# تعیین ویژگی‌های هندسه ناپیوستگی‌ها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال

علیرضا یاراحمدی، سلیمان کاک‌ممی، جواد غلام‌نژاد*،
محمدتقی صادقی، مجید مبینی؛ دانشگاه یزد

**تاریخ: دریافت** ۹۱/۳/۷ **پذیرش** ۹۲/۸/٦

## چکیده

اندازه‌گیری درجای هندسه ناپیوستگی‌ها در توده‌های سنگی به‌روش دستی غالباً فرآیندی کند و خطرناک است. هم‌چنین در بسیاری از موارد قسمت بزرگی از رخنمون سنگ دور از دسترس است. بنا بر این دست‌یابی به روشی سریع و ایمن برای به‌دست آوردن پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها ضرورت دارد. برای این منظور، تکنیک‌های توسعه یافته در حوزهٔ پردازش تصاویر دیجیتال بسیار کارآمد و مفید هستند. از مزایای این روش نسبت به‌روش‌های دستی می‌توان به ایمنی بیش‌تر، سرعت بیش‌تر، توانایی برداشت تمامی درزه‌ها و رخ دادن خطای کم‌تر در به‌دست آوردن داده‌ها اشاره کرد. در این روش با توجه به‌میزان اختلاف سطح خاکستری ناپیوستگی‌ها با زمینهٔ رخساره، ناپیوستگی‌های موجود در رخساره سنگ آشکارسازی شده و بعضی از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها به‌دست می‌آیند. مراحل سیستم آنالیز خودکار هندسه ناپیوستگی‌ها شامل: ۱. تهیهٔ عکس از جبهه کار، ۲. اعمال پیش‌پردازش بر روی تصاویر، ۳. آشکارسازی لبه‌ها با آشکارساز کنی، ٤. توصیف لبه‌ها با استفاده از آشکارساز خط با تبدیل هاف، ٥. تخمین دسته درزه‌ها با استفاده از روش‌های فازی و ٦. به‌دست آوردن خصوصیات توده سنگ است. این مراحل در نرم‌افزار مطلب کد نویسی شده‌اند به‌طوری‌که بعضی از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر: فاصله‌داری، چگالی درزه‌داری خطی، تداوم، زاویهٔ اثر درزه‌ها و RQD به‌صورت خودکار به‌دست می‌آیند. در این مقاله روش پردازش تصویر دیجیتالی برای تعیین مقادیر پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها بر روی توده‌ای ماسه‌سنگی انجام گرفته است. نتایج این روش روی تودهٔ ماسه سنگی نشان می‌دهد که این رخساره دارای سه دسته درزه غالب به‌ترتیب با زوایای اثر ۷، ۵۵ و ۱۵۵ درجه‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** هندسه ناپیوستگی‌ها، پردازش تصویر دیجیتال، آشکارساز کنی، تبدیل هاف، روش‌های فازی. نرم‌افزار مطلب.

* **نویسنده مسئول** j.gholamnejad@yazduni.ac.ir

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

## مقدمه

تأثیر ناپیوستگی‌های موجود در تودهٔ سنگ بر ویژگی‌های مهندسی سنگ به‌مراتب بیش از نقشی است که مادهٔ سنگ در این مورد دارد. دلیل اصلی بررسی درزه‌ها این است که درزه‌ها، تودهٔ سنگ را به نواحی مختلفی تقسیم می‌کنند به‌طوری‌که لغزش می‌تواند در امتداد سطوح درزه رخ دهد. درزه‌ها هم‌چنین مسیری را برای نفوذ سیال به داخل تودهٔ سنگ فراهم می‌آورند. در بررسی پایداری دیواره‌های سنگی و انواع ریزش‌ها، هندسهٔ ناپیوستگی‌ها و وضعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به یک‌دیگر اهمیت به‌سزایی دارد. می‌توان گفت که اگر در مهندسی خاک مقاومت مکانیکی تودهٔ خاکی در درجهٔ اول اهمیت قرار دارد، در پایداری تودهٔ سنگ وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ نقش اصلی را ایفا می‌کند [۱]. بنا بر این دست‌یابی به اطلاعاتی در خصوص ساختار تودهٔ سنگ (مانند جهت‌یابی، بازشدگی، شرایط سطح و تداوم ناپیوستگی‌ها) برای طراحی بهینه در مسایل مهندسی سنگ و رفتار مکانیکی تودهٔ سنگ ضرورت دارد. هدف اصلی در این مقاله به‌دست آوردن زوایای اثر ناپیوستگی‌ها و تعیین برخی از خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر فاصله‌داری و تداوم در صفحه عکس‌های دیجیتالی است که از رخساره سنگ گرفته شده‌اند. پردازش تصاویر دیجیتالی با برنامه‌ای که در نرم‌افزار مطلب توسط مؤلفان به‌منظور آشکارسازی درزه‌ها نوشته شده است، صورت می‌گیرد. مقادیر زوایای اثر ناپیوستگی‌ها مستقل از جهت‌داری رخساره و زاویهٔ دوربین است و صرفاً در صفحه تصویر اندازه‌گیری می‌شوند[۱].

تاریخچهٔ استفاده از تصاویر دیجیتالی در معدن‌کاری به چندین سال قبل برمی‌گردد. در سال ۱۹۷۶ مک کارتر[۲] از عکس‌های تهیه شده از یک شیروانی سنگی در یک معدن روباز به‌منظور تعیین موقعیت ساختارهای زمین شناسی استفاده کرد [۲]. پردازش تصویر دیجیتالی به‌طور موفقیت‌آمیزی نیز در مکانیک سنگ به‌کار گرفته شده است. برای مثال رید و هریسن[۳] از یک سری تکنیک‌های پردازش تصویر برای تعیین هندسهٔ ناپیوستگی از سطح سنگ استفاده کردند [۳].

۱. مؤلف در کارهای اخیر با توجه به روابط ریاضی بین مقادیر زاویه اثر درزه‌ها در دو بعد با خصوصیات سه بعدی درزه‌ها، جهت‌داری رخساره و زاویهٔ دوربین، شیب و جهت شیب درزه‌ها را به‌دست آورده است.

۲. McCarter ۳. Reid and Harrison

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

لی و تام از تکنیکی دوگانه برای آنالیز تصویر سنگ گرانیت هنگ‌کنگ استفاده کردند و مراحل شکست و رفتار ترک خوردگی نمونه‌های گرانیت را تحت فشار یک محوره نشان دادند [٤]، [٥].

برای تعیین ویژگی‌های هندسه ناپیوستگی‌ها با استفاده از تصاویر دیجیتالی، ابتدا با دوربینی مناسب از رخنمون سنگ عکس‌برداری می‌شود. برای آشکارسازی درزه‌ها تصاویر باید با دوربین دیجیتالی با دقت ٤ مگاپیکسل به بالا گرفته شوند [٦]. در این پژوهش از دوربین کانن با دقت ۷ مگاپیکسل استفاده شده است. در ادامه عملیات‌های پیش پردازش و آشکارسازی لبه برای نمایش اثر ناپیوستگی‌ها و عوارض مورد نظر روی آن صورت می‌گیرد. برای تعیین دسته درزه‌های غالب می‌توان از روش‌های فازی استفاده کرد. در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست آمده، شناسنامه درزه‌های موجود در تودهٔ سنگ را می‌توان استخراج و تودهٔ سنگ را توصیف کرد. در مرحلهٔ توصیف تودهٔ سنگ، اطلاعاتی از هندسه ناپیوستگی‌ها نظیر زاویهٔ اثر، فاصله‌داری، چگالی درزه‌داری و تداوم ناپیوستگی‌ها به‌دست آمده و شاخص کیفیت سنگ (RQD)، در هر راستای دل‌خواه مشخص می‌شود.

## ۱. انواع روش‌های تعیین ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

اندازه‌گیری هندسه ناپیوستگی‌ها از رخنمون سنگ به‌طورکلی به سه روش ۱. دستی ۲. تکنیک‌های پردازش تصویر و ۳. روش لیزری انجام می‌شود. امروزه روش‌های دستی متداول‌ترین روش برداشت ناپیوستگی‌ها به‌شمار می‌رود. در این روش برداشت ناپیوستگی‌ها به‌صورت درجا و با استفاده از وسایلی نظیر کمپاس، متر نواری و پروفیل‌متر صورت می‌گیرد. برداشت درزه‌ها در این به دو صورت پیمایش خطی (اسکن لاین) و برداشت پنجره‌ای انجام می‌شود. برداشت درزه‌ها به‌روش معمول مشکل و اغلب ناقص است. این پیمایش‌ها به‌ندرت بر اساس یک اصول منظم در عملیات معدن‌کاری به‌کار می‌روند و به‌دلایلی نامطلوب هستند: اول این‌که رخنمون سنگ بلافاصله بعد از آتشباری فاقد سیستم نگه‌داری است و اغلب مکان پرخطری است. دوم این‌که قسمت بزرگی از رخنمون سنگ ممکن است دور از دسترس باشد، سوم این‌که اندازه‌گیری به‌روش دستی یک فرایند وقت‌گیر است و چهارم این‌که برداشت

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

تمامی درزه‌ها با روش دستی امکان‌پذیر نیست [٦]، [۷]. در تکنیک‌های پردازش تصاویر دیجیتالی ناپیوستگی‌ها در یک تصویر به‌صورت مرز بین دو ناحیه با سطح خاکستری متفاوت توصیف می‌شوند. بررسی چگونگی تغییرات سطح خاکستری در تصویر، اساس آشکارسازهای لبه در پردازش تصویر به‌شمار می‌رود. در این روش با حداقل کردن دخالت کاربر، ضمن غلبه بر محدودیت‌های روش دستی، روشی سریع، کامل، و مؤثر برای تعیین پارامترهای هندسه درزه‌ها فراهم می‌سازد و چشم‌اندازی سریع برای شناسایی و آنالیز هندسه ناپیوستگی‌ها ارائه می‌دهد [۸]. روش لیزری: در روش پردازش تصویر دیجیتالی به‌کمک اطلاعات به‌دست آمده از زوایای اثر شکستگی‌ها در تصاویر دیجیتالی دوبعدی، جهت‌داری درزه‌ها با روش‌های آماری و بهینه‌سازی در سه بعد تخمین زده می‌شود اما در رخساره‌هایی که اثر درزه‌ها مشخص نباشد روش پردازش تصویر کارساز نیست و استفاده از پیمایش لیزری در این زمینه، جهت‌داری درزه‌ها را به‌صورت خودکار به‌دست می‌دهد. به‌همین دلیل با وجود سهولت و عدم نیاز به تجهیزات گران‌بها در روش پردازش تصویر، در پژوهش*های* اخیر از تلفیق روش‌های پردازش تصویر دیجیتالی و پیمایش لیزری برای تعیین جهت‌داری درزه‌ها استفاده شده است [۹].

## ۲. سیستم خودکار آنالیز هندسه ناپیوستگی‌ها به روش پردازش تصویر دیجیتال

مراحل کار سیستم آنالیز خودکار هندسه ناپیوستگی‌ها عبارت است از:

۱. تهیهٔ عکس دیجیتال از جبههٔ کار

۲. پیش پردازش تصاویر اخذ شده

۳. آشکارسازی اثر ناپیوستگی‌ها یا لبه‌ها

٤. توصیف اثر ناپیوستگی‌ها (لبه‌ها) با استفاده از تبدیل هاف

۵. طبقه‌بندی درزه‌ها به‌کمک روش‌های فازی

٦. به‌دست آوردن خصوصیات تودهٔ سنگ شامل: زاویهٔ اثر ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری، چگالی درزه‌داری خطی، تداوم و RQD

در زیر این مراحل به‌همراه یک مورد مطالعاتی تشریح می‌شوند.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

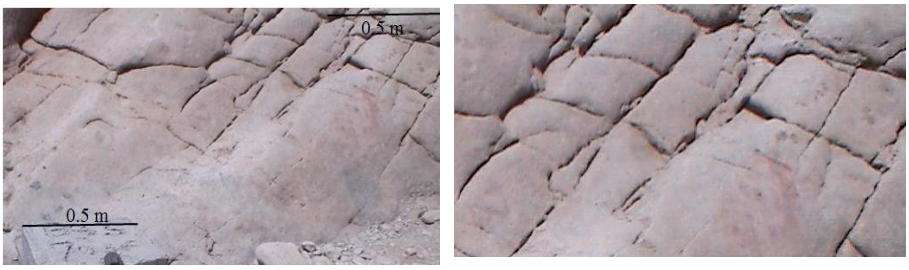
### ۲-۱. روش تهیهٔ عکس دیجیتال از جبههٔ کار

ورودی برنامه نوشته شده در نرم‌افزار مطلب برای آشکارسازی درزه‌ها، تصاویر دیجیتالی از رخنمون سنگ هستند که با دوربین دیجیتال کانن با دقت ۷ مگاپیکسل گرفته شده‌اند. اگرچه تصویر گرفته شده با دوربین‌های دیجیتال، معمولاً رنگی است اما از تصویر معادل سطح خاکستری آن که ماتریسی از مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌ها است، برای سهولت در پردازش استفاده می کنیم. مقادیر این سطوح بین ۰ تا ۲۵۵ در مقیاس خاکستری است. یکی از نکات بسیار مهم در هنگام عکس‌برداری، این است که روشنایی محیط تصویربرداری حتی‌الامکان مطلوب باشد. در چنین شرایطی، مقادیر سطح خاکستری پیکسل‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها متفاوت از زمینه تصویر خواهد بود. روشنایی نامناسب می‌تواند سبب ایجاد سایه و درخشندگی زیاد شده و فرایند استخراج اطلاعات مورد نیاز را با مشکل مواجه کند. روشنایی پراکنده بهترین نوع روشنایی است که به‌طور وسیع برای چنین نوعی از پژوهش‌*ها* به‌کار برده شده است [۳]، [۷].

برای تشریح مراحل الگوریتم نمونه‌ای عکس از تودهٔ ماسه سنگی با دقت ۷ مگاپیکسل با دوربین کانن گرفته شده است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. منطقهٔ مورد نظر در استان بوشهر شهرستان اهرم واقع است. برداشت درزه‌ها به‌منظور تحلیل پایداری دامنه‌ها و تکیه‌گاه‌ها برای احداث سد مخزنی صورت گرفته است. علاوه بر این بخشی از تونل انحراف آب از داخل این توده سنگ می‌گذرد. نمونه اولیهٔ سنگ در شکل ۱ الف نشان داده شده است که دارای ابعاد ۲۵۵*۳۹۰ بر حسب پیکسل است. در این شکل یک بلوک بتنی مشاهده می‌شود که طول یکی از ابعاد آن ۰/۵متر است در نتیجه طول شکل تقریباً ۲ متر به‌دست می‌آید. از روی این اندازه‌گیری می‌توان فاصلهٔ بین دو پیکسل را به‌دست آورد. فاصلهٔ بین دو پیکسل بر حسب سانتی‌متر برابر است با: ۰/۵۱= ۳۹۰ ÷ ۲۰۰. برای انجام مراحل پردازش تصویر بخشی از شکل ۱ الف انتخاب شده که در شکل ۱ ب مشاهده می‌شود.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]




**الف) تصویر اولیه** **ب) قسمتی از تصویر الف برای مراحل پردازش**

**شکل ۱. نمونه اولیه از سنگ برای انجام مراحل پردازش.**

### ۲-۲. پیش پردازش عکس‌های دیجیتالی تودهٔ سنگ

به‌طورکلی هدف از پیش‌پردازش کاهش نویز[۱] و حذف جزئیات ناخواسته مانند شکاف[۲] بین خطوط در تصویر است. نویز به هرگونه اطلاعات نامطلوب در تصویر مربوط می‌شود. فرایند تصویربرداری همراه با انواع خاصی از نویزها است. مثلاً نویز نمک و فلفل[۳] (نقاط سیاه و سفید کوچک در تصویر) ناشی از معیوب بودن قطعات تصویربرداری است و یا در شرایطی که روشنایی محیط تصویربرداری کم باشد نویز غالب از نوع گوسی[۴] است [۱۰]، [۱۲]. در این مرحله برای کاهش نویز از فیلترهای هموارساز مانند فیلتر مدین[۵] استفاده می‌شود. هدف از هموارسازی، مات کردن تصویر برای کاهش نویز و حذف جزئیات ناخواسته در تصویر است هم‌چنین در فرآیند هموارسازی هیستوگرام مربوط به تصویر یک‌نواخت می‌شود. در فیلتر میانه سطح خاکستری[۶] هر پیکسل با میانهٔ سطوح خاکستری در همسایگی آن پیکسل جای‌گزین می‌شود. این فیلتر از نوع پایین گذر[۷] است و سبب تضعیف پیکسل‌های با فرکانس‌های بالا می‌شود [۱۰]، [۱۱]. در تصویر برداری با دوربین، سطوح نور و حرارت حس‌گر عوامل اصلی در میزان نویز و خرابی تصویر هستند. فیلترینگ به‌روش وینر[۸] یکی از مشهورترین روش‌های ترمیم خطی تصاویر است. این فیلتر با حداقل ساختن خطای تابع سبب بهترین تخمین برای تصویر خراب شده می‌شود. تابع خطا به‌صورت تفاضل بین تصویر خراب شده و تصویر فاقد آثار تخریب شده تعریف می‌شود. فیلتر وینر این خطا را مینیمم کرده و نتیجه آن به‌دست آوردن تصویری بدون آثار تخریب است [۱۰].

۱. Noise ۲. Gap ۳. Salt and pepper ۴. Gaussian ۵. median filter
۶. Gray level ۷. Low-pass ۸. Wiener

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

برای کاهش نویز ابتدا فیلتر مدین و سپس فیلتر وینر اعمال می‌شود. زمانی که تصویر مات باشد و در آن نویز نیز وجود داشته باشد فیلتر وینر حدواسطی بین نویز پایین‌گذر و بالاگذر[۱] را در نظر می‌گیرد و نتیجه آن یک فیلتر میان‌گذر[۲] است [۱۱]. اشکال اساسی هموارسازی این است که در طی این فرآیند لبه‌ها[۳] نیز مات می‌شوند درحالی‌که لبه‌ها نقش مهمی در آشکارسازی درزه‌های موجود در تصاویر دارند. در این‌جا از فیلترهای مدین و وینر برای هموارسازی تصویر به‌منظور کاهش نویز و حذف برخی از میکرودرزه‌ها استفاده شده است. نتیجهٔ اعمال پیش‌پردازش روی شکل ۱ ب در شکل ۲ نشان داده شده است.

**شکل ۲. اعمال مراحل پیش‌پردازش روی نمونهٔ عکس تهیه شده از تودهٔ ماسه سنگ**

### ۲-۳. آشکارسازی اثر ناپیوستگی‌ها یا لبه‌ها

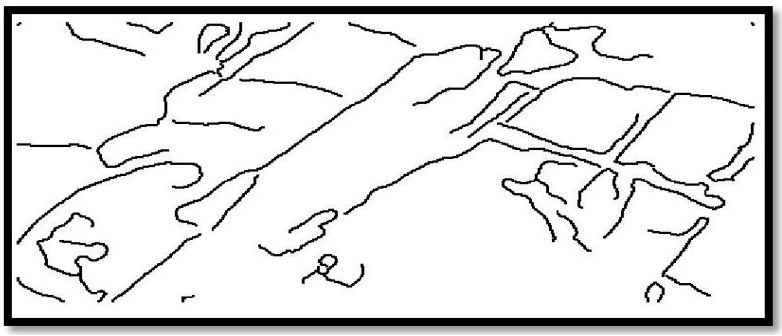
به‌منظور آشکارسازی ناپیوستگی‌ها در تصویر، ضرورت دارد پیکسل‌هایی که نماینده ناپیوستگی‌ها هستند علامت‌گذاری شده و به‌هم وصل شوند. چنان‌چه در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، سطح خاکستری این نقاط تفاوت چشم‌گیری با سایر نقاط تصویر دارد. این نقاط به‌عنوان لبه در تصویر شناخته می‌شوند. دو شیوهٔ معمول برای آشکارسازی لبه‌ها در تصاویر، استفاده از عمل‌گرهای گرادیان و لاپلاسین، یعنی مشتقات مرتبهٔ اول و دوم است. این عمل‌گرها، به‌عنوان فیلترهای بالاگذر پایه شناخته شده‌اند [۱۰]. در حال حاضر به‌منظور آشکارسازی لبه‌ها، الگوریتم‌هایی ارائه شده است که با در نظر گرفتن عواملی مانند نویز تصویر و ماهیت خود لبه‌ها، موجب بهبود روش‌های پایه فوق شده‌اند. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم

۱. High-pass ۲. Band-pass ۳. Edges

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

کنی[۱] است که در سال ۱۹۸٦ ارائه گردید. الگوریتم کنی یکی از بهترین الگوریتم‌های شناسایی لبه است. مزیت مهم این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های دیگر مقاوم بودن آن نسبت به نویز است. علاوه بر این، الگوریتم کنی پس از اعمال مشتق تابع گوسی بر روی تصویر، با اعمال عملیات حذف نقاط غیرماکزیمم بر روی تصویر حاصل، باعث نازک شدن خطوط می‌شود. هم‌چنین بر خلاف الگوریتم‌های دیگر که از یک سطح آستانه استفاده می‌شود، در این الگوریتم دو مقدار سطح آستانهٔ بالا و پایین تعریف می‌شود که موجب ایجاد پیوستگی بیش‌تر در خطوط حاصل می‌شود [۱۳]. با اعمال الگوریتم کنی به تصویر پیش‌پردازش شده، تصویر خاکستری به یک تصویر دودویی[۲] تبدیل می‌شود. چنان‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود این الگوریتم سبب آشکارسازی لبه‌ها شده است. در تصویر دودویی حاصل، علاوه بر اثر ناپیوستگی‌ها، خطوط نامطلوبی ظاهر می‌شوند که باید در مرحله بعد حذف شوند.



**شکل ۳. آشکارسازی لبه‌ها به‌وسیلهٔ الگوریتم کنی**

### ۲-٤. آشکارسازی و توصیف خطوط متناظر با ناپیوستگی‌ها در تصویر

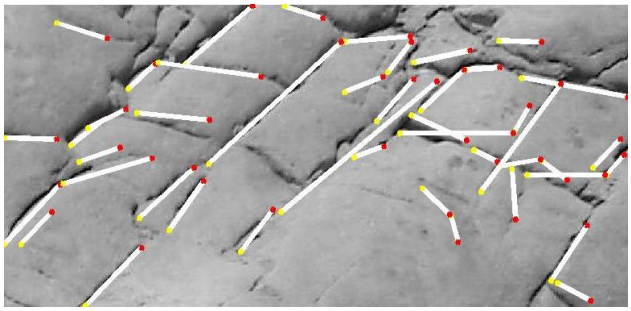
عموماً خروجی آشکارساز لبه، ناپیوستگی‌های محیطی را به‌طور کامل توصیف نمی‌کند. وجود نویز، سایه و یا عوامل دیگر ممکن است باعث ایجاد لبه‌های زائد در تصویر شود. از سوی دیگر، ضعف شدت روشنایی محیط یا زاویهٔ نامناسب تصویربرداری ممکن است موجب به‌وجود نیامدن پیوستگی در خطوط متناظر با درزه‌ها شود. بنا بر این، پس از تشخیص لبه‌ها، باید از الگوریتم مناسبی برای پیوند دادن پیکسل‌های لبه‌ها برای تشکیل لبه‌های معنادار یا مرزهای نواحی مختلف تصویر استفاده کرده و در عین حال لبه‌های زائد را حذف کرد. تبدیل

۱. Canny algorithm ۲. Binary image

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

هاف[۱]، از مهم‌ترین روش‌های ارائه شده برای یافتن و سپس اتصال پیکسل‌ها در قالب خطوط است.[۱٤]. مزیت اصلی این تبدیل، انعطاف‌پذیری آن در توصیف خصوصیات مرزهای شکستگی‌ها و بی‌تأثیر ماندن از نویزهای موجود در تصویر باینری است. این روش می‌تواند خطوطی را که به‌صورت چند پاره‌خط در آمده‌اند تشخیص دهد و آن‌ها را به‌صورت پاره خطی پیوسته نمایش دهد. به‌منظور آشکارسازی خطوط با استفاده از تبدیل هاف، ابتدا فضای پارامترهای توصیف کنندهٔ یک خط (شیب و عرض از مبدا در مختصات دکارتی یا معادل آن‌ها ($\theta$ و $\rho$) در مختصات قطبی)، به‌اجزای گسسته تقسیم‌بندی شده و برای هر جزء، انباره‌ای (سلولی) با مقدار اولیهٔ صفر در نظر گرفته می‌شود. سپس برای هر نقطه روی لبه در صفحه تصویر همهٔ خطوطی را که از این نقطه عبور می‌کنند تعیین کرده و به‌ازای هر خط به سلول انباره مربوطه یک واحد اضافه می‌شود. در نهایت خطوط متناظر با سلول‌های مقادیر بالا به‌عنوان خطوط موجود در تصویر تعیین می‌شوند [۱٤]. تعداد تقسیمات صفحهٔ $\rho\theta$ میزان دقت این نقاط را تعیین می‌کند. در واقع $\theta$، زاویهٔ اثر ناپیوستگی‌ها است و مقادیر این زوایا مستقل از جهت‌داری رخساره و زاویهٔ دوربین است. مقادیر $\rho$ نیز فاصلهٔ خطوط را از مبدأ مختصات نشان می‌دهد و با توجه به مقادیر $\rho$ می‌توان فاصله‌داری درزه‌ها را به‌دست آورد. در شکل ٤ نتیجهٔ حاصل از اعمال تبدیل هاف به لبه‌های حاصل از آشکارساز کنی نشان داده شده است.



**شکل ٤. نتیجه تبدیل هاف روی لبه‌های حاصل از آشکارساز کنی**

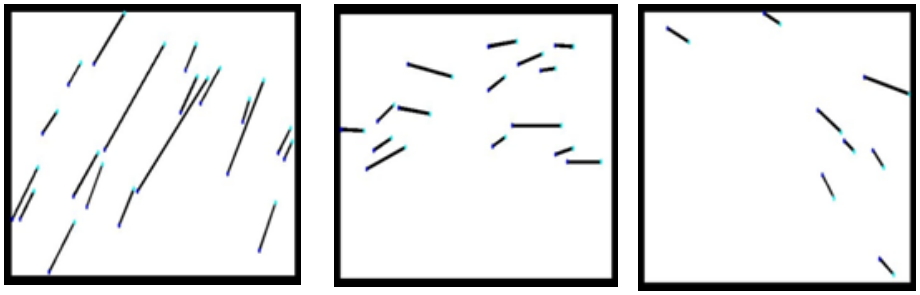
۱. Hough transform

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

### ۲-۵. تخمین دسته درزه‌ها با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی[۱]

بعد از آشکارسازی لبه و اعمال تبدیل هاف به تصویر، مجموعه‌ای از مقادیر θ متناظر با خطوط آشکارسازی شده به‌دست می‌آید که در واقع راستای ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهند. برای تعیین دسته درزه‌ها از روی این مقادیر می‌توان از تکنیک‌های خوشه‌بندی استفاده کرد. از نظر مفهومی خوشه‌بندی به‌معنای افراز مجموعه‌ای از داده‌ها به زیرمجموعه‌ها یا خوشه‌های جداگانه است به‌نحوی که داده‌های موجود در یک خوشه ویژگی‌هایی دارد که آن‌را از داده‌های موجود در سایر خوشه‌ها متمایز سازد. بنا بر این در تکنیک‌های خوشه‌بندی به‌جای این‌که هر زوج ورودی و خروجی با یک قاعده نشان داده شود، می‌توان ابتدا داده‌های ورودی و خروجی را گروه‌بندی کرده و سپس هر گروه را با یک قاعده نشان داد. بر این اساس، با به‌کارگیری مفاهیم مطرح در روش‌های فازی، تعداد قواعد فازی کم‌تر شده و پردازش سریع‌تر صورت می‌گیرد. در این مقاله، از روش الگوریتم خوشه‌سازی کاهشی[۲] برای تعیین تعداد دسته درزه‌ها استفاده شده است [۱۲]، [۱۵]. پس از تعیین تعداد دسته درزه‌ها، با استفاده از الگوریتم FCM[۳]، اعضا و مرکز هر دسته تعیین می‌شود. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که سه دسته درزه با زوایای اثر ۱۵۵، ۷ و ۵۵ درجه تشخیص داده شده است. این زوایا نسبت به افق و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در صفحه تصویر اندازه‌گیری شده‌اند و مستقل از شیب رخساره و موقعیت ناپیوستگی‌ها بر روی زمین است.



دسته درزه ۱ با زاویهٔ اثر ۵۵ درجه — دسته درزهٔ ۲ با زاویه اثر ۷ درجه — دسته درزهٔ ۳ با زاویهٔ اثر ۵۵ درجه

**شکل ۵. تعیین دسته درزه‌ها توسط الگوریتم خوشه‌بندی فازی**

۱. Fuzzy clustering ۲. Subtractive clustering ۳. Fuzzy-C-Mean

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

### ۲-٦. توصیف خصوصیات تودهٔ سنگ

با استفاده از مراحل ذکر شده در بالا می‌توان فاصله‌داری متوسط دسته درزه‌ها و تداوم اثر ناپیوستگی‌ها در هر دسته درزه را به‌دست آورده و مقدار RQD را در هر راستای دل‌خواه مشخص کرد. هنگام تعیین فاصله‌داری سه نوع فاصله‌داری باید از هم تشخیص داده شود [۹].

۱. فاصله‌داری کلی[۱]: فاصله بین یک جفت از ناپیوستگی‌های مجاور را که در امتداد خط خاصی واقع‌اند فاصله‌داری کلی گویند. از آن‌جا که فاصله‌داری کلی در امتداد یک خط منفرد صورت می‌گیرد، با خطاهای زیادی همراه است و ارتباطی به دسته درزه‌های منفرد ندارد. ۲. فاصله‌داری دسته[۲]: فاصله بین یک جفت از ناپیوستگی‌های مجاور که متعلق به یک دسته درزه هستند و در امتداد خاصی اندازه‌گیری شده‌اند را فاصله‌داری دسته گویند. ۳. فاصله‌داری دسته نرمال[۳]: فاصله بین یک جفت از ناپیوستگی‌های مجاور که متعلق به یک دسته درزه هستند و در جهت عمود بر جهت‌داری میانگین در آن دسته درزه اندازه‌گیری شده است را فاصله‌داری دسته نرمال گویند. فاصله‌داری دسته نرمال و میانگین این فاصله‌داری شاخص‌های خوبی برای به‌دست آوردن توزیع شکل و اندازه بلوک‌های توده سنگ هستند و می‌توانند به‌عنوان ورودی سیستم‌های طبقه‌بندی تودهٔ سنگ و برنامه‌های مدل‌سازی عددی استفاده شوند. برنامهٔ نوشته شده در نرم‌افزار مطلب توسط مؤلفان، فاصله‌داری نرمال را محاسبه می‌کند. بدین‌صورت که فاصلهٔ درزه‌ها در هر دسته در امتدادی که به‌طور متوسط عمود بر امتداد درزه‌های آن دسته درزه است، محاسبه می‌شود و این مقادیر مستقل از موقعیت ناپیوستگی‌ها بر روی دیواره سنگی است. به‌عبارت دیگر این مقادیر در صفحه تصویر رخساره اندازه‌گیری شده‌اند. در جدول ۱ فاصله‌داری نرمال درزه‌ها و فاصله‌داری نرمال متوسط هر دسته درزه برحسب پیکسل آورده شده است. در مواردی که بیش‌تر از یک دسته درزه وجود داشته باشد، فاصله‌داری متوسط کل را می‌توان از این رابطه به‌دست آورد [۱٦]:

$$\frac{۱}{S_t}=\frac{۱}{S_۱}+\frac{۱}{S_۲}+\frac{۱}{S_۳} \qquad (۲)\rightarrow S_t=۹/۲۵\,pixel=۹/۲۵\times۰/۵۱\text{cm}=٤/۷٤\text{cm}$$

عدد ۰/۵۱ فاصلهٔ بین دو پیکسل بر حسب سانتی‌متر است.

۱. Total spacing ۲. Set spacing ۳. Normal set spacing

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

چگالی درزه‌داری خطی (d)، عکس فاصله‌داری متوسط کل است [۱٦] در نتیجه (d) برابر است با:

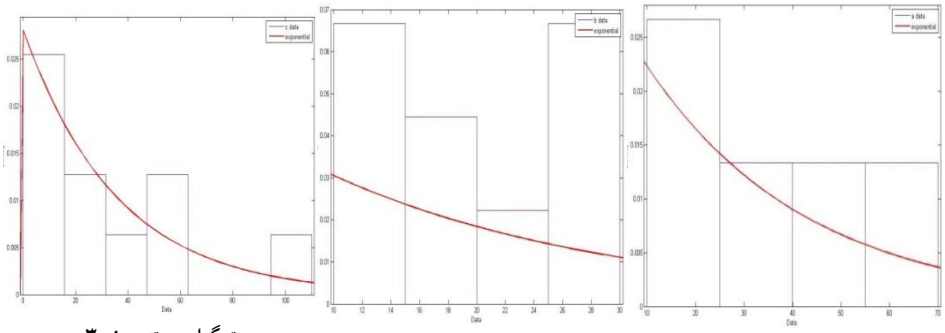
$$d = \frac{۱}{S_t} = \frac{۱}{(٤.٧٤ \times ۱۰^{-۲})} = ۲۱/۰۸ \frac{۱}{m} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ بالا $S_t$ فاصله‌داری متوسط کل و $S_۱$، $S_۲$ و $S_۳$ فاصله‌داری متوسط دسته درزه‌های یک، دو و سه است.

**جدول ۱. مقادیر فاصله‌داری نرمال درزه ها و فاصله‌داری متوسط هر دسته درزه بر حسب پیکسل**

| شمارهٔ دسته درزه | فاصله‌داری نرمال درزه‌ها بر حسب پیکسل | | | | | | | | | | میانگین دسته درزه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **دسته درزه ۱** | ۱۳ | ٤۲ | ۱۰ | ٦۳ | ۳۸ | | | | | | ۳۳ |
| **دسته درزه ۲** | ۱۱ | ۲۷ | ۲۲ | ۲٦ | ۱۸ | ۱۲ | ۱۸ | ۳۰ | ۱٤ | ۳۵ | ۲۰ |
| **دسته درزه ۳** | ۱۱ | ۱۲ | ۵۹ | ۵۷ | ۱۲ | ۱۱۰ | ۸ | ۲۸ | ۲۲ | ۳۷ | ۳٦ |

طبق تحقیقات بشر[۱]، زانگ[۲] و کولاتیلاک[۳]، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بیش‌تر توزیع نمایی منفی دارد [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]. در شکل ٦ هیستوگرام فاصله‌داری به‌دست آمده و توزیع آماری فاصله‌داری نشان داده شده است.



هیستوگرام دسته درزه ۱ هیستوگرام دسته درزه ۲ هیستوگرام دسته درزه ۳

**شکل ٦. هیستوگرام فاصله‌داری و توزیع به‌دست آمده برای هر دسته درزه.**

در روش‌های برداشت درزه‌ها به‌روش دستی درزه‌های با تداوم پایین شانس کم‌تری برای برداشت دارند. به‌علت چنین خطایی، بعد از برداشت درزه‌ها تصحیحاتی در مورد تداوم باید صورت گیرد. در عوض با بهره‌گیری از این روش چنین خطایی به‌وجود نمی‌آید. تداوم درزه‌ها در هر دسته درزه مربوط به شکل ۵ بر حسب پیکسل در جدول ۲ آمده است.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

۱. Baecher ۲. Zhang ۳. Kulatilake

**جدول ۲. مقادیر تداوم درزه ها بر حسب پیکسل در هر دسته درزه**

| شماره دسته درزه | تداوم درزه‌ها بر حسب پیکسل | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| دسته درزه ۱ | ۹۲ | ۹۲ | ۵۳ | ٤٥ | ۳۳ | ۳۲ | ۲۸ | ۲٥ | | | | | | | | | |
| دسته درزه ۲ | ۹۷ | ۸۷ | ۷۸ | ٦۳ | ٦۱ | ٥٥ | ٤۹ | ٤٥ | ۳۷ | ۳٥ | ۳٥ | ۳٥ | ۳٤ | | | | |
| دسته درزه ۳ | ۱۷۱ | ۱٥۱ | ۱۱۱ | ۷٥ | ۷۰ | ٦۹ | ٦٤ | ٥٥ | ٥۲ | ٥۱ | ٤۸ | ٤٤ | ۳۸ | ۳٥ | ۳۳ | ۳۳ | ۳۲ |

برای برآورد مقدار RQD راستایی مثل AB در شکل ۷ اختیار می‌شود. طول کل خط AB برابر ۳۲۲ پیکسل است. طول قطعات در راستای خط AB در جدول ۳ بر حسب پیکسل آورده شده است. در تعیین RQD طول قطعاتی که کم‌تر از ده سانتی‌متر هستند لحاظ نمی‌شود [۲۰]. بنا بر این ابعاد با طول کم‌تر از ۲۰ پیکسل برای برآورد RQD نادیده گرفته می‌شوند. شاخص RQD تودهٔ سنگ در این جهت برابر است با:

$$RQD = \frac{(۷۳+٥٦+٤۳+۳٤+۲٦+۲۳)}{۳۲۲} \times ۱۰۰ = ٪۷۹.۲ \qquad (٤)$$

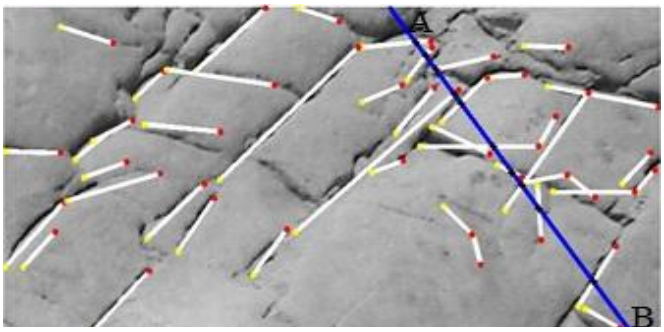
کیفیت چنین توده سنگی از لحاظ طبقه‌بندی مهندسی سنگ در راستای انتخاب شده خوب ارزیابی می‌شود.

چنان‌که در بخش‌های (۲-۵) و (۲-٦) مشاهده شد می‌توان با روش پردازش تصویر دیجیتالی دسته درزه‌ها را تخمین زد و بعضی از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها مانند فاصله‌داری و تداوم را به‌دست آورد. فراخوانی تصویر توسط برنامه نوشته شده در مطلب و استخراج این داده‌ها در کم‌تر از یک دقیقه انجام می‌گیرد. اگر با این روش خواسته شود که یک

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

دیواره مثلاً به‌طول ۵۰ متر درزه‌نگاری شود ابتدا برای جلوگیری از هم‌پوشانی عکس‌ها، محدوده هر عکس روی دیواره معدن با اسپری مشخص و شماره‌گذاری می‌گردد. طول محدوده هر عکس به‌طور متوسط ٤-۳ متر در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین مقیاس‌گذاری از یک چکش صحرایی در هر عکس می‌توان استفاده کرد. برای ایجاد روشنایی مطلوب و نبود سایه روی دیواره‌ها عکس‌برداری در طول روز بهتر است انجام شود و با یک دوربین با دقت ٤ مگاپیکسل به‌بالا اقدام به تصویربرداری کرد. سپس به‌صورت دستی و به‌کمک وسایل درزه‌نگاری اقدام به برداشت مشخصات هندسی تعداد مشخصی از ناپیوستگی‌ها می‌شود تا بعد از پردازش تصاویر مربوطه مقادیر به‌دست آمده از پردازش تصاویر با مقادیر برداشت شده مقایسه شده و میزان خطا برآورده گردد. اختلاف داده‌های به‌دست آمده با این روش با داده‌های برداشت شده در بارهٔ مورد بررسی شدهٔ این مقاله و حتی سه مورد بررسی شدهٔ دیگر (معدن سنگ آهن چاه‌گز یزد، معدن باریت مهدی‌آباد یزد و دیواره‌های معدن بوکسیت جاجرم، به‌وسیلهٔ مؤلف) ناچیز است و به‌طور متوسط کم‌تر از ۵ درصد برآورد شده است.




**شکل ۷. تعیین RQD در راستای خط AB**

**جدول ۳. طول قطعات در راستای خط AB بر حسب پیکسل**

| طول قطعات به پیکسل | ٥٦ | ۷۳ | ۲۰ | ۱۱ | ۲٦ | ٤۳ | ۹ | ۲۳ | ۱٤ | ۱۳ | ۳٤ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی خودکار برای تعیین پارامترهای هندسه ناپیوستگی‌ها بر اساس پردازش تصویر دیجیتال بررسی شده است. این روش چندین مرحله دارد که در هر مرحله، از

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

برخی از تکنیک‌های پردازش تصاویر دیجیتال استفاده شده است. این الگوریتم در نرم‌افزار مطلب کدنویسی شده است به‌طوری‌که تمامی مراحل آشکارسازی درزه‌ها به‌صورت خودکار صورت می‌گیرد. در مرحلهٔ پیش پردازش، از فیلترهای مدین و وینر برای حذف نویز و جزئیات ناخواسته استفاده شده است و با استفاده از الگوریتم کنی خطوط موجود در تصویر استخراج شده‌اند. استفاده از تبدیل هاف، ضمن حذف لبه‌ها و فواصل زائد موجود در خروجی آشکارساز کنی، معادلات پارامتری درزه‌ها را به‌دست می‌دهد. سپس با توجه به مقادیر زاویهٔ اثر درزه‌ها، با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی، دسته درزه‌ها تعیین می‌شود. در مرحلهٔ توصیف تودهٔ سنگ، فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها به‌دست آمده و RQD مربوط به تودهٔ سنگ محاسبه می‌گردد. برای پیاده‌سازی این الگوریتم از مورد بررسی شدهٔ ماسه سنگ استفاده شده است. نتایج این روش نشان می‌دهد که تودهٔ ماسه سنگی بررسی شده سه دسته درزه به‌ترتیب با زوایای اثر ۱۵۵، ۷ و ۵۵ درجه دارد. فاصله‌داری درزه‌ها توزیع نمایی منفی به‌ترتیب با میانگین ۳۳، ۲۰ و ۳٦ پیکسل دارد و فاصله‌داری متوسط کل ٤/٧٤ به‌دست آمده است در نتیجه چگالی درزه‌داری ۲۱/۰۸ بر متر محاسبه شده است. در ادامه تداوم درزه‌ها به‌دست آمده و مقدار RQD با استفاده از برنامه نوشته شده در مطلب در هر راستایی قابل محاسبه است. مؤلف برای کارهای آینده با استفاده از روش پردازش تصویر دیجیتال و با استفاده از روابط ریاضی بین خصوصیات هندسی درزه‌ها و اثرات درزه‌ها در عکس‌های دیجیتالی دو بعدی، جهت‌داری درزه‌ها در سه بعد را برآورد کرده و ناپیوستگی‌ها را در فضای سه بعدی به‌روش دیسک‌های تصادفی با شعاع محدود مدل‌سازی کرده است. این روش هم‌چنین می‌تواند برای ایجاد یک پایگاه داده پایدار و بزرگ، ارزیابی فعالیت‌های مهندسی خصوصاً در تونل‌ها، بررسی فعالیت‌های حفاری و کنترل ساختارها و دسترسی به توزیع واقعی مواد در تودهٔ سنگ برای بررسی رفتار میکروسکوپی سنگ‌ها استفاده شود. البته این روش در مواردی مثل بازشدگی کم درزه‌ها و یک‌سان بودن شدت رنگ در محل درزه و پیرامون آن، شناسایی خطواره‌هایی به‌عنوان درزه که در اثر تفاوت در درصد کانی‌ها، تغییر چگالی سنگ و تغییر در بافت به‌وجود

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

آمده‌اند و روشنایی ضعیف هنگام عکس‌برداری، به‌خصوص در معادن زیرزمینی محدودیت دارد.

## منابع


۱. ترابی رحمان، *مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ*، انتشارات صنعتی دانشگاه شاهرود، چاپ اول (۱۳۸۱).

2. McCarter M. K., "Application of plane photogrammetry to open pit mapping. In: Proceeding of the US symposium on Rock Mechanics", Snowbird, UT, (Chapter 13) (1976) 93-98.
3. Reid T. R., Harrison J.P., "A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures", Rock Mechanics & Mining Sciences 37 (2000) 1073-1089.
4. Li L., "Microscopic study and numerical simulation of the failure process of granite. PHD thesis", Department of Civil Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong (2001) 175.
5. Tham L. G., LI L., Tsui Y., Lee P.KK., "A replica method for observing micro cracks on rock surfaces", Int J Rock Mech Min Sci, 40: (2003) 785-94.
6. Deb D.,SHariharana, Rao U. M., Chang Ha Ryu, "Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images", Computers & Geosciences 34 (2008) 115-126.
7. Lemy F., Hadjigeorgiou J., "Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures", Rock Mechanics and Mining Sciences, September, Pages (2003) 903-917.


[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

8. Kemeny John, Post Randy, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces Computers & Geosciences 29 (2003) 65-77.

9. Geboren N., "Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning", PHD thesis (2008).

۱۰. سی. گونزالس رافائل- ای. وودز ریچارد، *پردازش تصویر دیجیتال*، ترجمه جعفرنژاد قمی عین الله، انتشارات علوم رایانه، چاپ دوم (۱۳۸۷).

11. Gonzalez R.C., Woods R. E., "Digital Image Processing, second ed", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (2002) 793.

۱۲. سی. گونزالس رافائل- ای. وودز ریچارد، *پردازش تصویر دیجیتال در مطلب*، ترجمه کیا مصطفی، انتشارات خدمات نشر کیان رایانه سبز، چاپ اول (۱۳۸۸).

13. Canny J., "A computational approach to edge detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8 (6) (1986) 679-698.

14. Shengzhi Du, "An Improved Hough Transform Neighborhood Map for Straight Line Segments", IEEE Transactions on Image Processing, vol. 19, no. 3, march (2010).

15. Chiu S., "Fuzzy model identification based on cluster estimation", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 2 (3) (1994) 267-278.

16. Nefeslioglu H. A., Gokceoglu C., Sonmez H., "Indirect determination of weighted joint density (wJd) by empirical and fuzzy models", Engineering Geology 85(2006) 251-269.

17. Baecher G.B., Lanney N. A., Einstein H.H., "Statistical description of rock properties and sampling" (1976).

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]

18. Zhang L., Einstein H. H., "Estimating the intensity of rock discontinuities", Rock Mechanics and Mining Sciences 37 (2000) 819-837.

19. Kulatilake H. S. W., Fiedler R., Panda B., "Box fractal dimension as a measure of statisticalhomogeneity of jointed rock masses Original Research Article Engineering Geology", Volume 48, Issues 3-4,1 (December 1997) 217-229.

۲۰. ری. اس وتوکوری-ک. کاتسویاما، *درآمدی بر مکانیک سنگ*، ترجمه فاروقی محمد، انتشارات مرکز خدمات فرهنگی سالکان، چاپ اول (۱۳۷٦).

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.7.7 ]