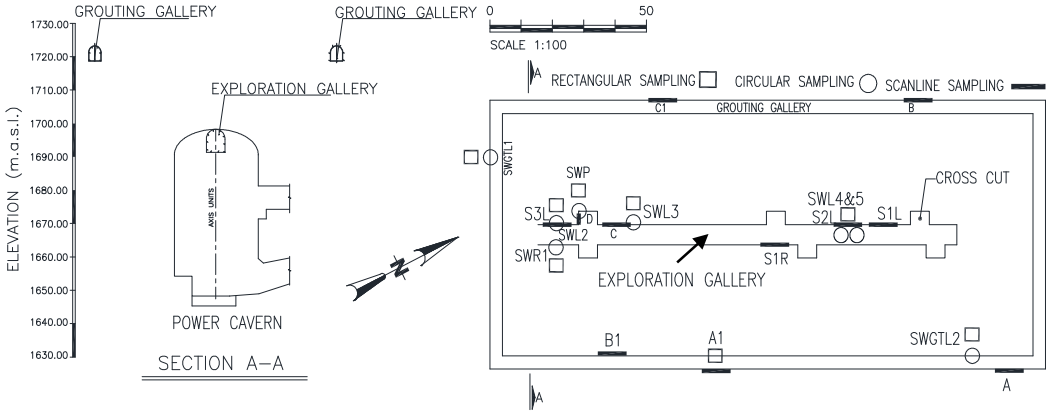
[1] Weiss
[2] Analysis of Variance
[3] Bedding Plane Joint

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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[1]، 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[2] 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 دارای یک انتهای قابل رؤیت باشند، مدنظر قرار گیرد (پریست، ۱۹۹۳). در این مطالعه تعداد ۶۳۹ ناپیوستگی برداشت‌شده 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[3]، ۲۰۰۵).



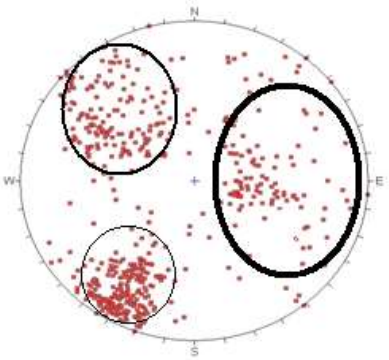
شکل (۳): موقعیت گالری اکتشافی در سقف مغار نیروگاه و گالری تزریق پیرامون آن به همراه موقعیت خطوط برداشت و نمونه‌برداری‌های سطحی (دایره‌ای و مستطیلی)



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

[1] Zhang
[2] Kulatilake
[3] Mandl

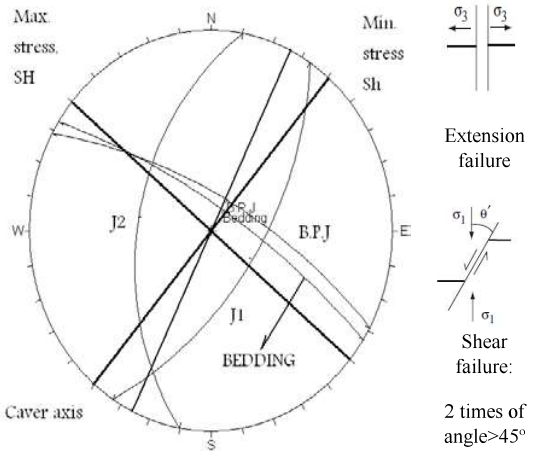
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]



Number of discontinuties:
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

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 HTPF 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 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 BPJ 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. به‌عبارت‌دیگر، 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

نتایج

جهت‌داری ناپیوستگی

ارزیابی ناپیوستگی‌ها و جهت‌داری آن‌ها در اکثر موارد یکی از مهم‌ترین خصوصیت زمین‌شناسی به‌منظور طراحی فضاهای زیرزمینی و سازه‌های بناشده روی توده سنگ است. در توده سنگ سخت، به‌طورمعمول ناپیوستگی‌ها به‌صورت درزه‌ها با جهت‌داری مشخص رخ می‌دهند (کولاتیلاک[1]، ۱۹۸۶). به‌طورکلی شکستگی‌های تشکیل‌شده در یک رخداد زمین‌شناسی مشابه دارای خواص مشابه (به‌عنوان‌مثال، جهت‌داری ترجیحی) هستند بنابراین قبل از پردازش آماری، دسته‌بندی شکستگی‌های به خوشه‌های مجزا بسیار مهم است (لی[2]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 صفرتا ۷۰۰ است اما در علم مکانیک سنگ و تحلیل جهت‌داری دسته درزه‌ها معمولاً ین ضریب بین ۲۰ تا ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود (یانگ[3]، ۱۹۹۰). برای ثابت فیشر مقادیر ۱۸۴ الی ۴۳۶ (تورس[4]، ۲۰۰۸) و ۶ الی ۱۰(باغبانان[5]، ۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. مطابق جدول (۲) به‌غیراز لایه‌بندی، سایر ناپیوستگی‌ها دارای ثابت فیشر کمتر از ۲۰ بوده و این نشان‌دهنده بالا بودن فعالیت‌های تکتونیکی محدوده مورد مطالعه است. زاویه ρ، زاویه بین خط برداشت و بردار قطب میانگین فیشر است. این زاویه جهت تبدیل شدت خطی و سطحی به شدت حجمی موردنیاز است (وانگ[6]، ۲۰۰۵).

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[7]، 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 برداشت‌شده (۱۵۰ عدد) نسبت به خط برداشت نامعلوم (سانسور شده) هستند (قابل‌مشاهده نیستند) برای بررسی مقدار طول اثر، فقط طول ناپیوستگی‌های J_1، J_2 و BPJ 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[8]، ۱۹۸۸). با توجه به محل قرارگیری خط برداشت و محدوده سطح برداشت در تونل مورد مطالعه، وضعیت انتهای ناپیوستگی‌ها به سه حالت: هر دو انتها معلوم (نوع اول یا ۲-۲)، یک انتها در بالا یا پایین خط برداشت

[1] Kulatilake
[2] Lei
[3] Young
[4] Torres
[5] Baghbanan
[6] Wang
[7] Brown
[8] Dershowitz&Einstein

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

معلوم (نوع دوم یا ۲-۳ یا ۳-۲) 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[1]، اندرسون-دارلینگ[2] و کلموگرف-اسمیرنوف[3] 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 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[4]، لوگ نرمال، گاما و نمایی رایج هستند. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، طول اثر دسته درزه‌های J_1 و J_2 که از نوع برشی هستند از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند.

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)	
	تصحیح‌نشده	تصحیح شده	تصحیح‌نشده ه	تصحیح شده	تصحیح‌نشده ه	تصحیح شده	در راستای 001/206 & 001/026	در راستای 001/296
Bedding	۷۷	۷۶	۰۳۲	۰۳۳	۲۸/۶	۲۵/۶	۱۵/۶	*
J1	۶۲	۶۰	۱۲۹	۱۲۳	۱۳/۵	۱۷/۳	۸۴	۳۰
J2	۴۵	۴۶	۲۶۳	۲۸۰	۶/۶	۹/۵	۷۸/۶	۴۷
B.P.J.	۷۳	۷۰	۰۲۹	۰۲۹	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

روش ncr	&تعداد %	تابع چگالی احتمال								نوع	ناپیوستگی
		رتبه ۴		رتبه ۳		رتبه ۲		رتبه ۱			
*	۱۶۷ & ۱۰۰	*		ویبول		لوگ نرمال		گاما		All	J_1(برشی)
				انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
				۷۱	۶۰	۵۳	۶۳	۴۴	۶۲		
*	۷۵&۱۲۵	*		ویبول		گاما		لوگ نرمال		2-2	
				۷۲	۶۳	۴۴	۶۵	۴۹	۶۵		
۶۰	۲۵ & ۴۲	ویبول		نمایی		گاما		لوگ نرمال		2-3 & 3-2	
		۷۰	۵۴	*	۵۸	۵۷	۵۸	۶۵	۵۸		
*	۱۰۰&۱۳۳	*		گاما		ویبول		لوگ نرمال		All	J_2 (برشی)
				۵۷	۶۳	۷۳	۶۳	۶۳	۶۳		
*	۷۸ & ۱۰۳	*		گاما		ویبول		لوگ نرمال		2-2	
				۵۴	۶۸	۷۵	۶۴	۵۴	۶۸		
۶۴	۲۲ & ۳۳	گاما		نمایی		ویبول		لوگ نرمال		2-3 & 3-2	
		۶۷	۴۷	*	۴۷	۵۴	۳۹	۵۳	۴۱		
*	۱۰۰&۱۵۸	نمایی		لوگ نرمال		گاما		ویبول		All	B.P.J(کششی)
		*	۱۶۳	۲۰۹	۱۷۶	۱۲۲	۱۶۳	۲۰۴	۱۶۱		
*	۶۴&۱۰۱	*		لوگ نرمال		گاما		ویبول		2-2	
				۹۳	۱۰۰	۷۴	۹۸	۱۱۳	۹۴		
۴۳۹	۳۶ & ۵۷	ویبول		گاما		لوگ نرمال		یکنواخت		2-3 & 3-2	
		۲۹۷	۲۸۰	۹۹	۲۸۲	۱۰۵	۲۸۳	۹۹	۲۸۳		

[1] Chi-Square
[2] Anderson-Darling
[3] Kolmogorov-Smirnov
[4] Pareto

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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 کوتاه شدگی وجود دارد و باید تصحیح خطای طول انجام شود. برای حذف خطای کوتاه شدگی، طول حد ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع تابع چگالی احتمال و سطح کوتاه‌سازی برای تصحیح اریب ناپیوستگی‌های نوع سوم، از روش ncr استفاده شده (پریست و هادسون[1]، ۱۹۸۱). در این روش n تعداد کل ناپیوستگی، c سطح کوتاه شدگی[2] و r تعداد ناپیوستگی‌های که طول نیم اثر آن‌ها کمتر از مقدار c است، است. مقدار سطح کوتاه‌سازی برای J_1، J_2 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_1، J_2 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_1 و J_2 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 موردنیاز است (روهرباق[3] و همکاران، ۲۰۰۲). برای محاسبه طول اثر میانگین ناپیوستگی‌های J_1 و J_2 از ۱۵ پنجره مستطیلی و ۱۲ پنجره دایره‌ای نیز استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط نمونه‌برداری پنجره‌ای می‌تواند تحت تأثیر اریب‌های 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[4] 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[5] و همکاران (۲۰۰۱)، اندرسون و دوراستروپ (فررو و وامیلی[6]، ۲۰۱۱) و پاول و لاسلت (پریست، ۱۹۹۳) استفاده شده است. در شکل (۷) نتایج محاسبه میانگین طول اثر دسته درزه‌های J_1 و J_2 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_1 و J_2 به ترتیب، ۲۶ الی ۶۷ سانتی‌متر و ۳۷ الی ۱۰۰ سانتی‌متر است. میانگین طول اثر دسته درزه‌های J_1 و J_2 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_1 و J_2 محاسبه و با مقادیر به‌دست‌آمده 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_1 و J_2 به ترتیب ۲۶ و صفر درصد است. مقدار انحراف معیار دسته درزه‌های J_1 و J_2 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

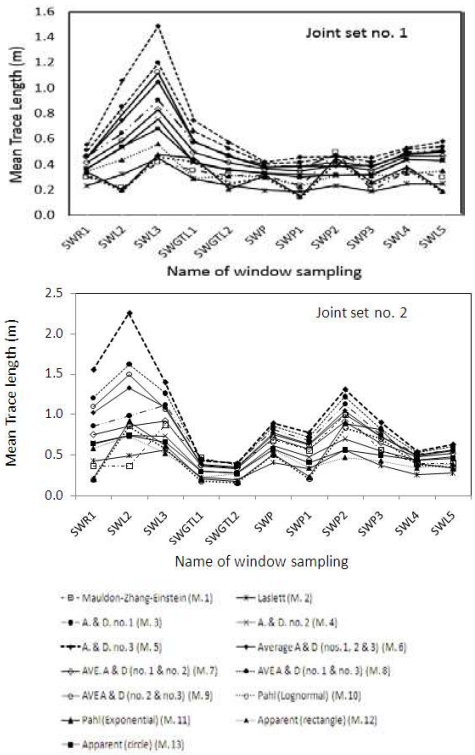
[1] Priest&Hudson
[2] Curtailment
[3] Rohrbaugh
[4] Kamali
[5] Mauldon
[6] Ferrero&Umili

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

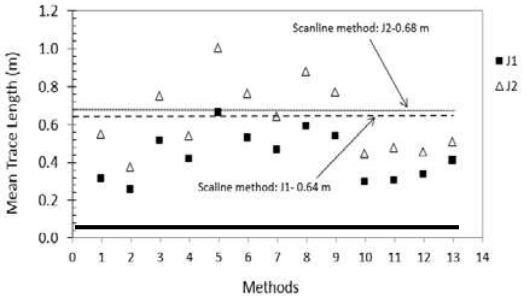
خطی و سطحی، میانگین طول اثر برای دسته درزه‌های J_1 و J_2 به ترتیب ۵۶ و ۶۸ سانتی‌متر محاسبه گردید.

اندازه (قطر) ناپیوستگی

تداوم (اندازه) ناپیوستگی که به‌صورت گسترش سطحی یا اندازه ناپیوستگی در راستای یک صفحه تعریف می‌شود، می‌تواند به‌طور 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[1] (۱۹۷۰) و سانگ[2] (۲۰۰۶)) البته در این خصوص توافق عام وجود ندارد.



شکل (۷): نتایج میانگین طول اثر دسته درزه‌های J_1 و J_2با استفاده از روابط مختلف



شکل (۸): میانگین طول اثر محاسبه شده به روش پنجره‌ای برای دو دسته درزه J_1 و J_2 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[3] 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[4] و همکاران، ۱۹۹۵). در محدوده مورد مطالعه سه نوع فاصله‌داری شامل کل[5]، فاصله‌داری هر دسته ناپیوستگی در راستای خط برداشت[6] و در راستای بردار نرمال متوسط[7] 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

[5] Total spacing
[6] Set spacing
[7] Mean Normal Vector (MNV)

[1] Robertson
[2] Song
[3] Kulatilake
[4] Mahtab

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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

ضریب تغییرات	تابع چگالی احتمال						نوع فاصله‌داری	ناپیوستگی
	رتبه ۳		رتبه ۳		رتبه ۳			
۱/۵	نمایی		لوگ نرمال		ویبول		**Set spacing**	J_1 (برشی)
	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
	*	۶۳	۱۴۴	۷۰	۸۸	۵۸		
۱/۷	گاما		لوگ نرمال		ویبول		**Normal**	
	۲۸	۲۱	۸۰	۲۴	۲۹	۱۷		
۱/۴	نمایی		لوگ نرمال		ویبول		**Set spacing**	J_2 (برشی)
	*	۷۲	۱۴۲	۷۳	۸۵	۶۰		
۱/۶	*		لوگ نرمال		ویبول		**Normal**	
	*	*	۸۶	۳۱	۳۵	۲۲		
۱/۴	نمایی		ویبول		لوگ نرمال		**Set spacing**	B.P.J(کششی)
	*	۵۳	۵۹	۴۴	۷۲	۵۰		
۱/۵	نمایی		ویبول		لوگ نرمال		**Normal**	
	*	۴۸	۵۴	۴۰	۷۰	۴۶		
۱/۱	نمایی		ویبول		لوگ نرمال		**Set spacing**	لایه‌بندی
	*	۵۶	۶۱	۴۹	۶۰	۵۳		
۱/۱	نمایی		ویبول		لوگ نرمال		**Normal**	
	*	۵۳	۵۷	۴۶	۵۵	۵۰		

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

نوع	طول اثر (سانتی‌متر)			قطر (سانتی‌متر)		
	Mean	S.D.	C.O.V.	Mean	S.D.	C.O.V.
Bed.	۱۶۰۰	۴۰۰	۰/۲۵	۲۰۷۵	۲۷۸	۰/۱۳
J_1	۵۶	۳۳	۰/۵۹	۵۸	۲۸	۰/۴۸
J_2	۶۸	۳۸	۰/۵۶	۷۲	۳۳	۰/۴۶
B.P.J.	۲۱۹	۷۱	۰/۳۲	۲۷۳	۴۰	۰/۱۵

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[1]، ۲۰۱۴). همان‌طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود، برای دسته درزه‌های J_1 و J_2 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_{10})، سطحی (P_{21})، حجمی (P_{32}) بوده که همگی دارای بعد L^{-1} هستند؛ بنابراین با توجه به اهمیت زیاد، خصوصیت شدت

[1] Stavropoulou

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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 (MNV[1]) و خط برداشت در جدول (۶) ارائه شده است. مقدار فرکانس کل[2] (λ_s)، چهار دسته ناپیوستگی در جهت خط برداشت (N26E) با استفاده از رابطه (۱) برابر است با $۰/۰۴\ cm^{-1}$ (جینگ[3] و همکاران، ۲۰۰۷).

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{D} \lambda_i \cos\delta_i \left(-90^\circ \le \delta_i \le 90^\circ\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، D= تعداد دسته ناپیوستگی، λ_i= فرکانس در جهت نرمال دسته ناپیوستگیiام، δ_i= زاویه حاده بین خط نمونه‌برداری و بردار نرمال دسته ناپیوستگیiام.

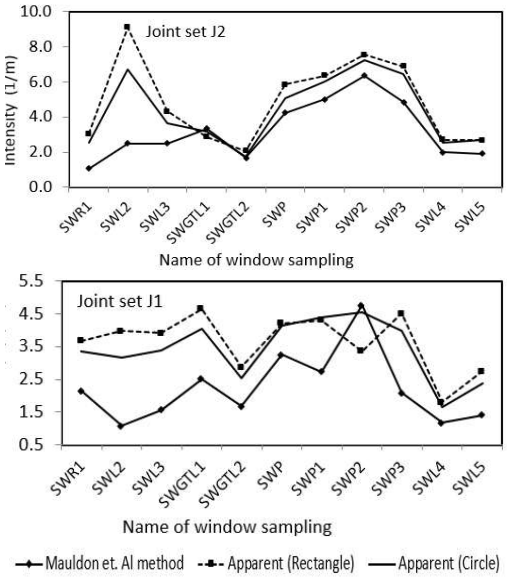
جدول (۶): مقادیر شدت خطی به تفکیک دسته درزه‌ها در جهت‌های بردار نرمال میانگین و خط برداشت (1/cm)

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	۰/۰۶
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 (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 ۳، ۳/۶ و ۳/۴ (m^{-1}) و برای دسته درزه J_2 به ترتیب برابر با ۴/۳،۸/۷ و ۴/۳ (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

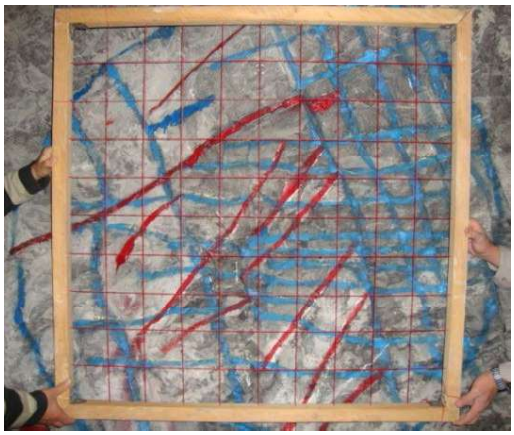
شدت حجمی

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

[1] Mean Normal Vector
[2] Total frequency
[3] Jing

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

است. در این بررسی شدت حجمی به دو روش کولاتیلاک[1] و همکاران (۱۹۹۳) و ژانگ و اینشتین[2] (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 هایده در ده سانتی‌متر ساخته شده است (شکل (۱۰)). در روش کولاتیلاک و همکاران برای محاسبه P_{32} 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_1 و J_2 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^{-1}) دسته درزه‌های J_1 و J_2 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

همچنین شدت حجمی کلیه ناپیوستگی‌ها به روش کولاتیلاک و همکاران و میانگین نتایج کلیه پنجره‌های نمونه‌برداری به روش ژانگ و اینشتین[3] برای دسته درزه‌های J_1 و J_2در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار اختلافP_{32} محاسبه شده به دو روش برای دسته درزه‌های J_1 و J_2 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^{-1}) همه دسته درزه‌ها به روش کولاتیلاک و همکاران و میانگین نتایج شدت حجمی همه پنجره‌های نمونه‌برداری برای دسته درزه‌های J_1 و J_2 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_{20}) برابر است با تعداد مرکز اثر شکستگی‌های بر واحد ناحیه سطح نمونه‌برداری (روهرباق و همکاران، ۲۰۰۲). برای محاسبه P_{20} 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_1 و J_2 محاسبه شده و در شکل (۱۱) ارائه شده است.

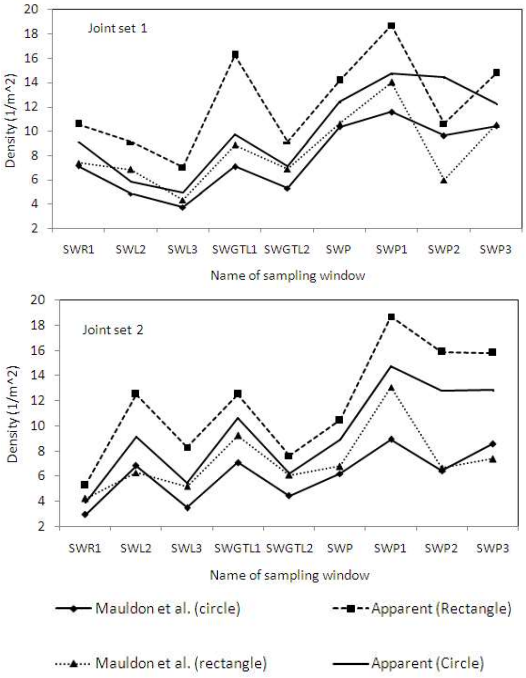
میانگین مقادیر چگالی واقعی پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی و همچنین مقدار چگالی ظاهری برای هر دو نوع پنجره نمونه‌برداری برای دسته درزه J_1 به ترتیب برابر با ۷/۵، ۷/۸، ۹/۱ و ۱۱/۲(m^{-2}) و برای دسته درزه J_2 به ترتیب برابر با ۶/۲، ۶/۹، ۸/۷ و ۱۱(m^{-2}) محاسبه شده است. اختلاف بین چگالی واقعی در حالت پنجره‌های دایره‌ای و مستطیلی برای دسته درزه‌های J_1 و J_2 به ترتیب ۴ و ۱۰ درصد است

[1] Kulatilake
[2] Zhang & Einstein
[3] Einstein

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

که قابل‌قبول است. همچنین تفاوت ۱۷ و ۱۱درصدی بین چگالی واقعی دسته درزه‌های J_1 و J_2 در حالت پنجره دایره‌ای و مستطیلی به علت فاصله‌داری کمتر J_1 نسبت به J_2 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). درصورتی‌که 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_1 و J_2

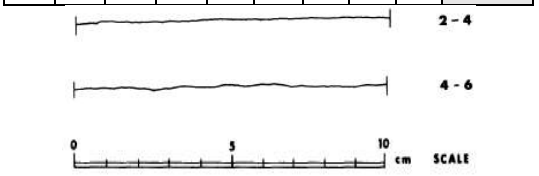
خواص مکانیکی ناپیوستگی‌ها

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 و غیر تماسی وجود دارد (جی[1] و همکاران، ۲۰۱۴). ضریب زبری همه ناپیوستگی‌ها به‌وسیله 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. درنهایت بر اساس میانگین وزنی، ضریب زبری ناپیوستگی‌های Bedding، J_1، J_2 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	۰-۲	۲-۴	۴-۶	۶-۸	۸-۱۰	۱۰-۱۲	۱۲-۱۴	۱۴-۱۶	۱۶-۱۸
DED.	۰	۵۵	۲۷	۵	۵	۳	۳	۱	۱
J_1	۰	۶۲	۲۹	۵	۱	۰/۵	۲	۰/۵	۰
J_2	۲	۵۸	۲۶	۱۱	۱	۰	۳	۰	۰
B.P.J.	۲	۴۳	۳۷	۷/۵	۴	۰	۴	۲/۵	۰



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[2]،

[1] Ge
[2] Needle

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

آچار ضخامت گیری[1]، کولیس مدرج[2]، رنگ فلورسنت[3]، پکر حساس، آزمایش هیدرولیکی، پروفیل سنج لیزری، فتوگرامتری دیجیتالی و پروفیل سنجی سایه‌ای[4] اندازه‌گیری می‌شود (پریست، ۱۹۹۳). در این تحقیق از آچار فیلر گیری 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_1، J_2 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 بازاست. 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_1 و J_2) حداقل ۳/۵ الی ۴ برابر است. مقادیر بازشدگی B.P.J، J_1 وJ_2 از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند ولی بازشدگی ناپیوستگی Bedding بر اساس آزمون‌های آماری اندرسون-دارلینگ[5] و کلموگروف-اسمیرنف[6] 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).



شکل (۱۲): پر شدگی 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.

هوازدگی

کلیه ناپیوستگی‌ها در معرض هوازدگی و آلتراسیون هستند. هوازدگی 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 قابل‌توجه 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

[1] feeler gauge
[2] vernier caliper
[3] fluorescent dye
[4] shadow profilometry
[5] Anderson-Darling
[6] Kolmogorov-Smirnov

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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 گسل‌های فعال، آپلیفت تکتونیکی، رو راندگی‌های 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 تکتونیکی 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 ۱/۸ در ۱/۸ 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 به‌دست‌آمده، 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 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 ۱/۵ متر افزایش یابد.

از نکات قابل‌توجه دیگر این است که باوجوداینکه 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 مهاب قدس و شرکت حراء (پیمانکار طرح) برای برداشت ناپیوستگی‌های محدوده مغار نیروگاه تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

۱- شرکت مهندسی مشاور مهاب 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 geometrywith 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 Marbree (Mont Blanc). ”*Journal of Rock Mechanic 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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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 Slop 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 13th 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 kendorski, F. S. (1995). "Use of alternative distributions for characterizing joint extent and spacing. Fractured and jointed Rock masses." Balkema, Rotterdam. ISBN 9054105917.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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." *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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]

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

Abbas Kamali Bandpey [1]
Kourosh Shahriar [*2]
Mostafa Sharifzadeh [3]
Parviz Marefvand [4]

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.1.1]