

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

مدل سازی تداوم درزه ها و بررسی تاثیر آن بر مقاومت توده سنگ های درزه دار

جمال زادهش

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر احمد رمضانزاده

استاد مشاور:

دکتر مصطفی شریفزاده

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۹۱

ب



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جمال زادهش

تحت عنوان: مدل سازی تداوم درزه ها و بررسی تاثیر آن بر مقاومت توده سنگ های درزه دار

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و

با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به پدر و مادر و خانواده عزیزم
آنان که خمیدند تا راست قامت بانم
آنان که موی سپید کردند تا روی سپید بانم

تقدیم به دو ستم که بیش از خودم نگران پیشرفت من بوده است.

تقدیم به بزرگترین معلم زندگی ام، او که لحظه ای زندگی در حضورش
برتر از تمام عمرم می بود.

تقدیر و شکر

حمد و سپاس بی پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد

الطاف بی کران الهی، مقطعی از دوران تحصیل به پایان می رسد بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که مراد

این امریاری دادند شکر و قدر دانی نمایم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و

آقای دکتر احمد رمضان زاده کمال شکر و امتنان را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **جمال زادهش** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **مدل‌سازی تداوم درزه‌ها و بررسی تاثیر آن بر مقاومت توده‌سنگ‌های درزه‌دار تحت راهنمایی آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر احمد رمضان‌زاده**

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

برای تحلیل، طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده‌سنگ‌ها ساخته می‌شوند نیاز به درک صحیح ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت و تغییرشکل پذیری) توده‌سنگ‌های درزه‌دار است. به دلیل طبیعت آماری ویژگی‌های هندسی و ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها، پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های مکانیکی و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار خیلی مشکل است.

در این تحقیق ابتدا براساس قضاوت‌های مهندسی و تجارب موجود یک تقسیم‌بندی اولیه از سنگ‌ها به سه دسته آذرین، دگرگونی و رسوبی بعمل می‌آید. سپس با بررسی میدانی و درزه‌نگاری دقیق از هر سه نوع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی، تابع توزیع آماری تداوم درزه‌ها برآورد شده است. در مرحله بعد با استفاده از تابع توزیع تداوم درزه‌ها، مدل آماری مناسب جهت تحلیل عددی ساخته شده است. پس از تدوین مدل آماری، با استفاده از روش عددی اجزاء مجزا (نرم‌افزار UDEC) به عنوان ابزار تحلیل تنش در دو بعد بر روی بلوک‌های سنگی شامل درزه‌های مختلف با طول‌های مختلف، فاکتور تداوم درزه و تاثیر آن در مقاومت نهایی توده‌سنگ درزه‌دار مورد مطالعه قرار گرفته است.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- "بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت توده سنگ"، اولین کنفرانس فناوری های معدنکاری ایران، دانشگاه یزد، شهریور ۱۳۹۱.
- ۲- "بررسی تاثیر ویژگی های هندسی درزه بر مقاومت توده سنگ درزه دار"، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شیراز، شهریور ۱۳۹۱.
- ۳- "تحلیل ارتباط بین طول و بازشدگی درزه در سنگ های آذرین، دگرگونی و رسوبی"، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شیراز، شهریور ۱۳۹۱.
- 4- "Estimation of joint trace length probability distribution function (pdf) in igneous, sedimentary and metamorphic rocks" Arabian Journal of Geosciences "AJGS-D-12-00159" (under review)
- 5- "Estimation of rock joint trace length in scanline sampling using artificial neural network (ANN)" Neural Computing and Applications Journal "NCA-1803" (under review)
- 6- "Rock Joint Trace Length Estimation using Support Vector Machine (SVM)" Canadian Geotechnical Journal "GEGE-S-12-00146" (under review)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: مقدمه
۲.....	۱-۱- مقدمه:
۳.....	۲-۱- بیان مساله و سوال‌های اصلی تحقیق
۵.....	۳-۱- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق
۸.....	۴-۱- اهداف تحقیق
۸.....	۵-۱- ساختار تحقیق
۹.....	۲- فصل دوم: کلیاتی در مورد درزه‌ها
۱۰.....	۱-۲- مقدمه
۱۰.....	۲-۲- مکانیسم ایجاد درزه‌ها
۱۱.....	۳-۲- عوامل به وجود آورنده درزه‌ها
۱۱.....	۲-۳-۱- عوامل تکتونیکی
۱۵.....	۲-۳-۲- تنش‌های باقیمانده
۱۵.....	۲-۳-۳- انقباض
۱۷.....	۲-۳-۴- حرکات سطحی زمین
۱۷.....	۲-۴- مشخصه‌های درزه‌های تشکیل شده در انواع سنگ‌ها
۱۷.....	۲-۴-۱- تشکیل درزه در سنگ‌های آذرین
۱۸.....	۲-۴-۲- تشکیل درزه در سنگ‌های رسوبی

- ۱۹-۲-۴-۳- تشکیل درزه در سنگ‌های دگرگونی ۱۹
- ۲۰-۵- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها ۲۰
- ۲۳-۶- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها ۲۳
- ۲۴-۱-۶-۲- برداشت ناپیوستگی‌ها در مغزه‌های حفاری ۲۴
- ۲۴-۲-۶-۲- برداشت ناپیوستگی‌ها بر روی رخنمون‌های سنگی ۲۴
- ۲۷-۷- خلاصه و نتیجه‌گیری ۲۷
- ۲۸-۳- فصل سوم: برآورد تابع توزیع تداوم درزه ۲۸
- ۲۹-۱-۳- مقدمه ۲۹
- ۳۱-۲- مطالعات قبلی مربوط به تابع توزیع طول درزه ۳۱
- ۳۲-۳- جمع‌آوری داده‌های طول درزه در سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی ۳۲
- ۳۵-۴- تخمین اندازه طول درزه ۳۵
- ۳۸-۱-۴-۳- شبکه عصبی ۳۸
- ۳۹-۲-۴-۳- ماشین بردار پشتیبان (SVM) ۳۹
- ۴۲-۳-۴-۳- پارامترهای ورودی و خروجی شبکه ۴۲
- ۴۴-۴-۴-۳- آموزش شبکه عصبی جهت تخمین طول درزه ۴۴
- ۴۶-۵-۴-۳- آموزش SVM جهت تخمین طول درزه ۴۶
- ۴۸-۶-۴-۳- تخمین اندازه طول درزه با استفاده از شبکه‌های آموزش داده شده ۴۸
- ۴۹-۵-۳- برآورد تابع توزیع طول درزه ۴۹
- ۵۵-۶-۳- خلاصه و نتیجه‌گیری ۵۵

- ۴- فصل چهارم: ساخت مدل در نرم افزار UDEC ۵۶
- ۴-۱- مقدمه ۵۷
- ۴-۱-۱- اصول روش اجزای مجزا ۵۷
- ۴-۱-۲- نرم افزار UDEC ۵۹
- ۴-۱-۳- پارامترهای مورد نیاز نرم افزار UDEC ۶۰
- ۴-۱-۴- مدل های رفتاری بلوک ها و ناپیوستگی ها ۶۱
- ۴-۱-۵- مراحل مدل سازی در نرم افزار UDEC ۶۱
- ۴-۲- ساختار بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ درزه دار ۶۲
- ۴-۳- تولید دو بعدی پارامترهای هندسی درزه ۶۴
- ۴-۴- تولید هندسه دو بعدی درزه های واقعی ۶۵
- ۴-۴-۱- تعداد درزه ها ۶۵
- ۴-۴-۲- موقعیت درزه ها ۶۶
- ۴-۴-۳- جهتداری درزه ها ۶۷
- ۴-۴-۴- طول درزه ۶۷
- ۴-۵- ارتباط بین درزه های واقعی با اندازه محدود با درزه های مصنوعی ۶۸
- ۴-۶- ارتباط هندسه دوبعدی درزه های تولید شده و کد تحلیل تنش اجزاء مجزا (UDEC) ۶۹
- ۴-۷- تعیین مقادیر مناسب برای ویژگی های مکانیکی درزه های مصنوعی برای شبیه سازی رفتار سنگ بکر برای نوع سنگ انتخابی ۷۰

- ۷۱ ۴-۸- خلاصه و نتیجه‌گیری
- ۷۲ ۵- فصل پنجم: بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت توده‌سنگ
- ۷۳ ۵-۱- مقدمه
- ۷۷ ۵-۲- بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل توده‌سنگ
- ۸۷ ۵-۳- خلاصه و نتیجه‌گیری
- ۸۹ ۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
- ۹۰ ۶-۱- نتیجه‌گیری
- ۹۲ ۶-۲- پیشنهادات
- ۹۳ ۷- فهرست منابع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۲.....	شکل ۱-۲- سیستم‌های درزه‌ای وابسته به چین خوردگی
۱۴.....	شکل ۲-۲- سیستم‌های درزه‌های مختلف در آغاز دگرریختی
۱۶.....	شکل ۳-۲- تشکیل درزه‌های انقباضی
۲۱.....	شکل ۴-۲- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ
۲۶.....	شکل ۵-۲- نمای خط برداشت و معرفی انواع پایانه درزه‌ها
۲۷.....	شکل ۶-۲- نمایی از دو نوع پنجره برداشت:
۳۴.....	شکل ۱-۳- نمایی از رخنمون‌های سنگی برداشت شده
۴۵.....	شکل ۲-۳- ساختار شبکه عصبی بهینه
۴۷.....	شکل ۳-۳- ساختار مدل SVM بکار برده شده برای تخمین طول درزه
۵۲.....	شکل ۴-۳- گزارش مقایسه‌ای نتایج آزمون‌های بهترین برازش
.....	شکل ۵-۳- گزارش مقادیر آماره آزمون‌های بهترین برازش طول درزه‌های مشاهده شده و تخمین زده شده
۵۳.....	با مدل‌های SVM
.....	شکل ۶-۳- سه نمونه از تابع توزیع لاگ‌نرمال طول درزه نتیجه شده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی
۵۴.....
.....	شکل ۱-۴- ساختار بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ درزه‌دار و یافتن ویژگی‌های احتمالی
۶۲.....	المان حجم معرف توده‌سنگ درزه‌دار
۶۳.....	شکل ۲-۴- شبکه درزه‌ای محدود که بلوک دو بعدی را به چند ضلعی گسسته نمی‌کند
۶۴.....	شکل ۳-۴- تشکیل چندضلعی‌ها در بلوک سنگی دو بعدی تنها با شبکه‌ای از درزه‌هایی با اندازه محدود
.....	شکل ۴-۴- وارد نمودن درزه‌های مصنوعی به شبکه درزه نشان داده شده در شکل ۲-۴ برای گسسته‌سازی
۶۴.....	بلوک سنگی به چند ضلعی
.....	شکل ۵-۴- تولید موقعیت مرکز نه درزه طبق توزیع یکنواخت و طول درزه‌ها با استفاده از تابع توزیع لاگ-
۶۸.....	نرمال بعد از ۶۰ درجه چرخش
۶۹.....	شکل ۶-۴- فرایند اتصال بین درزه‌های واقعی با اندازه محدود با درزه‌های مصنوعی

- شکل ۵-۱- سطح مقطع بلوک سنگی جهت تحلیل‌های تنش در دو بعد ۷۳
- شکل ۵-۲- مدل‌های تشکیل دهنده در نظر گرفته برای سنگ بکر ۷۴
- شکل ۵-۳- مدل‌های تشکیل دهنده در نظر گرفته برای درزه‌ها ۷۵
- شکل ۵-۴- سنگ با سیستم تنش و شرایط مرزی استفاده شده برای بارگذاری در جهت محور Y ۷۶
- شکل ۵-۵- تاثیر چگالی درزه در سطح بر مقاومت معادل توده‌سنگ ۷۸
- شکل ۵-۶- گسسته‌سازی بلوک سنگی در نرم‌افزار UDEC ۷۹
- شکل ۵-۷- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی فاقد درزه ۷۹
- شکل ۵-۸- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول $0/8$ متر، زاویه 60° درجه نسبت به افق و تنش محصور کننده سه مگاپاسکال در نرم‌افزار UDEC ۸۰
- شکل ۵-۹- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول $0/2$ متر، زاویه 60° درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال ۸۱
- شکل ۵-۱۰- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول $0/4$ متر، زاویه 60° درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال ۸۱
- شکل ۵-۱۱- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول $0/6$ متر، زاویه 60° درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال ۸۲
- شکل ۵-۱۲- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول $0/8$ متر، زاویه 60° درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال ۸۲
- شکل ۵-۱۳- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال برای زاویه 15° درجه ۸۳
- شکل ۵-۱۴- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال برای زاویه 30° درجه ۸۳
- شکل ۵-۱۵- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال برای زاویه 45° درجه ۸۴
- شکل ۵-۱۶- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده $1, 0$ و 2 مگاپاسکال برای زاویه 60° درجه ۸۴

شکل ۵-۱۷- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲

مگاپاسکال برای زاویه ۷۵ درجه ۸۵

شکل ۵-۱۸- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار بدون تنش

محصور کننده ۸۶

شکل ۵-۱۹- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش

محصور کننده ۱ مگاپاسکال ۸۶

شکل ۵-۲۰- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش

محصور کننده ۲ مگاپاسکال ۸۷

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳- نتیجه تحقیق محققان در زمینه برآورد تابع توزیع طول درزه ۴۶	۴۶
جدول ۲-۳- مشخصات درزه‌نگاری نه رخنمون سنگی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی همراه با مشخصات رخنمون‌ها و خط برداشت ۴۹	۴۹
جدول ۳-۳- خلاصه‌ی درزه‌های برداشتی و مقایسه میانگین طول درزه‌های مشاهده‌ای و تصحیح شده ۵۱	۵۱
جدول ۴-۳- توصیف پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌ها برای تخمین طول درزه ۵۷	۵۷
جدول ۵-۳- نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در مدل‌ها (سنگ‌های آذرین) ۵۷	۵۷
جدول ۶-۳- خلاصه‌ی درزه‌های برداشتی از نه رخنمون در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی ۶۲	۶۲
جدول ۱-۵- مقادیر پارامترهای مدل‌های تشکیل دهنده سنگ گرانیت بکر، درزه‌های مصنوعی و درزه‌های واقعی با اندازه محدود ۹۱	۹۱

فصل اول

مقدمه

حضور ناپیوستگی‌ها در سنگ به طور قابل توجهی بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ اثر می‌گذارد. بنابراین، شبکه هندسی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ نقش مهمی را در پروژه‌های مهندسی عمران، معدن و نفت مرتبط با توده‌سنگ بازی می‌کند.

در حالت طبیعی، ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ به دو گروه اصلی و فرعی تقسیم‌بندی می‌شوند. گسل‌ها، زون‌های برشی و دایک‌ها تحت عنوان ناپیوستگی‌های اصلی گروه‌بندی می‌شوند که دارای طول زیاد و تعداد کمی هستند و همچنین این گروه جابجایی‌هایی را از خود نشان داده‌اند. از طرف دیگر، ناپیوستگی‌های فرعی مانند درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی و شیستوزیته به دلیل ویژگی ذاتی آماری آن‌ها، باید بصورت آماری تعریف شوند. ناپیوستگی‌های فرعی دارای تعداد زیاد و طول کمی هستند و هیچ جابجایی محسوسی را از خود نشان نداده‌اند. در این تحقیق درزه به جای ناپیوستگی فرعی بکار برده شده است. بسته به اندازه توده‌سنگی که پروژه‌های مهندسی در آن احداث می‌شود، ناپیوستگی‌های فرعی را می‌توان بصورت قطعی با ویژگی واحد و یا بصورت آماری با ویژگی‌های چندگانه مشخص کرد. اغلب پروژه‌های مهندسی عمران، معدن و نفت دارای تعداد کمی از ناپیوستگی‌های فرعی هستند و می‌توان آن‌ها را بصورت ویژگی واحد تعریف نمود.

برای مدل‌سازی کردن درزه‌ها در دو بعد، تعداد دسته درزه‌ها^۱، و برای هر دسته درزه نیز تابع توزیع هر یک از ویژگی‌های هندسی درزه‌ها مانند چگالی^۲ (تعداد درزه‌ها در واحد سطح)، موقعیت^۳، جهت‌داری^۴ و طول^۵ ضروری است. نکته قابل توجه این است که بررسی اثر هر یک از ویژگی‌های هندسی درزه بر ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ از اهمیت شایانی برخوردار است.

¹. Joint set
². Density
³. Location
⁴. Orientation
⁵. Trace length

۱-۲- بیان مساله و سوال‌های اصلی تحقیق

در عمل، با تحلیل مکانیکی توده‌سنگ‌های بزرگ سروکار داریم. در طبیعت توده‌سنگ‌های بزرگ و ناپیوسته، به المان‌هایی از سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تقسیم می‌شوند. محققان زیادی جهت مطالعه و تحلیل رفتار توده سنگ‌ها، مدل‌های ناپیوسته را پیشنهاد کرده‌اند (Goodman, et al., 1968, Cundall, 1971, Cundall, et al., 1985, Kulatilake, 1985, Cundall, 1988, Hart, et al., 1988, Shi, 1992, Shi, et al., 1988). با وجود اینکه این روش‌ها از ویژگی‌های قدرتمند زیادی برخوردارند، از یک و یا تعدادی از محدودیت‌های زیر رنج می‌برند:

(أ) کدهای کامپیوتری مربوطه برای مدل کردن، تعداد محدودی از المان‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها را مدل می‌کنند.

(ب) تحلیل تنش با شبکه هندسی واقعی درزه‌ها ممکن نیست.

(ت) این کدها تنها برای تحلیل قطعی تنش کاربرد دارند؛ انتخاب ویژگی‌های غیره قطعی در تخمین هندسه درزه و ویژگی‌های ژئومکانیکی ممکن نیست.

بنابراین، برای تحلیل تنش و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های بزرگ با این کدها باید تعداد المان‌های مجزا را کاهش داده و کاستی‌های (ب) و (ت) حذف شوند. توسعه این فرایند با فهم تاثیر مقیاس در نمونه‌های مورد نظر از توده‌سنگ ممکن است.

اگر اندازه نمونه در حد کانی‌های تشکیل دهنده توده‌سنگ باشد، به دلیل تنوع کانی‌ها و حضور و یا عدم حضور میکروترک‌ها در موقعیت نمونه توده‌سنگ، ممکن است نتایج تجربی پراکندگی قابل توجهی از خود نشان دهد. با افزایش اندازه نمونه تا حد معینی، پراکندگی نتایج کاهش پیدا می‌کند و توده‌سنگ از نظر آماری در این اندازه نسبت به کانی‌های تشکیل دهنده و میکروترک‌ها همگن است. برای تعیین ویژگی‌های سنگ بکر، باید نمونه‌هایی در این اندازه انتخاب شوند. افزایش اندازه نمونه بیش از این باعث شامل تاثیر یک و یا چند درزه در نمونه خواهد شد. هنگامی که نمونه شامل

یک و یا تعداد کمی درزه باشد، ویژگی‌های نمونه از نمونه‌ای به نمونه‌ای دیگر به طور قابل توجهی تغییر خواهد کرد و این بیانگر بازتاب ناهمگنی آماری مرتبط با تاثیر درزه است. با افزایش اندازه نمونه تعداد درزه‌های موجود در آن افزایش پیدا کرده و از نظر آماری به نمونه‌ای همگن تبدیل می‌گردد و تنوع نتایج نیز کاهش پیدا می‌کند. با افزایش نمونه از این اندازه حداقل، ویژگی‌های توده سنگ ثابت خواهند ماند. این اندازه از نمونه به عنوان اندازه نمونه جهت نشان دادن ویژگی‌های معادل توده سنگ همگن که شامل تعداد قابل توجهی درزه می‌باشد، استفاده شود. این اندازه معین را المان حجم معرف^۱ می‌نامند و در کارهای مهندسی زمین‌شناسی، مکانیک سنگ، ژئوفیزیک و هیدرولوژی از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر اندازه نمونه افزایش داده شود به گونه‌ای که ناپیوستگی‌های اصلی در نمونه نمایان شوند، ویژگی‌های نمونه در بازتاب اثر ناپیوستگی‌های اصلی تغییر خواهند کرد. بنابراین، مراحل زیر جهت کاهش تعداد المان‌های مجزا برای ارائه توده سنگ جهت تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

(أ) تقسیم‌بندی توده سنگ به بخش‌های همگن (Kulatilake, et al., 1990a)

(ب) با توجه به ویژگی‌های توده سنگ، برای تعیین تاثیر ترکیبی سنگ بکر و درزه‌ها (ناپیوستگی‌های فرعی)، برای هر بخش همگن آماری المان حجم معرف تعیین می‌گردد. سپس همین مقدار جایگزین توده سنگ خواهد شد. برای نشان دادن خاصیت ذاتی آماری هندسه درزه و تخمین قطعی ویژگی‌های ژئومکانیکی، بایستی اندازه نمونه به صورت آماری بیان گردند.

(ت) در نهایت برای توصیف کامل ساختار ناپیوسته توده‌سنگ، باید ناپیوستگی‌های اصلی با ویژگی‌های هندسی قطعی به مدل اضافه شود.

برای استفاده از فرایند ذکر شده، درک رابطه بین المان حجم معرف و ویژگی‌های هندسی

¹ Representative Elementary Volume (REV)

درزه ضروری است. هدف نهایی این تحقیق پیدا کردن امکان تغییر رفتار مقاومتی توده سنگ درزه‌دار نسبت به طول درزه‌ها است. مطالعه سیستماتیک برای ارزیابی تاثیر ویژگی‌های هندسی درزه بر روی رفتار مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار برای یافتن امکان و ویژگی‌های REV ضروری خواهد بود. به دلیل حضور درزه‌ها در داخل توده‌سنگ، توده‌سنگ ویژگی‌های ناهمسانگردی و وابستگی به مقیاس را خود نشان می‌دهد. در این تحقیق، اثر طول درزه بر مقاومت توده‌سنگ در دو بعد بررسی خواهد شد.

برای شبیه‌سازی توده‌سنگ، معمولاً فرض بر این است که همه درزه‌ها دارای تداوم بی‌نهایت و پیوسته باشند، ولی در حالت طبیعی غالباً چنین شرایطی حاکم نیست، پس برای بررسی رفتار مقاومتی توده‌سنگ لازم است درزه‌ها با طول‌های متفاوت و فاصله‌های متفاوت در نظر گرفته شود.

مهمترین سولاتی که در این زمینه مطرح است، عبارتند از:

- توزیع تداوم درزه‌ها در توده‌سنگ‌های درزه‌دار مختلف چگونه است؟
- عوامل موثر بر توزیع تداوم درزه‌ها در سنگ‌های درزه‌دار چیست؟
- خطاهایی که بر اثر در نظر گرفتن تداوم بی‌نهایت برای درزه‌ها در توده سنگ پدید می‌آیند، کدامند و بر مقاومت توده سنگ چه تاثیری دارند؟
- باتوجه به پارامترهای درزه بویژه تداوم درزه، چگونه می‌توان مقاومت توده سنگ را برآورد نمود؟

۱-۳- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق

تا کنون مطالعات اندکی در خصوص REV مرتبط با ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ انجام شده است. از نظر تئوری، انجام آزمایشات متعدد صحرایی بر روی بلوک‌هایی از توده سنگ درزه‌دار با اندازه‌های متفاوت امکان‌پذیر است. زیرا ویژگی‌های هندسی درزه‌ها بصورت ذاتی از ماهیت آماري

پیروی می‌کنند، پس برای پیدا کردن نتایج واقعی باید تعداد زیادی آزمایشات صحرایی انجام گیرد. باید قبل از انجام آزمایشات صحرایی، شبکه هندسی درزه‌ها در این بلوک‌ها ثبت شوند. انجام چنین آزمایش‌هایی سخت و پرهزینه خواهد بود. در نتیجه نبود گزارش‌ها و طرح‌های آزمایشگاهی برای چنین آزمایش‌هایی جای تعجب نیست. با این وجود، مطالعات اندکی در خصوص تاثیر اندازه طول درزه بر روی مقاومت فشاری توده سنگ انجام گرفته است (Pratt, et al., 1972, Bieniawski, et al., 1975, 1978, Bieniawski, 1978). هیز کارهای انجام شده قبلی تاثیر مقیاس بر روی مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده سنگ مرور کرده است (Heuze, 1980). نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نمونه تا اندازه مشخصی، مقاومت و مدول سنگ کاهش پیدا می‌کند و از آن به بعد تغییر آنچنانی دیده نمی‌شود. همچنین نکته قابل توجه این است که این روابط به محیط وابسته هستند زیرا تاثیر مقیاس در درجه اول توسط شبکه شکستگی‌ها کنترل می‌شود. در این تحقیقات، شبکه شکستگی‌ها ثبت نشده است. بیناویسکی با فرض همسانگرد بودن مدول توده سنگ، رابطه تجربی مابین رده‌بندی ژئومکانیکی¹ و مدول توده سنگ بیان کرده است (Bieniawski, 1978). با فرض همسانگردی مقاومت، یک رابطه تجربی مابین رده‌بندی ژئومکانیکی و مقاومت توده سنگ مطرح کردند (Hoek, 1980). با وجود این‌ها، در تحقیقات قبلی محققان، تلاش اندکی برای پیدا کردن رابطه بین کاهش مقاومت و مدول توده‌سنگ نسبت به ویژگی‌های هندسی درزه صورت گرفته است. در صورت حضور دسته درزه‌ها در داخل توده‌سنگ، نکته قابل توجه اینجاست که ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکل-پذیری توده‌سنگ ناهمسانگرد هستند. تحقیقات متعددی برای پی بردن به مدهای احتمالی شکست و توزیع تنش داخلی توده‌سنگ‌های ناپیوسته به وسیله الگوی کانی‌ها انجام شده است (Hayashi, 1966, Brown, et al., 1970, Brown, 1970, Ladanyi, et al., 1970). نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که الگوی توزیع تنش داخلی توده‌سنگ‌های ناپیوسته خیلی پیچیده بوده و مدهای شکست ممکن زیادی برای آن موجود است. این در عمل ممکن است که با انجام آزمایش‌های کنترل شده به ویژگی-

¹ . Rock Mass Rating (RMR)

های المان حجم معرف الگوهای مواد مانند ژئوپس پی برد. و همچنین شبیه‌سازی بعضی از آزمایش‌ها نیز با برنامه کامپیوتری تحلیل تنش ممکن است. چنین فرآیندی برای مطالعه رابطه بین اندازه بلوک و ویژگی‌های مقاومتی و الاستیکی برای توده شیل ناپیوسته انجام شده است (Kulatilake, 1985). این مطالعه با توجه به مواد شیل انجام شد. در آن تحقیق، روش المان محدود برای تحلیل تنش بلوک‌های شیلی که شامل المان‌هایی از شیل بکر و درزه‌ها بود استفاده شد. فرمول‌های المان محدود استفاده شده دارای محدودیت‌های مانند اجازه مدل کردن بیش از ده درزه و همچنین اجازه جابجایی‌های بزرگ در فصل مشترک درزه‌ها بود.

روش اجزاء مجزا، یک روش عددی است که معمولاً به منظور تحلیل رفتار سیستم‌های ناپیوسته بکار می‌رود، این روش، به منظور بررسی رفتار تغییرشکل‌پذیری منفصل در سنگ‌های درزه-دار توسعه داده شده است. توانایی بی‌نظیر روش اجزاء مجزا این است که توده‌سنگ بصورت مجموعه-ای از بلوک‌های مجزا که به وسیله درزه‌ها تفکیک شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و در این روش امکان ایجاد تغییر شکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد (Itasca, 1992).

با توجه به ماهیت ناپیوسته محیط‌های سنگی، روش اجزاء مجزا به طور روزافزونی به منظور ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده‌سنگ بکار برده می‌شود. در این روش توده‌سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تاثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌های دیگر قابل بررسی است (Zhu, et al., 2003). روش اجزاء مجزا تفاوت چندانی نسبت به روش‌های عددی دیگر ندارد و تفاوت اصلی آن با سایر روش‌های عددی در این است که در این روش کل هندسه مدل و المان‌ها توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود (Sharma, et al., 1999).

فرمول‌سازی و توسعه روش اجزاء مجزا نخستین بار توسط (Cundall, 1971) آغاز شد و روند تکامل آن طی چند دهه اخیر ادامه یافته است (Cheng, 1998). نرم‌افزاری که بر مبنای این روش به

تحلیل مسائل می‌پردازد، تحت عنوان UDEC¹ شناخته شده است و در سال ۱۹۸۰ توسط به ثبوت رسیده است (Cundall, 1980). توسعه بیشتر UDEC توسط کندال در سال ۱۹۸۵ انجام شد و قابلیت‌های آن را افزایش داد (Itasca, 1992).

با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، نرم‌افزار UDEC (روش اجزاء مجزا) به عنوان ابزار روش تحلیل تنش برای تحلیل‌های مورد نیاز تنش در این تحقیق انتخاب شده است.

۴-۱- اهداف تحقیق

هدف نهایی این تحقیق، برآورد تابع توزیع طول درزه و بررسی چگونگی تغییر مقاومت بلوک‌های سنگی (شامل سنگ بکر و درزه‌هایی با اندازه محدود) نسبت به تغییر طول درزه‌های موجود در آن می‌باشد.

۵-۱- ساختار تحقیق

در این تحقیق ابتدا براساس قضاوت‌های مهندسی و تجارب موجود یک تقسیم‌بندی اولیه از سنگ‌ها مختلف درزه‌دار بعمل می‌آید. سپس با بررسی میدانی و درزه‌نگاری دقیق سنگ‌های جامعه آماری مشخص، یک یا چند تابع توزیع آماری برای بیان تداوم درزه‌های انواع سنگ‌ها برآورد شود. در مرحله بعد مطالعات تحلیلی و تطبیقی به منظور ساخت مدل‌های آماری انجام می‌پذیرد و یک مدل آماری برای تامین اهداف فوق پایه‌ریزی خواهد شد. پس از تدوین مدل آماری، براساس مدل‌سازی‌های عددی، فاکتور تداوم درزه و تاثیر آن در مقاومت نهایی توده‌سنگ درزه‌دار مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

¹ . Universal Distinct Element Code (UDEC)

کلیاتی در مورد درزه‌ها

به دلیل ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ، مکانیک سنگ به یک موضوع منحصراً تبدیل شده است (Hudson, et al., 1997). مواد تشکیل دهنده سنگ بکر طی میلیون‌ها سال فعالیت‌های مکانیکی، گرمایی و شیمیایی را تحمل نموده‌اند. در طی این فرایندها ناپیوستگی‌ها به وسیله رخدادهای زمین‌شناسی، در زمان‌های مختلف و در نتیجه حالت‌های مختلف تنش در سنگ ایجاد شده‌اند (Price, et al., 1990). عامل و یا فرایندی که باعث به وجود آمدن ناپیوستگی شده‌است تاثیر بسزایی بر روی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی ناپیوستگی دارد، پس درک شیوه تشکیل شدن ناپیوستگی‌ها با استفاده از فهم ساختارهای زمین‌شناسی حایز اهمیت است (Hudson, et al., 1997).

۲-۲ - مکانیسم ایجاد درزه‌ها

برای بررسی چگونگی ایجاد درزه‌ها بایستی مساله ایجاد شکستگی در سنگ‌ها را به طور کلی مورد بررسی قرار داد. پس از این که سنگ‌ها تحت تاثیر تنش قرار گرفتند، ابتدا تغییر شکل الاستیک پیدا می‌کنند. در شرایط متعارفی، سنگ‌ها معمولاً ترد و شکننده‌اند و تقریباً پس از خاتمه مرحله تغییر شکل الاستیک، شکسته می‌شوند. اما در اثر فشارهای محصور کننده و درجه حرارت زیاد، بسیاری از سنگ‌ها پس از مرحله الاستیک، تغییر شکل خمیری پیدا می‌کنند با وجود این در تحت این شرایط نیز، سنگ‌ها در مرحله نهایی و پس از خاتمه تغییر شکل خمیری، شکسته می‌شوند (مدنی، ۱۳۸۵).

شکستگی‌های حاصله در سنگ‌ها را می‌توان به دو گروه گسستگی‌های کششی و برشی تقسیم کرد.

(الف) - شکستگی‌های کششی: این نوع شکستگی‌ها نتیجه اعمال تنش‌هایی است که سعی

در جدا کردن سنگ دارد و هنگامی که سنگ بالاخره شکسته می‌شود، ممکن است در قسمت شکسته شده، تغییر مکان قابل توجهی پیدا کنند.

(ب)- شکستگی‌های برشی: شکستگی‌های برشی ناشی از تنش‌هایی است که سعی در لغزش سنگ‌ها دارد و هنگامی که سنگ در نتیجه این دسته تنش‌ها گسسته می‌شود، دو قسمت جدا شده ممکن است در امتداد سطح شکستگی لغزش قابل توجهی پیدا کنند.

یکی از مهمترین مسائلی که باید به آن توجه کرد، رابطه شکستگی‌های حاصله با نوع نیروهای اعمالی است. شکستگی‌های کششی نه تنها در اثر نیروهای کششی تولید می‌شوند بلکه ممکن است در اثر اعمال گشتاور و حتی نیروهای فشاری به وجود آید. به همین ترتیب شکستگی‌های برشی علاوه بر نیروهای فشاری، ممکن است در اثر نتیجه اعمال گشتاور و یا نیروهای کششی ایجاد گردند.

۲-۳- عوامل به وجود آورنده درزه‌ها

عوامل به وجود آورنده درزه‌ها را به طور کلی می‌توان به چهار گروه عوامل تکتونیکی، تنش-های باقی‌مانده، انقباض ناشی از سرد شدن یا خشک شدن و بالاخره حرکات سطحی زمین به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد.

۲-۳-۱- عوامل تکتونیکی

هرگاه سنگی تحت تاثیر پدیده‌های کشش، فشار، گشتاور و پیچش قرار گیرد، در آن درزه به وجود می‌آید. بنابراین، اگر سنگ‌های تشکیل دهنده پوسته نیز تحت تاثیر این پدیده‌ها قرار گیرند، در آن‌ها نیز درزه به وجود خواهد آمد. همراه با برخی از ساخت‌های زمین‌شناسی مانند چین‌ها و گسل‌ها درزه‌ها تشکیل می‌شوند. بنابراین می‌توان به رابطه منطقی بین آنها دست یافت (مدنی، ۱۳۸۵).

۲-۱-۳- درزه‌های مرتبط با چین خوردگی

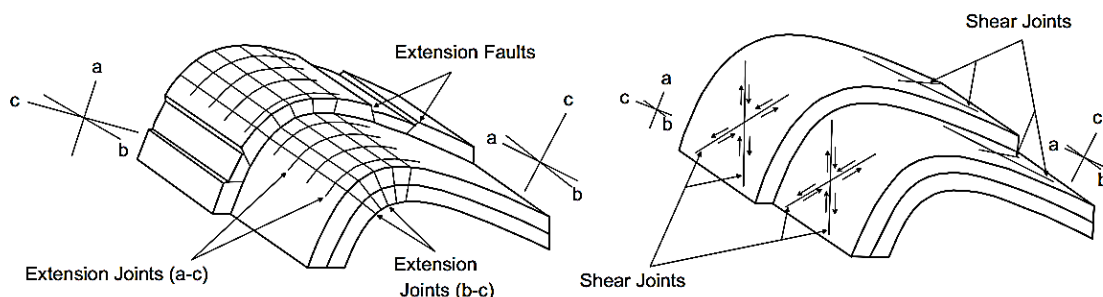
به طور کلی تحت تاثیر اعمال تنش و ظهور تغییر شکل در سنگ‌ها، چندین نوع درزه پدید می‌آید. علاوه بر این در سطوح لایه‌بندی نیز تغییراتی حاصل می‌گردد. نکته مهم قابل ذکر این است که

موارد بررسی شده همگی صفحه هستند، ولی بر روی زمین تمام صفحه قابل مشاهده نبوده و تنها اثر آن‌ها که به شکل خط می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است (نیک پیمان، ۱۳۸۸).

در بسیاری از حالات درزه‌های متعددی در حوالی چین‌ها مشاهده می‌شود. این درزه‌ها بر اثر نیروهایی که لایه‌ها را چین داده‌اند به وجود آمده‌اند، البته امکان دارد که درزه‌ها بعد از چین خوردگی نیز بر ساختار ناحیه اضافه شوند، پس می‌توان آن‌ها را به دو دسته درزه‌های همزمان با چین خوردگی و بعد از چین خوردگی تقسیم کرد.

در این قسمت حالات مختلف درزه‌ای بر اساس جهات مبنا مورد بررسی قرار می‌گیرند. این جهات جهت توصیف درزه‌ها به کار برده شده است و اساس آن‌ها مبتنی بر مفاهیم تقارن می‌باشد (نقل از McClay, 1989). جهات مبنایی مذکور دارای سه محور a ، b و c هستند که همواره سطح لایه بندی با محور ab تعریف می‌گردد. همچنین طبق تعریف ارائه شده بایستی محور c عمود بر لایه بندی و محور b موازی با محور چین در نظر گرفته شود (شکل ۱-۲).

با توجه به تعریف ارائه شده در مورد جهات مبنایی، می‌توان درزه‌هایی را که وابسته به چین خوردگی هستند را در سه گروه عمده تقسیم بندی نمود. این درزه‌ها از آغاز دگرشکلی تشکیل می‌شوند و تا پایان یافتن آن با چین همراه هستند. گروه‌های مذکور به شرح زیر هستند:



شکل ۱-۲- سیستم‌های درزه‌ای وابسته به چین خوردگی (McClay, 1989)

درزهای کششی عرضی^۱ که موازی سطح ac پدید می‌آیند و منجر به جدا شدن بلوک‌های سنگ می‌گردند (McClay, 1989). این سیستم همواره در سطح تاقدیس‌ها و در قسمت‌های عمیق‌تر ناودیس‌ها تشکیل می‌شوند (Milanovic, 1981).

درزهای رهایی^۲ یا همان درزهای کششی طولی که پس از اتمام تاثیر نیروی موثر در چین‌خوردگی پدیدار شده و در چین موازی سطح bc دیده می‌شوند (McClay, 1989). این درزها حاصل عکس‌العمل الاستیک توده‌سنگ در مقابل نیرو بوده و دارای تمرکز در سطح چین‌خوردگی هستند و این نوع درزها دارای عمق نفوذ کمی هستند (Milanovic, 1988).

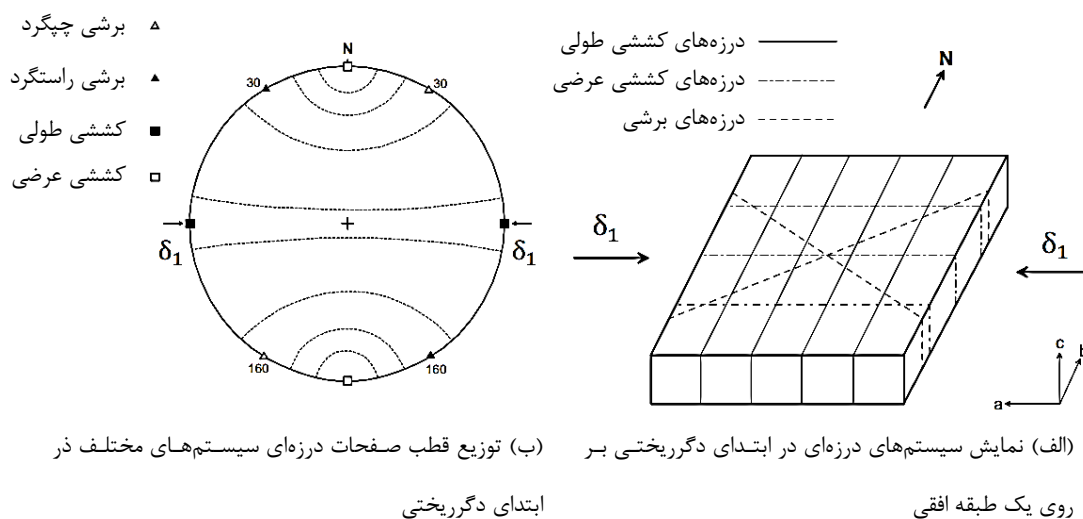
درزهای مزدوج^۳ یا درزهای برشی که به صورت زوج بوده و نسبت به یکدیگر به شکل زاویه‌دار پدیدار می‌شوند و دارای دو مدل راستگرد و چپ‌گرد هستند و فصل مشترک آن‌ها موازی با محور c بوده و صفحات درزهای دو محور a و b را قطع می‌کنند (McClay, 1989).

شکل (شکل ۲-۲-الف) یک طبقه افقی را نشان می‌دهد که در جهت شرقی-غربی در حال فشرده شدن است. با اعمال این تنش به طبقه مذکور، چهار سیستم درزهای در آن پدید می‌آید که همگی بر سطح طبقه عمود هستند. در شکل (شکل ۲-۲-ب) مناطق تمرکز قطب هر سیستم درزهای نمایش داده شده است. بدیهی است که در صورت واکنش شکل‌پذیر طبقه به تنش اعمال شده، درزها نیز با تبعیت از آن و به اندازه شیب لایه‌ها متحمل چرخش می‌شوند. به این ترتیب، قطب صفحات درزهای که بر روی استریونیت شکل (شکل ۲-۲-ب) نمایش داده شده‌اند از محیط دایره دور شده و بر روی دایره بزرگ نماینده یال چین قرار می‌گیرند. به کمک این روش می‌توان با تعیین محور چین و شیب یال‌های آن سیستم‌های درزهای را از یکدیگر تفکیک نمود.

¹ . Tension Joints

² . Relaxation Joints

³ . Conjugate Joints



(الف) نمایش سیستم‌های درزه‌ای در ابتدای دگرریختی بر روی یک طبقه افقی
(ب) توزیع قطب صفحات درزه‌ای سیستم‌های مختلف در ابتدای دگرریختی

شکل ۲-۲- سیستم‌های درزه‌ای مختلف در آغاز دگرریختی (McClay, 1989)

۲-۱-۳-۲- درزه‌های مرتبط با گسل

هنریکسن و براتن بر اساس معیارهایی مانند توزیع و جهت‌یابی شکستگی، جنس سنگ‌هایی که در آن شکستگی دیده می‌شود، کانی‌سازی در شکستگی‌ها و هندسه آن‌ها، منطقه اطراف زون شکستگی اصلی را تا عرض ۲۵۰-۳۰۰ متری به ترتیب زیر تقسیم‌بندی نموده‌اند: (Henriksen, et al., 2006).

هسته با عرض ۰-۲۰ متر: در این منطقه فرکانس بالایی از درزه و شکستگی با شبکه‌ای از شکستگی‌های کوچک که به صورت نیمه موازی نسبت به امتداد گسل قرار گرفته‌اند.

منطقه مجاور هسته با عرض ۵۰-۱۰ متر: در این منطقه شکستگی‌ها دارای فرکانس بالا بوده که بیشتر آن‌ها به صورت نیمه موازی نسبت به امتداد گسل قرار گرفته‌اند، لبه این منطقه با شکستگی‌های مورب مشخص می‌شود.

منطقه دور از هسته با عرض تا ۲۰۰ متر: فرکانس شکستگی در این منطقه پایین بوده و غالب شکستگی‌ها به صورت مایل نسبت به راستای گسل قرار دارند.

۲-۳-۲- تنش‌های باقی‌مانده^۱

تنش‌های باقی‌مانده نیز به عنوان عامل دیگری در تشکیل درزه‌ها بشمار می‌آید. بعضی از این تنش‌های باقی‌مانده، در حقیقت همان تنش‌های حاصله از عوامل تکتونیکی است که به طور کامل از بین نرفته است. اما نوع دیگری از این تنش‌ها نیز، بخصوص در توده‌های گرانیتی، وجود دارد که اهمیت آن‌ها زیادتر است. این سنگ‌ها در اعماق چندین کیلومتری زیر زمین و در تحت فشار لیتوستاتیک فوق-العاده زیاد، منجمد شده‌اند. به مرور که پوسته زمین فرسایش می‌یابد، سنگ‌های مزبور نیز به سطح زمین نزدیکتر می‌شوند و تعادل تنش‌های همه‌جانبه موثر بر این توده به هم می‌خورد زیرا ضخامت سنگ‌های پوشاننده آن‌ها کم شده و در نتیجه مولفه قائم نیروها کاهش یافته است. به عبارت دیگر، توده‌سنگ‌های یاد شده، در امتداد قائم تحت انبساط قرار خواهند گرفت. به همین ترتیب، فرسایش که ادامه می‌یابد، نیروهای قائم موثر بر توده، کمتر و جسم از طرفین و نیز از پایین، تحت تنش‌های زیادتری واقع می‌شود و بدین ترتیب، شکستگی‌هایی در آن به وجود می‌آید (مدنی، ۱۳۸۵).

نمونه جالبی از تشکیل این درزه‌ها را، که به نام ورقه ورقه شدن^۲ نامیده می‌شود، در معادن روباز می‌توان مشاهده کرد. این درزه‌ها، همراه با برداشته شدن سنگ‌های پوشاننده معدن روباز به وجود می‌آیند و در حالت کلی، سطح آن‌ها موازی سطح زمین است. فاصله سطوح درزه‌ها در بعضی موارد بسیار کم است و از چند سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند. نمونه‌های جالب ورقه ورقه شدن را می‌توان در توده‌های گرانیتی و نیز در ماسه‌سنگ‌ها، مشاهده کرد.

۲-۳-۳- انقباض ناشی از سرد شدن یا خشک شدن^۳

بعضی از درزه‌ها، در نتیجه انقباض سنگ‌ها به وجود می‌آیند. انقباض ممکن است در نتیجه انجماد توده‌های آذرین و یا در نتیجه خشک و بی‌آب شدن بعضی از رسوبات باشد. در بسیاری موارد،

^۱ . Residual stress

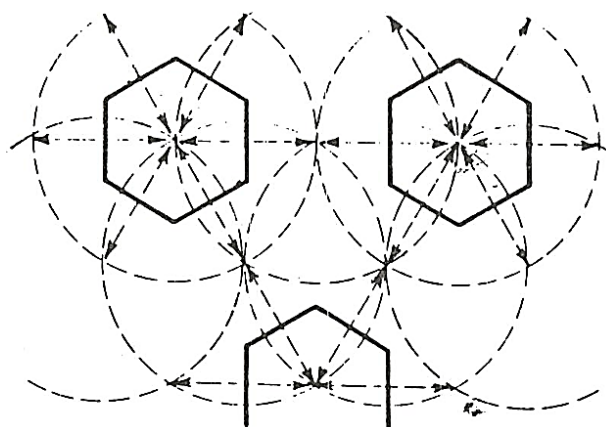
^۲ . Sheeting

^۳ . Shrinkage

می‌توان درزه‌هایی را که باعث شده گدازه‌ها به شکل منشورهایی درآید، مشاهده کرد. همچنین غالباً در رسوبات رسی نیز ترک‌های گلی مشاهده می‌شود که در اثر انقباض ناشی از خشک شدن این رسوبات به وجود آمده‌اند.

هر دو گروه از رسوبات ناشی از سرد شدن و خشک شدن، در نتیجه نیروهای کششی به وجود می‌آیند و بنابر این، در رده شکستگی‌های کششی جای می‌گیرند. هنگامی که یک نقطه از سنگ خروجی یا رسوبات، شروع به انجماد یا خشک شدن می‌کند، در اطراف نقطه مزبور، نیروهای کششی به وجود می‌آید. اگر سنگ متجانس و ایزوتروپ و نحوه انجماد یا خشک شدن نیز یکنواخت باشد، در این حالت در توده سنگ، مراکز انجماد (یا خشک شدن) متعددی به فواصل مساوی از یکدیگر به وجود می‌آید (شکل ۲-۳).

نیروهای کششی موثر بین این مراکز، سبب ایجاد درزه‌های مشابه و در نتیجه، تقسیم توده سنگ به منشورهایی با قاعده چند ضلعی منظم می‌شود. در بسیاری موارد، این چند ضلعی‌ها، به صورت شش ضلعی منظم‌اند. بایستی توجه داشت که در عمل هیچ‌گاه سنگ‌ها کاملاً متجانس و ایزوتروپ نیستند و نحوه انجماد یا خشک شدن نیز یکنواخت نیست. بنابر این، چند ضلعی‌های حاصله، معمولاً نامنظم‌اند (مدنی، ۱۳۸۵).



شکل ۲-۳- تشکیل درزه‌های انقباضی (Badgely, 1965)

۲-۳-۴- حرکات سطحی زمین

در بعضی موارد ممکن است حرکات حاصله در سطح زمین باعث ایجاد درزه‌ها گردد. از جمله این حرکات می‌توان زمین‌لغزش‌ها و حرکات یخچال‌ها را نام برد. عبور یخچال‌ها و از بین رفتن آن‌ها نیز باعث بهم خوردن تعادل نیروهای موثر بر زمین در آن نقطه می‌شود و بنابر این، ممکن است درزه به وجود آورد (مدنی، ۱۳۸۵).

۲-۴- مشخصه‌های درزه‌های تشکیل شده در انواع سنگ‌ها

اغلب، درزه‌هایی که در داخل سنگ بخصوصی که تشکیل می‌شوند دارای ویژگی بخصوصی هستند. در رابطه با نوع سنگی که درزه در آن به وجود آمده است الگوهای متفاوتی وجود دارد. اندازه صفحه درزه به لیتولوژی و اندازه واحدهای سنگی که در آن نفوذ کرده بستگی دارد. دانش لازم در مورد نوع سنگ و ویژگی‌های آن ممکن است کمک زیادی به ارزیابی خصوصیات درزه‌ها ایفا سازد (palmstrom, 1995).

ترزاقی ذکر کرده است که درزه‌های موجود در اغلب سنگ‌های همگن بجز سنگ‌های آذرین درونی، ناپیوسته و غیر منظم هستند و در نتیجه بلوک‌های با قفل‌شدگی پیچیده به وجود می‌آید (Terzaghi, 1946). در بعضی از سنگ‌های لایه‌ای آذرین و دگرگونی که لایه‌ها به طور محکم بهم جوش خورده‌اند، ممکن است درزه‌ها، رگه‌ها و بعضی اوقات گسل‌های کوچک به وسیله رسوب حاصل از حل شدن کوارتز، اپیدوت و یا کلسیت دوباره بهم وصل شوند (Burton, 1965). بعضی از صفحات مانند صفحات لایه‌بندی در سنگ‌های رسوبی که لایه‌های سنگی را از هم جدا می‌کنند جزء صفحات ضعیف به حساب نمی‌آیند، اما می‌توان از آن‌ها به عنوان صفحات کاهش مقاومت نام برد.

۲-۴-۱- تشکیل درزه در سنگ‌های آذرین

معمولاً در سنگ‌های آذرین درونی مانند گرانیت، گابرو، دیوریت و غیره در اثر نیروی کششی ایجاد شده در نتیجه سرد شدن سنگ سه دسته درزه تشکیل می‌شود. در بین این سه دسته درزه، دو

دسته از آن‌ها قائم و بر همدیگر عمود هستند، در حالی که یکی از دسته‌ها افقی و یا تقریباً افقی می‌باشد (درزه‌های ورقه‌ای). این‌ها بیشتر بجای اینکه بدنه سنگ را به منشور تقسیم کنند، بدنه سنگ را به شکل کلوخه‌ها در می‌آورند. وجود این چنین درزه‌های استخراج لایه‌های سنگی را غیر ممکن می‌سازند (Eshwaraiah, et al., 1990).

فاصله‌داری در سنگ‌های آذرین از چند سانتی‌متر تا چندین متر متغیر است. درزه‌های تازه اغلب با اندازه‌ای متوسط و به صورت صفحه‌ای و زبر هستند. در بعضی از مناطق جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها در سنگ‌های گرانیتی در رنج وسیعی از منطقه ثابت است، در حالی که در مناطق دیگر از مکانی به مکان دیگر از نظم خاصی برخوردار نبوده و نامنظم است. توسعه بلوک‌های نامنظم و بزرگ در سنگ‌های تزئینی، استخراج سنگ‌های آذرین درونی را آسان نموده است.

در سنگ‌های بازالتی که در اثر انقباض و سرد شدن یکنواخت ماگمای همگن به وجود آمده‌اند، درزه‌های ستونی رایج است. این‌ها شامل ستون‌های هگزاگونال عمود بر سطح سرد شدن هستند. فاصله این ستون‌ها از یک تا چند دسی‌متر اندازه‌گیری شده است. به دلیل اینکه درزه‌های مابین ستون‌ها باز هستند، آب به راحتی در داخل آن‌ها جریان می‌یابد. ترزاقی ذکر کرده است که درزه‌های موجود در سنگ‌های آذرینی که سریع سرد شده‌اند دارای فاصله‌داری کم هستند، و در بازالت به صورت مغایرت‌آمیزی، ریولیت‌ها تمایل به درزه‌های با فاصله‌داری کم و نامنظم دارند (Terzaghi, 1946).

۲-۴-۲- تشکیل درزه در سنگ‌های رسوبی

سنگ‌های رسوبی معمولاً شامل سه دسته درزه که یکی از آن‌ها به صورت ثابت موازی سطوح لایه‌بندی است می‌باشند و دو دسته دیگر معمولاً صفحات را با زاویه قائم قطع می‌کنند (Terzaghi, 1946, Deer, et al., 1969, Piteau, 1970).

در سنگ‌های رسوبی محکم مانند سنگ‌آهک و ماسه‌سنگی که خوب سیمانته شده باشد، لایه‌های نازکی (شیل جدا شونده) می‌توانند صفحات ضعیفی را به وجود آورند. در سنگ‌آهک و ماسه-سنگ، فاصله‌داری درزه در هر دسته معمولاً در حد یک متر است. در شیل، فاصله‌داری کم‌تر بوده و درزه‌ها به حدی بهم نزدیک هستند که نمونه‌ای از سنگ بکر که ضخامت بیشتر از یک سانتی‌متر یافت نمی‌شود (Terzaghi, 1946). در طی حفاری، در شیل‌ها به قطعات کوچک زاویه‌دار در امتداد صفحات ضعیف کوچک تشکیل می‌شوند. سطوح قطعات بعضی از شیل‌ها به صورت تابان و باریک از صفحات صاف و سیقلی دیده می‌شود. نیتو مشاهده کرده است که سنگ‌های رسوبی که به صورت تخت هستند فاصله‌داری منظمی را از خود نشان می‌دهند (Nieto, 1983).

۲-۴-۳- تشکیل درزه در سنگ‌های دگرگونی

در سنگ‌های دگرگونی یک دسته درزه موازی و یا تقریباً موازی با سطح چین‌خوردگی و یا شیستوزیته و دو دسته درزه دیگر که تقریباً بر این جهت عمود می‌باشند وجود دارد (Terzaghi, 1946, Piteau, 1970, Deer, 1967). بعلاوه این دسته درزه‌ها، درزه‌های دیگری نیز به صورت راندم و متغیر در این سنگ‌ها وجود دارد. در اغلب موارد درزه‌های راندمی به صورت نامنظم دسته درزه‌های دیگر را بهم وصل می‌کند.

گنیس‌ها و شیست‌های چینه‌ای، فیلت‌ها و سلیت‌ها معمولاً صفحات چین‌خورده خوب توسعه یافته از خود نشان می‌دهد که شامل تمرکز ضعیف، کانی‌های صفحه‌ای و کشیده میکا، کلریت، آمفیبوها، پیروکسن‌ها می‌باشند. این صفحات اغلب به طور آسان به درزه‌های چین‌خورده تبدیل می‌شوند (Nieto, 1983).

جهت غالب صفحات ضعف (کلیواژ) در سنگ‌های دگرگونی می‌تواند مستقل از لایه‌بندی اولیه بعد از تحمل دگرشکی منطقه‌ای سنگ باشد. سلیمیر-اولسین ذکر کرده است که احتمال دارد که تنش‌های برشی و کششی جهتی غیر از جهت کلیواژها داشته باشند، کلیواژهای جداشونده و درزه-

ها دیگری را با زاویه‌ی تند قطع می‌کنند به طوری که تشکیل بلوک‌های رومبوئیدرال شکل می‌دهند (Selmer-Olsen, 1964). این چنین الگوی در مناطقی که چین‌خوردگی مرتبط با کوهزایی و دگرگونی را تحمل کرده و زون‌های گسله و خرد شده سنگ که به وسیله تنش‌های برشی توسعه یافته‌اند یافت می‌شوند (Palmstrom, 1995).

۲-۵- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

در کارهای مهندسی، ناپیوستگی‌ها مهمترین فاکتوری هستند که تغییر شکل پذیری، مقاومت و نفوذپذیری توده سنگ را کنترل می‌کنند. و همچنین ناپیوستگی‌های بزرگ و متداوم می‌توانند بر پایداری فضاها و روباز و زیرزمینی تاثیر بسزایی داشته باشند. بنابراین فهم کامل ویژگی‌های هندسی، مکانیکی و هیدرولوژی ناپیوستگی‌ها و شیوه تاثیر آنها بر مکانیک سنگ و مهندسی سنگ ضروری خواهد بود. ISRM برای توصیف خصوصیات ناپیوستگی‌ها ده پارامتر معرفی کرده است (ISRM, 1978)، که در شکل ۲-۴ نمای شماتیکی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها را در داخل توده سنگ نشان داده شده است. این شکل مهمترین ویژگی‌های هندسی توده سنگ را نشان می‌دهد، پارامترهای تشریح شده به شرح ذیل می‌باشند (Hudson, 1997):

جهت ناپیوستگی‌ها^۱: موقعیت ناپیوستگی در فضا را جهت ناپیوستگی می‌نامند و آن را بوسیله جهت شیب (آزیموت)، در جهت عقربه‌های ساعت نسبت به شمال مغناطیسی، و شیب یعنی بزرگترین خط شیب در صفحه ناپیوستگی بیان می‌شود (البته روش‌های متعددی برای نشان دادن جهت‌داری درزه‌ها وجود دارد) و برای مثال یک درزه با شیب ۳۵ درجه و جهت شیب ۱۵ درجه بصورت زیر نشان داده می‌شود:

(۳۵°/۱۵°) شیب/ جهت شیب

¹. Orientation, dip direction/dip angle

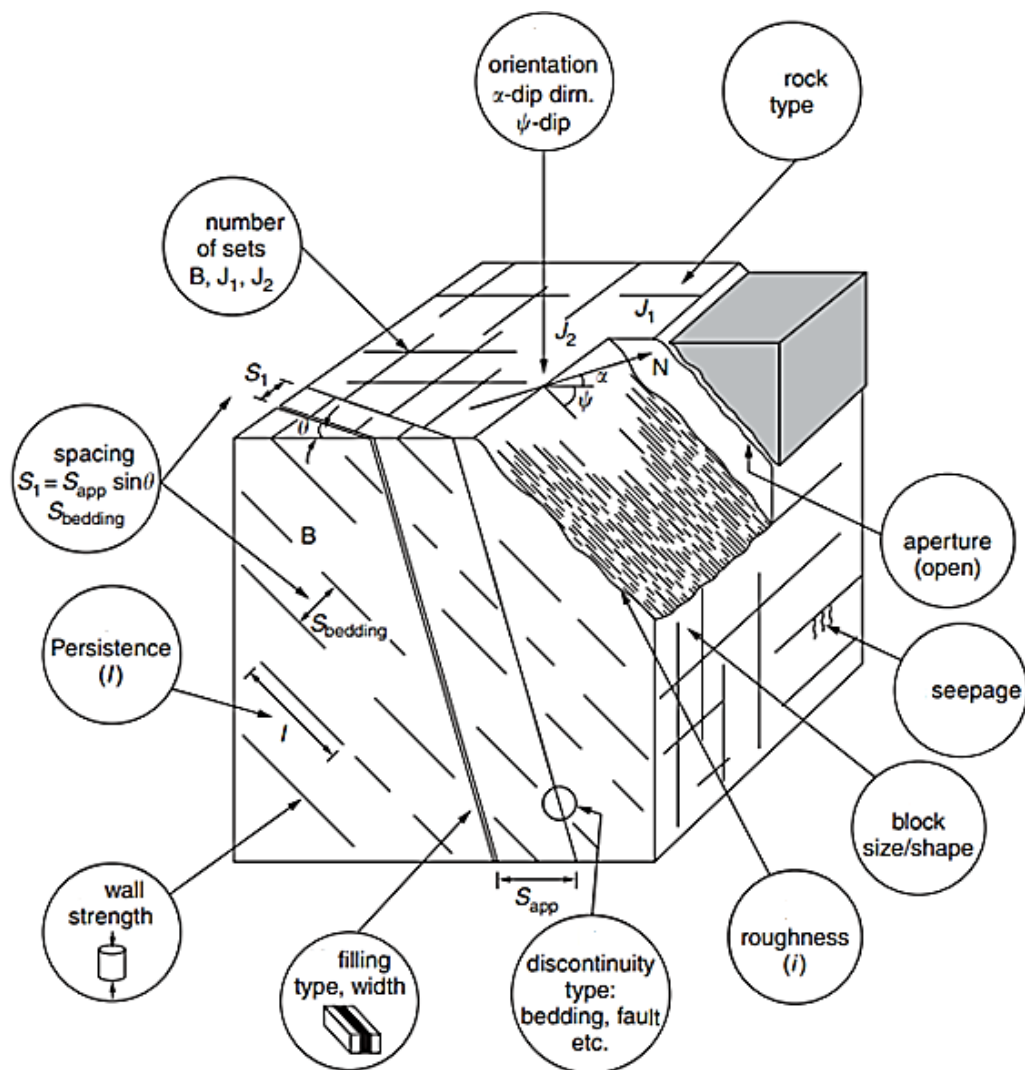
فاصله‌داری و فراوانی^۱: فاصله‌داری به فاصله دو ناپیوستگی مجاور در امتداد خط برداشت گفته می‌شود.

فراوانی نیز به تعداد ناپیوستگی‌ها در واحد طول خط برداشت گفته می‌شود.

تداوم^۲: طول برخورد ناپیوستگی با سطح برونزد نشانگر اندازه و گستروش فضایی و طول نفوذ یک

ناپیوستگی است. که ناپیوستگی در سنگ بکر، ناپیوستگی‌های دیگر خاتمه می‌یابد و یا اینکه به وسیله

سنگ‌های خرد شده، خاک و یا غیره قسمتی از طول آن مدفون می‌شود.



شکل ۲-۴- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ (Wyllie, 1999)

^۱. Spacing and frequency
^۲. Persistence

زبری^۱: به منظور تحلیل جهت و تداوم، ناپیوستگی‌ها را صفحه‌ای فرض می‌کنند، ولی سطح ناپیوستگی‌ها احتمالاً زیر و ناصاف باشد. زبری ناپیوستگی‌ها هم به وسیله چارت‌های استاندارد و هم به صورت ریاضی محاسبه می‌شوند. زبری لاینفک سطحی و تموج نسبت به صفحه میانگین یک ناپیوستگی از نظر مقاومت برشی حائز اهمیت است، که در صورت وجود بازشدگی زیاد یا وجود مواد جانشین شده در بین سطوح ناپیوستگی یا جابجائی قبلی سطوح ناپیوستگی درجه این اهمیت کاسته می‌شود.

مقاومت دیواره^۲: مقاومت فشاری معادل با مقاومت دیواره‌های سنگی سطوح مجاور یک ناپیوستگی است که ممکن است در اثر هوازدگی یا دگرسانی، مقاومتی کمتر از بلوک سنگ داشته باشد.

بازشدگی^۳: بازشدگی فاصله عمودی بین دیواره‌های سنگ مجاور یک ناپیوستگی است که ممکن است توسط هوا یا آب پر شده باشد. این مقدار برای سطوح مجاور صفحه‌ای ثابت، برای سطوح مجاور غیره موازی به صورت خطی تغییر می‌کند و برای سطوح مجاور زیر کاملاً متغیر است.

پرشدگی^۴: پرشدگی موادی است که دیواره‌های سنگی سطوح مجاور یک ناپیوستگی را از یکدیگر جدا می‌کند و معمولاً سنگ میزبان ضعیف‌تر است. این سطوح نمونه عبارتند از شن، رس، گورژ، میلونیت و نیز پوشش‌های نازک کانی و ترمیم‌کننده‌های ناپیوستگی‌ها مثل رگه‌های کوارتزی و کلسیتی.

نشت^۵: نشت جریان آب و رطوبت آزاد مشهود در هر ناپیوستگی منفرد و یا بطور کلی در توده‌سنگ است.

تعداد دسته درزه^۶: جهت ناپیوستگی‌ها کاملاً به صورت راندوم رخ نمی‌دهد، آنها با یک دلیل مکانیکی قابل قبولی رخ داده و به صورت خوشه‌ایی با یک مکانیزم مشخصی جمع می‌شوند. پس در اغلب اوقات

1. Roughness

2. Wall strength

3. Aperture

4. Filling

5. Seepage

6. Number of sets

معرفی کردن دسته ناپیوستگی‌ها (که شامل ناپیوستگی‌های موازی و یا sub-parallel)، و تعداد دسته ناپیوستگی‌های یک توده سنگ مشخص، مفید می‌باشد.

اندازه بلوک^۱: ابعاد بلوک سنگ از تقاطع دسته ناپیوستگی‌ها تشکیل می‌شود. ناپیوستگی‌های مجزا ممکن است اثر بیشتری را بر اندازه و شکل بلوک بگذارد. تخمین میانگین اندازه بلوک و توزیع آن در حفاری و نگهداری مفید می‌باشد که برای سنگ‌های برجا همانند توزیع اندازه ذرات خاک است.

کارهای زیادی برای اندازه‌گیری، کاهش داده‌ها و ارائه هریک از این ده ویژگی مهم ناپیوستگی‌ها بطور گسترده و متغیر انجام شده‌است. روش استاندارد و در واقع درستی برای اندازه‌گیری و تعریف ساختار هندسی سنگ وجود ندارد، بنابراین دقت و اهمیت داده‌های اندازه‌گیری شده به هدف مهندسی بستگی دارد. در تمام این برداشت‌ها بیان و نمایش داده‌ها باید به صورتی باشد که قابل درک و فهم بوده و تفسیرهای جامعی را جهت تجزیه و تحلیل امکان پذیر سازد. بنابراین در هر مطالعه‌ای ممکن است تعاریف و روش‌های گوناگونی بکار برده شود. ولی آنچه مسلم است و از اهمیت شایانی برخوردار است روش‌هایی مورد استفاده خواهد بود که خطاهای احتمالی را تا آنجا که مقدور است، کاهش دهد.

۲-۶- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها

برای درک بهتر و بیان کمی تاثیر ناپیوستگی‌ها بر روی رفتار توده‌سنگ لازم است که در مرحله اول ویژگی‌های مناسب ناپیوستگی‌ها را اندازه‌گیری و به صورت کمی نشان داد. قبل از اینکه به معرفی روش‌های اندازه‌گیری ناپیوستگی‌ها پرداخته شود لازم است اهداف اندازه‌گیری را بیان نمود، این اهداف را می‌توان در سه مورد زیر خلاصه نمود (priest, 1993):

- بررسی ساختارهای زمین‌شناسی

¹ . Block size

- دسته‌بندی توده‌سنگ

- تولید داده‌های ورودی برای تحلیل‌های ویژه، مدل‌های عددی و تجربی پایداری توده-سنگ، تغییر شکل‌پذیری سنگ، جریان سیال، آتش‌کاری، حفاری و یا نگهداری سنگ.
داده‌های لازم برای هر یک از این اهداف به طور قابل توجهی در استراتژی روش و اندازه-گیری متغیر خواهد بود.

ویژگی‌های ناپیوستگی مانند جهت‌داری، اندازه، فراوانی و هندسه سطح آن از ویژگی‌های مهم هندسی آن بوده و باید اندازه‌گیری شوند. دو روش مهم و اساسی برای برداشت ناپیوستگی‌ها، برداشت از روی مغزه حفاری و دیگری برداشت از رخنمون‌های سنگی است.

۲-۶-۱- برداشت ناپیوستگی‌ها در مغزه‌های حفاری

در این روش می‌توان بعضی از ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها را از روی مغزه حفاری بدست آورد. مزیت مهم مغزه حفاری این است که به آسانی می‌توان از سنگ نمونه برداری کرده و آن را برای آزمایشات تغییرشکل‌پذیری و مقاومت سنگ بکار برد.

۲-۶-۲- برداشت ناپیوستگی‌ها از روی رخنمون‌های سنگی

اندازه‌گیری از روی رخنمون‌های سنگی چه بر روی زمین و چه در داخل زمین، از این مزیت که از منطقه بیشتری برای برداشت استفاده می‌شود، برخوردار است. به طوری که می‌توان ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مانند جهت‌داری، اندازه و دیگر خصوصیات بزرگ-مقیاس ناپیوستگی‌ها را برداشت نمود. رابطه زمین‌شناسی بین گروه ناپیوستگی‌ها را نیز می‌توان مشاهده نمود. تنها مشکل و یا عیب این روش در دسترس نبودن رخنمون‌ها و تحت تاثیر قرار گرفتن آن‌ها از انفجار و یا دگرشکلی آن‌ها بر اثر هوازدگی و پنهان ماندن در زیر گیاهان است. همچنین مهارت کافی برای اندازه‌گیری‌ها نیاز خواهد بود، هزینه تجهیزات و کارگر در مقایسه با هزینه مغزه حفاری ناچیز است. تا این اواخر،

اندازه‌گیری‌ها بر روی رخنمون‌های سنگی به صورت دلخواه و قضاوت شخصی از برداشت‌های زمین-شناسی تهیه می‌شد. این روش تنها برخی از داده‌های کمی را برای طراحی‌های مهندسی فراهم می‌کرد. اخیراً روش‌های بهتر و قوی‌آماری برای برداشت داده‌ها معرفی شده است. روش‌های پرکاربرد معرفی شده دو روش خط برداشت و پنجره برداشت می‌باشند. این روش‌ها توسط افراد مختلف تشریح و معرفی شده‌اند (Attwell, Fooks, et al., 1969, Baecher, et al., 1978, Priest, et al., 1981, ISRM, 1978, 1976). در ادامه هر یک از آنها به طور مفصل توضیح داده خواهند شد.

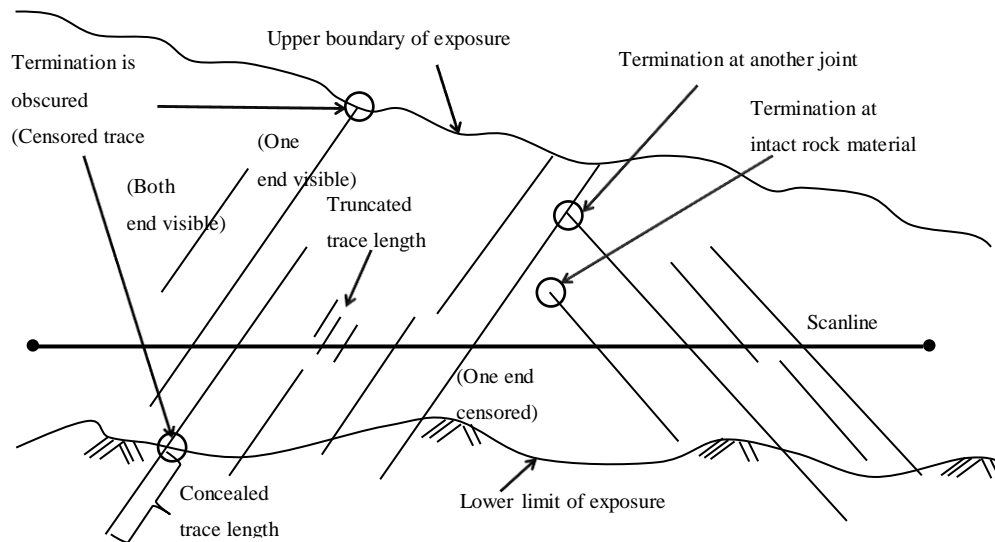
۲-۶-۱-۲ خط برداشت

در مورد این روش نکته قابل توجه این است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش خط برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم را برای هدف مورد نظر جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی سنگ تطابق داد (priest, 1993).

سطوح مسطح تمیز سنگی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد. با توجه به نظر محققین باید رخنمون انتخابی شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتها از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد. چنین رخنمون‌هایی در پرتگاه‌های کنار ساحل، شیب‌های حاصل از احداث جاده‌ها، پیت‌های معدنی و یا تونل‌های دسترسی یافت می‌شوند. باید در انتخاب سایت دقت کرد که ناپیوستگی‌ها و مواد سنگ نمایانگر آن مکان و نیز رخنمون انتخابی برای کار برداشت ایمن باشد.

فصل مشترک ناپیوستگی‌ها و رخنمون‌های سنگی به صورت خطوطی در سطح سنگ دیده شده و شبکه دو بعدی از ناپیوستگی را تشکیل می‌دهند. خط برداشت از متر نواری ۲ تا ۳۰ متر تشکیل شده و توسط دو میخ در امتداد رخنمون و بیشترین شیب سنگی ثابت می‌شود (شکل ۲-۵). همچنین خط برداشت‌های ثانویه عمود بر خط برداشت اولیه، برای کم کردن خطای جهت‌داری برداشت می‌شوند. بهتر است که نقطه شروع خط برداشت از یک ناپیوستگی باشد ولی رعایت این نکته

چندان مهم نیست. موقعیت مکانی، جهت‌داری شرایط رخنمون سنگی همراه زاویه میل و امتداد خط برداشت در قسمت بالایی ورقه برداشت ثبت خواهد شد.

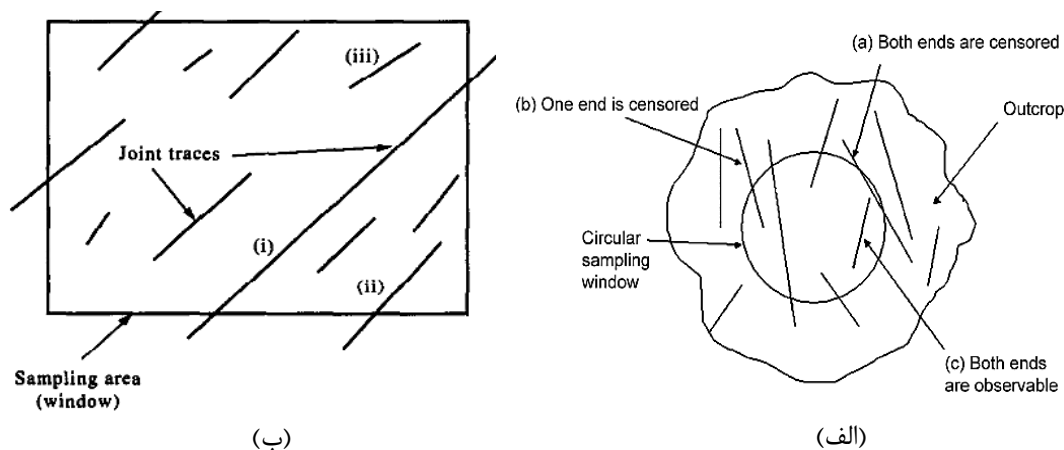


شکل ۲-۵- نمای خط برداشت و معرفی انواع پایانه درزه‌ها (درزه‌هایی که هر دو انتهای آن دیده می‌شود، درزه‌هایی که یک انتهای آن‌ها دیده می‌شوند و درزه‌هایی که هیچ انتهای آن دیده نمی‌شود) (بر گرفته از (priest, 1993))

در این روش به منظور برداشت ناپیوستگی‌ها از یک خط مشخص که دارای زاویهٔ میل و امتداد معلوم است استفاده می‌شود. تمام پارامترهای هر ناپیوستگی که خط برداشت را قطع کند ثبت می‌شوند. حداقل باید از سه خط برداشت که در یک صفحه قرار ندارند استفاده شود. تمام داده‌های مورد نیاز این تحقیق با این روش جمع‌آوری شده است.

۲-۲-۶-۲ پنجره برداشت

در این روش محدوده‌ای از سطح که بیانگر مشخصات کلی توده سنگ است انتخاب می‌شود و تمام درزه‌هایی که در این محدوده قرار دارند برداشت می‌شوند. حداقل باید از دو پنجره که در یک صفحه قرار ندارند استفاده شود. موقعیت درزه توسط مختصات انتهای آن در پنجره تعریف می‌شود (priest, 1993). در شکل ۲-۶ دو نوع پنجره برداشت نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- نمایشی از دو نوع پنجره برداشت: (الف) پنجره برداشت دایره‌ای (Zhang, et al., 1998) و (ب) پنجره برداشت مستطیلی (Kulatilake, et al., 1996)

۲-۷- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل، مفاهیم پایه مورد نیاز در رابطه با ناپیوستگی‌ها مورد بحث قرار گرفتند. در بخش ۲-۲، مکانیسم ایجاد درزه‌ها تشریح گردیدند. در بخش ۲-۳، عوامل به وجود آورنده درزه‌ها که شامل چهار گروه عوامل تکتونیکی، تنش‌های باقی‌مانده، انقباض ناشی از سرد شدن و یا خشک شدن و حرکات سطحی زمین بودند بررسی گردیدند. در بخش ۲-۴، مشخصه و چگونگی تشکیل درزه در سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی معرفی شدند. در بخش ۲-۵، تمام ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها تشریح شدند و در نهایت در بخش ۲-۶، معایب و مزایای روش‌های برداشت ناپیوستگی‌های توضیح داده شدند و با توجه به مزیت روش خط برداشت نسبت به روش‌های دیگر، به عنوان روش مورد استفاده برای جمع‌آوری داده‌ها در این تحقیق معرفی شده است.

در فصل آینده داده‌های جمع‌آوری شده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی طول درزه تحلیل و بررسی و در نهایت تابع توزیع طول درزه معرفی خواهد شد.

۳- فصل سوم

برآورد تابع توزیع تداوم درزه

از دیدگاه مهندسی، دانستن نوع و شدت نقاط ضعف سنگی که با آن روبرو خواهیم شد نسبت به دانستن نوع سنگ، از اهمیت بیشتری برخوردار است (Terzaghi, 1946). ویژگی‌های مهندسی توده‌سنگ توسط ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر کنترل بیان می‌شود. در واقع ناپیوستگی به نقاط وضعی در داخل سنگ گفته می‌شود که مقاومت کششی پایین و یا در حد صفر دارند (Palmstrom, 1995). برای پیش‌بینی رفتار سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده‌سنگ‌های درزه‌دار احداث می‌شوند، لازم است که ویژگی‌های هندسی و ژئومکانیکی درزه‌ها و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ بکر مشخص و تعیین گردند. درزه‌ها ناپیوستگی‌هایی هستند که جابجایی محسوسی از خود نشان نداده‌اند (Hudson, 1997)، و در تمام توده سنگ‌ها، از سطح زمین تا حدود یک کیلومتر ضخامت پوسته زمین با طول‌های از چند میلی‌متر تا چند صد متر یافت می‌شوند (priest, 1993).

طول درزه، گسترش صفحه شکست و در نتیجه اندازه بلوک‌های سنگی را تعیین می‌کند، و به دلیل اینکه، پایداری تونل‌های ترافیکی در داخل توده سنگ‌های درزه‌دار در اعماق کم بطور چشمگیری تحت تاثیر پایداری بلوک‌های سنگی می‌باشند، پایداری این تونل‌ها را کنترل می‌کند. درزه‌های ایجاد شده در داخل توده سنگ بطور مستقیم و یا غیره مستقیم بر مقاومت آن تاثیر می‌گذارد (Sari, 2009, Gumedede, 2007, Gumedede, 2007). همچنین محققان زیادی نشان داده‌اند که پارامترهای هندسی درزه‌ها، بویژه طول آن، تاثیر بسزایی بر روی رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ دارند (Odling, 1999, Meyer, 2002). در نتیجه، طول درزه به دلیل تاثیرگذاری زیاد بر مقاومت توده سنگ و کنترل پایداری سازه‌هایی که در داخل و بر روی توده سنگ ساخته می‌شوند از مهمترین پارامترهای هندسی درزه محسوب می‌شود. بنابراین باید پارامترهای هندسی درزه و بویژه طول آن بطور دقیق اندازه‌گیری شوند. انشتین و براون پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان طول درزه را با مشاهده اثر آن در رخنمون‌های سنگی مقداردهی نمود (Brown, 1981, Einstein, et al., 1983). بدلیل اینکه،

رخنمون‌های سنگی نسبتاً کوچک بوده و صفحه کامل درزه در داخل توده سنگ بطور کامل قابل مشاهده نیست، اندازه‌گیری طول درزه یکی از مشکل‌ترین پارامترهایی درزه بوده و نمی‌توان آن را بصورت دقیق اندازه‌گیری نمود (Brown, 1981, Palmstrom, 1995, Villaescusa, et al., 1992). بطور معمول در برداشت‌های صحرایی تنها طولی از درزه که قابل مشاهده است اندازه‌گیری می‌شود و این موجب خطا در بدست آوردن مقدار دقیق آن می‌گردد. هدف اولیه از اندازه‌گیری طول درزه، تخمین ابعاد بلوک‌های سنگی تشکیل شده توسط این صفحات می‌باشد (Brown, 1981, Priest, 1967).

بدلیل ماهیت تصادفی ویژگی‌های درزه و اینکه، بطور معمول در بازه وسیعی متغییر هستند، لازم است در همان طراحی‌های اولیه مد نظر قرار بگیرند (توصیف شوند). بنابراین، به دلیل این ماهیت رخدادهای طبیعی و وجود روش‌های گسترده احتمالاتی در زمینه‌های علوم زمین، (تاکید داشته‌اند که استفاده از روش‌های احتمالاتی نسبت به روش‌های قطعی بیشتر به واقعیت نزدیک‌تراند (Muspartt, 1972, Sari, 2010). با این حال، ممکن است در تخمین یک رفتار احتمالی، طیف وسیعی از داده‌های آن ویژگی تصادفی مد نظر قرار گیرند. با استفاده از تابع توزیع احتمال، می‌توان به هدف ذکر شده دست یافت، که هم بازه‌ای که متغییر می‌تواند داشته باشد و هم فراوانی مربوطه‌ی هر مقداری در این بازه را تعیین می‌کند (Evans, et al., 1993).

طول درزه را می‌توان با استفاده از مشاهده اثر آن بر روی روخنمون‌های سنگی اندازه‌گیری و بصورت کمی بیان نمود (ISRM, 1978)، که در این تحقیق منظور از طول درزه همان طول اثر درزه می‌باشد. غالباً ابعاد رخنمون‌های سنگی نسبت به سطح و یا طول درزه کوچک بوده و تنها می‌توان طول واقعی درزه را تخمین زد. با توجه به گفته‌های قبلی می‌توان گفت که تمام پارامترهای هندسی درزه در نتیجه مکانیسم مشابهی تشکیل شده‌اند، بنابراین باید رابطه‌ای منطقی ولی پیچیده بین آن‌ها وجود داشته باشد. برای مثال، پالمستروم طول درزه را کسری از بازشدگی آن معرفی کرده است و نیز

اضهار داشته که شکل و اندازه درزه‌ها بطور قابل توجهی به نوع، هندسه و انداز توده سنگی که در آن نفوذ کرده است، بستگی دارد (Palmstrom, 1995). در عملیات درزه‌نگاری در کارهای مرتبط با مهندسی سنگ می‌توان ویژگی‌های دیگر درزه را مانند بازشدگی، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، فاصله‌داری، زبری و مقاومت دیواره درزه را به طور دقیق اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه در سال-های اخیر از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ و ماشین بردار پشتیبان^۲ جهت پیش‌بینی جواب مسائل پیچیده استفاده شده است، در این تحقیق با استفاده از روش‌های مذکور طول درزه پیش‌بینی خواهد شد.

۲-۳- مطالعات قبلی مربوط به تابع توزیع طول درزه

ویژگی‌های هندسی درزه مانند فاصله‌داری (چگالی)، طول و بازشدگی مهم‌ترین و معمول‌ترین ویژگی‌هایی هستند که اندازه‌گیری می‌شوند. به دلیل خطاهای ناشی در جمع‌آوری داده‌ها و جمع کردن آن‌ها در هیستوگرام قبل از تحلیل، توابع توزیع‌هایی که برای طول درزه معرفی شده‌اند نسبت به دیگر ویژگی‌های هندسی درزه از سازگاری کمتری برخوردار هستند. همچنین، درک فرآیندهای فیزیکی کنترل‌کننده دیگر ویژگی‌های هندسی درزه نسبت به فرآیندهای فیزیکی کنترل‌کننده طول درزه آسان‌تر است. از نظر تئوری، تفاوت موجود در توابع توزیع مشاهده شده درزه ناشی از تفاوت در فرآیندهای مکانیکی مختلفی است که درزه را ایجاد نموده است، برای مثال، توزیع یکنواخت تنش باعث به وجود آمدن توزیع‌های نمایی و فرآیندهای پیچیده باعث ایجاد توزیع‌های لاگ‌نرمال می‌شود (Dershowitz, et al., 1988). توابع توزیع نمایی و لاگ‌نرمال به صورت غالب برای برآورد طول درزه، توسط محققان معرفی شده‌اند. در جدول ۱-۳، نتیجه تحقیق محققان در زمینه برآورد تابع توزیع طول درزه، به صورت فهرست‌وار نشان داده شده است.

^۱ . Artificial Neural Network (ANN)

^۲ . Support Vector Machine (SVM)

جدول ۳-۱- نتیجه تحقیق محققان در زمینه برآورد تابع توزیع طول درزه

نام محقق/محققان	نوع سنگ (زمین‌شناسی)	تابع/توابع توزیع معرفی شده
(Sari, et al., 2010)	آندزیت	نمایی
(Weiss, 2008)	-	لاگ‌نرمال
(Gumede, et al., 2007)	معدن طلا	لاگ‌نرمال
(Kulatilake, et al., 2003)	توده سنگ گنیس	گاما، نمایی و لاگ‌نرمال
(Meyer, et al., 2002)	سنگ‌های گسل خورده‌ی رسوبی و آتشفشانی	لاگ‌نرمال
(Ehlen, 2002)	گرانیت‌های دست‌نخورده و هوازده	لاگ‌نرمال
(Park, et al., 2001)	-	نمایی
(Song, et al., 2001)	-	نمایی*، لاگ‌نرمال**
(Odling, et al., 1999)	رسوبی	لاگ‌نرمال
(Kulatilake, et al., 1996)	گرانیت	لاگ‌نرمال
(Ayday, 1989)	آندزیت	گاما، نمایی***
(Dershowitz, 1988)	-	لاگ‌نرمال
(Gregory B, 1983)	مختلف	لاگ‌نرمال
(Hudson, et al., 1983)	-	لاگ‌نرمال
(Baecher, 1983)	-	نمایی
(Herget, 1982)	-	نمایی
(Wallis, et al., 1980)	-	نمایی
(Warburton, 1986)	-	لاگ‌نرمال
(Baecher, et al., 1978)	-	لاگ‌نرمال
(Barton, 1978)	دگرگونی	لاگ‌نرمال
(Cruden, 1977)	مختلف	نمایی
(Baecher, et al., 1977)	-	لاگ‌نرمال
(Priest, et al., 1976)	-	لاگ‌نرمال
(Call, et al., 1976)	-	نمایی
(Bridges, 1976)	-	لاگ‌نرمال

*با استفاده از معادله‌های برگرفته از برداشت‌های دایره‌ای و مستطیلی
 **با استفاده از برازش مستقیم تابع توزیع به هیستوگرام برداشت پنجره‌ای
 ***با افزایش اثر هوازدگی سنگ، نوع تابع توزیع از گاما به نمایی منفی تغییر می‌کند.

۳-۳- جمع‌آوری داده‌های طول درزه در سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی

درزه‌نگاری یکی از عناصر مهم در مطالعات خصوصیات مهندسی سنگ است زیرا هندسه و

ویژگی‌های درزه‌های توده‌سنگ به طور قابل توجهی بر مقاومت، تغییرشکل‌پذیری توده سنگ و رفتار سیالات داخل توده سنگ تاثیر می‌گذارد (Liu, 2008). برای تعیین پارامترهای اندازه بلوک‌های سنگی از برداشت طول درزه در رخنمون‌های سنگی توسط خط برداشت و یا پنجره برداشت استفاده می‌شود. مشکلی که این دو روش دارند این است که تنها روی سطح را برداشت می‌کنند، پس آن‌ها خصوصیات ساختاری داخل سنگ را نمی‌توانند تعیین کنند. انجام درزه‌نگاری با خط برداشت مهارت خیلی زیاد و تجربه زیادی در زمینه نقشه زمین‌شناسی نیاز ندارد. در حالی که در درزه‌نگاری توسط پنجره برداشت اطلاعات بیشتری در مساحت وسیعتری جمع‌آوری می‌شود ولی خط برداشت داده‌هایی با جزئیات بیشتر در یک مکان مشخص نتیجه می‌دهد (Gumede, 2007). به همین دلیل، داده‌های مورد نیاز در این تحقیق توسط روش خط برداشت جمع‌آوری شده است. برای هر درزه‌ای که خط برداشت را قطع می‌کند، مشخصات فاصله تقاطع با خط برداشت (فاصله ابتدای خط برداشت تا نقطه تقاطع درزه در امتداد خط برداشت)، فاصله‌داری، بازشدگی، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، زبری (JRC) و مقاومت دیواره درزه با چکش اشمیت ارزیابی و یادداشت شده است.

طبق پیشنهادات پریست، رخنمون سنگی که برای درزه‌نگاری انتخاب می‌شود باید تقریباً سطحی صفحه‌ای و تمیز داشته و در مقایسه با اندازه و فاصله‌داری درزه‌ها بزرگ باشد. همچنین این رخنمون باید شامل ۱۵۰ تا ۳۵۰ درزه بوده و ۵۰ درصد از آن‌ها حداقل یک سمت قابل مشاهده داشته باشند. پس با توجه به این شرایط باید برداشت‌های درزه‌نگاری را در رخنمون‌های سنگی بزرگ دست‌نخورده انجام داد (priest, 1993).

با توجه به اهداف تحقیق باید تابع توزیع طول درزه در سنگ‌ها تعیین گردد، در این تحقیق، در هر سه نوع از سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و برای هر یک سه برداشت درزه‌نگاری انجام شده است. به این منظور سنگ‌های آذرین (آندزیت) و دگرگونی منطقه سرشیو که در ۴۰ کیلومتری شهرستان مریوان در استان کردستان واقع شده است برای برداشت سنگ‌های آذرین و دگرگونی

انتخاب شده‌اند. و برای برداشت سنگ‌های رسوبی، رخنمون‌های سنگی معدن تزره در ۷۰ کیلومتری شهرستان شاهرود در استان سمنان انتخاب شده‌اند. همانطور که گفته شد در هر یک از این سنگ‌ها در سه رخنمون که شرایط درزه‌نگاری را داشته باشند، عملیات درزه‌نگاری صورت گرفته است. در شکل ۱-۳ سه رخنمون از سه نوع سنگ آذرین، دگرگونی و رسوبی نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ت)

شکل ۱-۳-نمایی از رخنمون‌های سنگی برداشت شده؛ (الف) آندزیت‌های سرشیو، (ب) سنگ‌های دگرگونی سرشیو و

(ت) سنگ‌های رسوبی معدن تزره

در جدول ۲-۳ مشخصات درزه‌نگاری نه رخمون سنگی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی همراه با مشخصات رخمون‌ها و خط برداشت، نشان داده شده است.

جدول ۲-۳- مشخصات درزه‌نگاری نه رخمون سنگی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی همراه با

مشخصات رخمون‌ها و خط برداشت

نوع سنگ	منطقه برداشت	تعداد درزه‌ها	تعداد دسته درزه‌ها	مشخصات رخمون		مشخصات خط برداشت	
				شیب	جهت شیب	ترند*	پلانژ**
آذرین	SI1	۱۹۵	۵	۵۱	۱۹۰	۱۱۶	۳۵
	SI2	۲۰۱	۴	۳۵	۱۱۵	۹۷	۴۰
	SI3	۱۶۰	۳	۴۰	۱۸۰	۱۱۸	۳
دگرگونی	SM1	۱۶۵	۳	۳۷	۷۰	۸	۹۰
	SM2	۲۱۰	۳	۳۷	۵	۸۵	۸
	SM3	۱۴۳	۴	۳۲	۲۵	۹۳	۸
رسوبی	SS1	۱۷۳	۴	۴۷	۳۳۵	۹۵	۲۰
	SS2	۲۲۴	۳	۳۴	۳۱۰	۸۰	۱۲
	SS3	۱۸۱	۴	۴۱	۱۱۴	۰۵	۱۵

*Trend
**Plunge

۴-۳- تخمین اندازه طول درزه

برای دستیابی به یک دید درست از درزه‌های برداشت شده لازم است درزه‌ها به سه گروه تقسیم شوند؛ درزه‌هایی که هر دو انتهای آن‌ها دیده می‌شود (n)، درزه‌هایی که فقط یک انتهای آن‌ها دیده می‌شود (m) و درزه‌هایی که هر دو انتهای آن دیده نمی‌شود (p). سپس ضرایب R_0 ، R_1 و R_2 جهت نشان دادن وضعیت پایانه درزه‌ها مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Kulatilake, et al 1996):

$$R_0 = \frac{p}{(p+m+n)}$$

$$R_1 = \frac{m}{(p+m+n)}$$

$$R_2 = \frac{n}{(p+m+n)}$$

در جدول ۳-۳ مقادیر محاسبه شده ضرایب ذکر شده همراه با خلاصه‌ای از درزه‌نگاری انجام

شده از نه رخنمون سنگی در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی نشان داده شده است.

عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آن‌ها از حد اندازه‌گیری کوچکتر است به عنوان خطای ترانکشن^۱ معرفی شده است. و درزه‌هایی که طول آن‌ها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود را به عنوان خطای سنسورینگ^۲ شناخته شده است (Dershowitz, Priest, et al., 1976, 1988, Hudson, et al., 1983, Barton, 1978, Baecher, 1977, Kulatilake, et al., 1996).

آقای لاسلیت تحلیلی ساده برای تاثیر حاشیه‌ایی محدود شدگی طول درزه‌ها در درزه‌نگاری به روش خط و پنجره برداشت ارائه نموده است. در این روش اگر x_i طول درزه نام که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است باشد، و y_j طول درزه نام که هر یک انتهای آن قابل مشاهده است باشد، و z_k طول درزه نام که هر دو انتهای آن قابل مشاهده نیست باشد، لاسلیت بهترین تخمین میانگین طول درزه (μ_L) را که به مقدار میانگین تصحیح شده طول درزه از آن نام برده است با رابطه زیر بدست می‌آید (Laslett, 1982).

$$\mu_L = \frac{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j + \sum_{k=1}^p z_k}{2n + m} \quad (2-3)$$

که در آن n تعداد درزه‌هایی است که هر دو انتهای آن‌ها قابل مشاهده باشد، m تعداد درزه‌هایی که یکی از دو انتهای آن‌ها قابل مشاهده باشد و p تعداد درزه‌هایی را نشان می‌دهد که هر دو انتهای آن‌ها قابل مشاهده نباشد. برای تمام برداشت‌های انجام گرفته میانگین تصحیح شده محاسبه و در جدول ۳-۳ به صورت مقایسه‌ای با میانگین مشاهده‌ای نشان داده شده است.

همانطور که در جدول مشخص است، در تمام موارد مابین میانگین طول درزه تصحیح شده و میانگین طول درزه مشاهده شده تفاوت وجود دارد و میانگین طول درزه تصحیح شده از میانگین طول درزه مشاهده شده کمتر است. همچنین هر چه مقدار R_0 و R_1 افزایش می‌یابد این اختلاف نیز افزایش

¹ . Truncation biases

² . Censoring biases

می یابد.

جدول ۳-۳- خلاصه‌ی درزه‌های برداشتی و مقایسه میانگین طول درزه‌های مشاهده‌ای و تصحیح شده

نوع سنگ	سایت	تعداد درزه‌ها	تعداد دسته درزه‌ها	نوع پایانه درزه‌ها			میانگین طول درزه‌ها	
				R ₀	R ₁	R ₂	مشاهده شده	تصحیح شده
آذرین	SI1	۱۹۵	۵	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۶۷	۲/۵۹	۱/۶۷
	SI2	۲۰۱	۴	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۵۷	۲/۲۴	۱/۶۴
	SI3	۱۶۰	۳	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۶۹	۵/۱۵	۳/۳۰
دگرگونی	SM1	۱۶۵	۳	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۴۳	۷/۵۹	۷/۳۷
	SM2	۲۱۰	۳	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۴۲	۵/۰۹	۴/۸۵
	SM3	۱۴۳	۴	۰/۳۴	۰/۱۰	۰/۵۶	۲/۹۶	۲/۴۳
رسوبی	SS1	۱۷۳	۴	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۵۶	۳/۳۷	۲/۶۱
	SS2	۲۲۴	۳	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۵۲	۱/۱۳	۰/۸۸
	SS3	۱۸۱	۴	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۶۲	۲/۴۵	۱/۷۱

طول درزه قابل مشاهده شده بر روی رخنمون‌ها، به اندازه و بایاس‌های سنسورینگ و ترانکیشن بستگی دارد (Kulatilake, et al., 1996). تاثیر بایاس ترانکیشن را با کاهش سطح ترانکیشن در موقع برداشت درزه، می‌توان کاهش داد. در این تحقیق طول ۰/۱ متر برای حد ترانکیشن انتخاب شده است. رخنمون‌های سنگی انتخاب شده نیز دارای اندازه نسبتاً بزرگ در برابر اندازه درزه‌های موجود می‌باشند، پس بایاس‌های ترانکیشن و اندازه مد نظر قرار نمی‌گیرند. با این حال، برای حذف اثر بایاس سنسورینگ، از مدل‌های تخمین‌گر شبکه‌های عصبی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای تخمین طول درزه‌هایی که طول آن‌ها بطور کامل مشاهده نمی‌شود، استفاده شده است. در نهایت با بکار بردن مدل‌های آموزش دیده برای سه نوع سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی (نه رخنمون)، طول درزه‌هایی که بطور کامل قابل مشاهده نیستند تخمین زده شده است. در ادامه هر یک از این روش‌ها توضیح داده شده‌اند.

هر موجود هوشمندی جهت بقای خود در محیط دائماً متغیر و پویای اطراف، نیازمند گرفتن سیگنال‌های موجود در محیط اطراف خود به عنوان ورودی و انجام پردازش روی آن‌ها به منظور قابل استفاده شدن اطلاعات موجود در این سیگنال‌ها جهت تصمیم‌گیری و نشان دادن واکنش نسبت به محرک‌ها و عوامل خارجی است. از آنجا که انجام یافتن این فرآیند با ویژگی‌های خاص به ساختارهای پیچیده‌ای نیاز دارد، بنابراین در اغلب جانداران تکامل یافته‌تر و انسان، سیستم عصبی این وظیفه را بر عهده دارد و با ایجاد ارتباطات موازی، فرآیند پردازش سیگنال‌های ورودی را به انجام می‌رساند. از یک طرف توان بالای پردازش ورودی‌ها در چنین ساختارهایی، و از طرف دیگر نیاز روزافزون حوزه‌های مختلف علوم به انجام محاسباتی با حجم و پیچیدگی زیاد، که اغلب، روابط غیرخطی بر آن‌ها حکمفرما بوده و با روش‌های تحلیلی به طور کامل و در زمان معقولی قابل انجام نیستند موجب گرایش محققان به الگوگیری از این دسته از روش‌های پردازش اطلاعات شده است (Hopfield, 1982).

شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش‌های محاسباتی برگرفته از سیستم عصبی هستند. با استفاده از عناصر ساده پردازش موسوم به نرون، می‌توان کارهای پیش‌بینی، طبقه‌بندی، شناسایی و غیره را شبیه‌سازی نمود (Denby, et al., 1994). یک شبکه چند لایه شامل حداقل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی می‌باشد. تعداد نرون‌های موجود در لایه‌های ورودی و خروجی برابر تعداد پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشند. ولی یافتن تعداد نرون‌های موجود در لایه پنهان خیلی مهم بوده و معمولاً به صورت سعی و خطا محاسبه می‌شوند (Kurtal, 2005, Gupta, et al., 2007). هرچند که روش‌های زیادی برای پیدا کردن آن‌ها معرفی شده است ولی روش سعی و خطا را بیشتر محققان ترجیح می‌دهند (Wang, et al., 2004). معمولاً کاربرد یک و یا دو لایه پنهان برای مدل‌سازی مسایل ساده و پیچیده کافی است (Dan, et al., 2009). انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی مصنوعی را می‌توان

برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی به کار برد ولی در بین این‌ها روش پیش‌خورد - پس‌انتشار^۱ رایج‌تر می‌باشد. در مسیر پیش‌خورد، شبکه با استفاده از وزن‌های اولیه و بایاس‌ها^۲، از داده‌های آموزشی خروجی‌ها را محاسبه می‌کند، و در مسیر پس‌انتشار، تا رسیدن به مطابقت مابین مقادیر خروجی و مقادیر واقعی هدف، وزن‌ها و بایاس‌ها بر اساس مقایسه مقادیر خروجی شبکه و مقادیر واقعی هدف تغییر داده می‌شوند. به سیگنال منتشر شده‌ی خطای برگشتی از لایه آخر به لایه اول در هر چرخه، دوره^۳ گفته می‌شود (Michalewicz, 1996, Sivanandam, et al., 2008).

پارامترهای مهم دیگر در طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی، شامل ضریب میزان آموزش^۴ و ضریب شتاب^۵ می‌باشند. در الگوریتم پس‌انتشار، ضریب میزان آموزش برای تغییر وزن‌ها و بایاس‌ها در گرادینان منفی ضرب می‌شود. همچنین ضریب شتاب بر پایدارسازی فرآیند آموزش تاثیر می‌گذارد. اغلب محققان بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ را برای ضریب میزان آموزش و بازه ۰/۴ تا ۱ را برای ضریب شتاب پیشنهاد کرده‌اند (Lin, et al., 1992, Rajeev, et al., 1992). همچنین توابع انتقال، برای انتقال مجموع وزن‌های تمام سیگنال‌های محرک بر روی هر نرون برای تعیین شدت تحریک‌کنندگی آن حایز اهمیت هستند. دو تابع سیگموئید و خطی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Grierson, et al., 1993). با انتخاب ساختاری بهینه، شبکه طراحی شده به عنوان بهترین شبکه آموزش دیده در نظر گرفته شده و می‌توان از آن برای پیش‌بینی داده‌های ناشناخته با استفاده از رابطه بین خروجی‌ها و ورودی‌ها استفاده نمود.

۳-۴-۲- ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین بردار پشتیبان ابزاری قدرتمند بر پایه کرنل برای طبقه‌بندی و رگرسیون داده‌های

^۱ . Feed-Forward Back –Propagation (FFBP)

^۲ . Biases

^۳ . Epochs

^۴ . Learning rate coefficient

^۵ . Momentum coefficient

باینری^۱ می‌باشد (Vapnik, 1998, Christianini, et al., 2002, Vapnik, 1995, Burges, 1998). این روش قدرتمند در الگوریتم یادگیری ماشین، توسط واپنیک و همکارانش معرفی شده است (Vapnik, 1995, Vapnik, 1998). روش ماشین‌های بردار پشتیبان با افزایش ابعاد مسئله و با استفاده از نگاشت کرنل یک چهارچوب کاری یکپارچه را برای اکثر مدل‌ها فراهم می‌کنند و امکان مقایسه را به وجود می‌آورند. یعنی توسط ضرب بردارهای داخلی یک فضای n بعدی با معادلات حاکم غیرخطی تولید می‌کند. این الگوریتم سعی می‌کند که یک رابطه غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی در این فضای n بعدی پیدا کند. ماشین بردار پشتیبان دارای توابع تئوری که بر پایه حداقل نمودن خطر ساختاری بنا نهاده شده‌اند^۲ می‌باشد. و این از طرح شبکه عصبی که بر پایه‌ی اصل سنتی به حداقل رساندن خطر تجربه^۳ بنا نهاده شده‌اند بهتر می‌باشد. محاسبات SVM برای اطمینان حاصل کردن از اینکه روش حل بهینه است، مسئله را به شکل بهینه سازی محدب درجه دوم در می‌آورد. این روش مسایل ساده‌ی کاربردی، پیچیده غیرخطی و n بعدی حل می‌شوند. درجه پیچیدگی مسایل به بعد معادلات ویژگی که بهینه شده‌اند بستگی ندارد. و این روش توانایی شناسایی فوق‌العاده‌ای را دارا می‌باشد (Liu, et al., 2008).

به منظور تعمیم الگوریتم SVM برای تحلیل رگرسیونی، در فضای مقادیر هدف (y) توسط تابع کاهش حساسیت واپنیک^۴ در حاشه یک مقایسه ساخته می‌شود (Shojai, et al., 2009). (Gunn, 1998, Vapnik, 1999).

$$|y - f(x)|_{\varepsilon} := \max\{0, |y - f(x)| - \varepsilon\} \quad (3-3)$$

برای تخمین رگرسیون خطی،

$$f(x) = (w.x) + b \quad (4-3)$$

که در آن‌ها w ماتریس ضرایب، x بردار ورودی و b نیز قسمت بایاس می‌باشد. برای دقت بیشتر و به

¹. Binary

². Minimization of structural risk

³. Traditional minimization principle of experience risk

⁴. Vapnik's ε -insensitive loss function

حداقل رساندن،

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m |y - f(x)|_{\varepsilon} \quad (5-3)$$

که در آن C پارامتری برای برقرار کردن تعادل بین شناسایی (عمومیت) و خطای مربوطه مدل می-باشد. هدف بهینه رگرسیون استاندارد SVM مانند زیر فرمول بندی می شود

$$\min J(w, \xi) = \frac{1}{2} w^T w + c \sum (\xi_i + \xi_i^*) \quad (6-3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} y_i - w^T \varphi(x_i) - b &\leq \varepsilon - \xi_i, \\ w^T \varphi(x_i) + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ \xi_i^*, \xi_i &\geq 0, \quad i = 1, \dots, l \end{aligned}$$

که در آن ξ_i^* و ξ_i متغیرهای انقطاع¹ و ε دقت مورد نیاز برای تقریب می باشند. روش حل این مسئله بهینه به وسیله نقطه زینی لاگرانژین² ارائه شده است:

$$\begin{aligned} L(w, \xi^*, \xi, a, a^*, c, \beta, \beta^*) &= \frac{1}{2} w^T w + c \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^l a_i ((w^T \varphi(x_i)) - y_i + b + \varepsilon - \xi_i) \\ &- \sum_{i=1}^l a_i^* ((w^T \varphi(x_i)) - y_i + b + \varepsilon - \xi_i) - \sum_{i=1}^l (\beta \xi_i - \beta_i^* \xi_i^*) \end{aligned} \quad (7-3)$$

(با توجه به المان های w, b, ξ_i و ξ_i^* حداقل و با توجه به ضرایب لاگرانژ) از شرایط بهینه گیری داریم

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \xi_i^*} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \quad (8-3)$$

داریم که

$$w^T = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) \varphi(x_i), \quad \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) = 0, \quad c - a_i - \beta_i = 0, \quad c - a_i^* - \beta_i^* = 0, \quad i = 1, \dots, l \quad (9-3)$$

¹ . Slack variables

² . saddle point of the Lagrangian

با توجه به شرایط مرسر^۱ (Vapnik, 1999)، کرنل‌ها را تعریف می‌کنیم

$$K(x_i, x_j) = (\varphi(x_i), \varphi(x_j)) \quad (10-3)$$

توسط معادلات ((3-7، 3-9 و 3-10) مسئله بهینه را می‌توان مانند زیر بازنویسی نمود

$$\max w(a, a_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*)(a_j - a_j^*)K(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*)y_i - \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*)\varepsilon \quad (11-3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \sum (a_i - a_i^*) &= 0 \\ 0 \leq a_i &\leq c, \quad i = 1, \dots, l \\ 0 \leq a_i^* &\leq c, \quad i = 1, \dots, l \end{aligned}$$

در نهایت تابع غیرخطی مانند زیر بدست می‌آید

$$f(x) = \sum (a_i - a_i^*)K(x_i, x) + b. \quad (12-3)$$

که در آن $K(x_i, x)$ تابع ضرب داخلی کرنل^۲ که بر اساس رخداد تئوری مرسر تعریف شده

است می‌باشد (Courant, et al., 1970, Mercer, 1909) و b مقدار بایاس می‌باشد.

۳-۴-۳ پارامترهای ورودی و خروجی شبکه

برای اهداف این تحقیق، سه مجموعه داده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی آماده شده

است. این مجموعه داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به ۱۶۵۲ درزه برداشت شده از رخنمون‌های سنگی

است. برای تخمین طول درزه سه مجموعه داده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی آماده شده

است (یعنی برای هر نوع سنگ سه سری داده برداشت شده است). هر مجموعه داده‌ها به صورت

تصادفی به دو دسته داده آموزشی و آزمایشی تقسیم‌بندی شده‌اند. برای ساخت هر مدل ۷۰ درصد

داده‌ها برای آموزش و بقیه‌ی داده‌ها برای آزمایش مدل بکار برده شده‌اند. به منظور لحاظ کردن اثر

مکان برداشت در هر نوع سنگ، به مکان‌های برداشت کدهای ۱ تا ۳ داده شده است. و همچنین برای

^۱. Mercer's condition

^۲. Inner product kernel function

لحاظ نمودن فاصله‌داری، فاصله نقطه تقاطع هر درزه با خط برداشت از ابتدای خط برداشت نیز در نظر گرفته شده است. پس مکان برداشت، فاصله تقاطع با خط برداشت، بازشدگی، جهت شیب، شیب، زبری، مقاومت دیواره (واجهش چکش اشمیت) و دسته درزه به عنوان پارامترهای ورودی مدل و طول درزه نیز به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۳-۴ پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌ها نشان داده شده‌اند، همچنین در

جدول ۳-۵ نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در مدل‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳-۴- توصیف پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌ها برای تخمین طول درزه

نوع داده	پارامتر	نشانه	حداکثر	میانگین	حداقل	انحراف معیار
	مکان برداشت	SL	۳	۱/۹۳	۱	۰/۶۷
	فاصله تقاطع با خط برداشت (m)	ID	۱۵۳/۲۷	۷۴/۳۱	۰	۴۰/۲۶
	بازشدگی (mm)	A	۱۷۵	۲۸/۹۲	۰/۵	۴۱/۵۳
ورودی	جهت شیب (درجه)	DD	۳۳۷	۱۷۵/۵۷	۰	۹۵/۵
	شیب (درجه)	D	۹۰	۶۴/۷۴	۳	۲۰/۹۴
	زبری (JRC)	R	۲۰	۶/۲۰	۱	۵/۸۰
	واجهش چکش اشمیت	SR	۷۶	۵۶/۱۳	۲۰	۱۲/۶۳
	دسته درزه	JS	۵	۲/۸۷	۱	۱/۲۲
خروجی	طول درزه (m)	TL	۹/۶۷	۲/۶۴	۰/۲۵	۲/۱۹

جدول ۳-۵- نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در مدل‌ها (سنگ‌های آذرین)

مکان برداشت	فاصله تقاطع با خط برداشت (m)	دسته درزه	جهت شیب (درجه)	شیب (درجه)	زبری (JRC)	واجهش چکش اشمیت	بازشدگی (mm)	طول درزه (m)
1	0.00	4	158	64	1	46	5	0.44
1	3.25	5	313	67	1	70	1	2.17
1	10.26	4	115	67	1	44	1	0.46
1	11.80	4	173	88	11	74	0.5	1.82
1	17.75	1	17	34	1	76	52	2.98
1	36.45	5	314	76	1	52	2	2.52
1	36.55	5	314	76	3	52	1	0.65
2	6.45	4	290	52	1	66	4	1.68

5.00	16	76	9	27	180	2	10.90	2
8.25	0.5	68	1	12	15	1	15.60	2
0.80	1	68	1	26	20	1	19.35	2
5.70	7	60	3	73	185	3	23.35	2
1.74	0.5	58	1	75	305	4	30.92	2
1.08	0.5	56	1	75	335	4	31.25	2
7.05	210	42	19	81	87	2	10.35	3
4.28	160	60	16	63	108	2	12.50	3
1.75	70	36	11	80	128	2	14.80	3
0.53	25	48	3	8	210	3	15.73	3
0.98	75	50	3	34	210	3	16.05	3
1.30	45	50	11	86	176	2	16.50	3
0.48	22	30	7	72	112	2	22.32	3

۳-۴-۴- آموزش شبکه عصبی جهت تخمین طول درزه

آموزش شبکه عصبی به انتخاب بهترین پارامترهای شبکه مانند تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های مربوط به آن‌ها، نوع تابع محرک (تابع انتقال)، میزان ضریب آموزش و ضریب شتاب بستگی دارد. برای رسیدن به این هدف باید از فرآیند تغییر (سعی و خطا) به نحوی که ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) به کمترین مقدار خود برسد، استفاده نمود. شبکه‌ایی که کمترین مقدار RMSE و بالاترین مقدار ضریب تعیین (R^2) را داشته باشد به عنوان بهترین شبکه آموزش داده شده جهت تخمین طول درزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار RMSE از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_P - T_M)^2} \quad (۱۳-۳)$$

که در آن T_P ، T_T و n به ترتیب اُمین المان اندازه‌گیری شده، اُمین المان تخمین زده شده و تعداد داده‌ها می‌باشند.

برای شناسایی بهتر رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در شبکه عصبی، نرمالایز کردن داده‌های ورودی و خروجی در بازه $[0, 1]$ و یا $[-1, 1]$ ، مهم می‌باشد. برای نرمالایز کردن در بازه $[0, 1]$ ، از رابطه

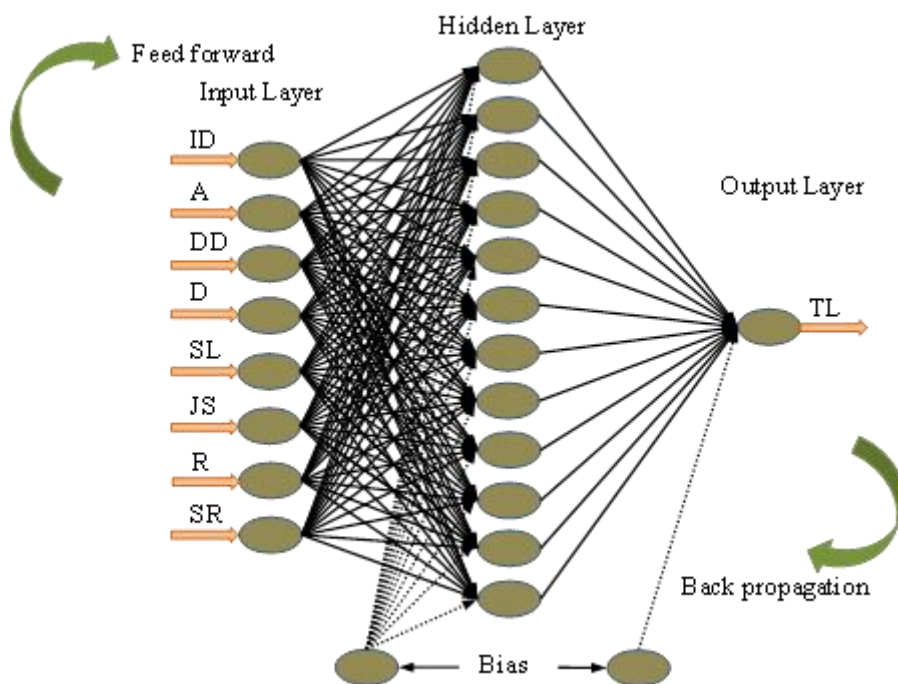
^۱ . Root Mean Square Error (RMSE)

زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Normalized value} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (14-3)$$

که در آن X مقدار واقعی، X_{\min} کمترین مقدار واقعی و X_{\max} بیشترین مقدار واقعی می‌باشد.

همانطور که گفته شد، پارامترهای شبکه توسط سعی و خطا تعیین می‌شوند. در این تحقیق، از شبکه پیش-خورد پس-انتشار با یک لایه پنهان ۱۲ نرونی و تابع تحریک لاگ-سیگموئید^۱ در لایه پنهان و تابع تحریک خط راست^۲ در لایه خروجی، ضریب میزان آموزش برابر ۰/۱ و ضریب شتاب برابر ۰/۷، بهترین شبکه آموزش داده شده است. ساختار شبکه آموزش داده شده در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- ساختار شبکه عصبی بهینه

شبکه بهینه بر روی داده‌های آزمایش طول درزه کار گذاشته شده است. کارایی شبکه توسط

¹ . Log-sigmoid transfer function
² . Pure line transfer function

RMSE و R^2 برای فرآیند آزمایش کنترل شده است. بهترین نتیجه حاصل از این شبکه مربوط به سنگ‌های آذرین بوده و نتایج نهایی نشان می‌دهد که شبکه قادر به تخمین طول درزه در رخنمون-های سنگی آذرین با R^2 برابر ۰/۸۶۶۷ و RMSE برابر ۱/۹۳ می‌باشد.

۳-۴-۵- آموزش SVM برای تخمین طول درزه

همانطور که قبلاً ذکر شد، مانند دیگر مدل‌های چند متغیره آماری، کارایی SVM برای رگرسیون به ترکیب پارامترهای مختلف بستگی دارد. این پارامترها شامل پارامتر ظرفیت C، مقدار تابع کاهش شدت حساسیت ϵ ، نوع تابع کرنل K و پارامترهای مرتبط به آن بستگی دارد. وانگ نشان داده است که مقدار C در خطای تخمین تاثیر آنچنانی ندارد (Wang, et al., 2003). باید برای پایدار سازی فرآیند آموزش، مقدار زیادی برای C در نظر گرفته شود (برای مثال $C=100$). احتمال انتخاب زیادی برای تابع کرنل وجود دارد که شامل تابع خطی، چند جمله‌ای، سیگموئید، چندقطعه‌ای^۱ و تابع پایه‌شعاعی گاوس^۲ (RBF) می‌باشند. در این تحقیق تابع کرنل پایه‌شعاعی گاوس به عنوان تابع کرنل استفاده شده است زیرا تحت مفروضات عمومی، بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. همچنین گزارشات محققان دیگر نیز حاکی از این است که این تابع کارایی بهتری دارد (Han, et al., 2004). شکل کلی این تابع به صورت زیر نشان داده شده است (Dibike, et al., 2001).

$$K(x, x_i) = \exp(-(\|x - x_i\|^2) / 2\sigma^2) \quad (۱۵-۳)$$

که σ عرض تابع کرنل RBF می‌باشد.

آموزش مدل SVM به بهترین انتخاب پارامترهای تابع کرنل و پارامترهای مدل مانند σ ، ϵ و C بستگی دارد. برای رسیدن به این هدف، باید از فرآیند متغیر تا رسیدن RMSE به کمترین مقدار خود استفاده شود. مدلی که کمترین مقدار RMSE و بالاترین مقدار ضریب تعیین R^2 را دارا بوده جهت تخمین طول درزه در این تحقیق استفاده شده است.

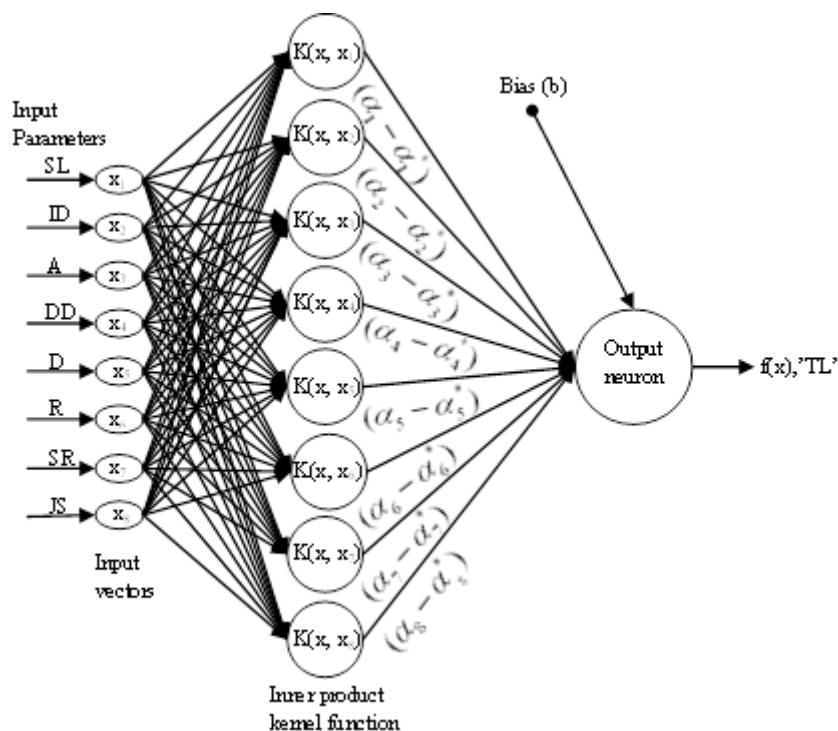
^۱ . Splines Function

^۲ . Gaussian radial basis function (RBF)

جهت بالا بردن قدرت شناسایی مدل برای تعیین رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی، داده بایستی نرمالایز شوند (Mercer, 1909). نرمالایز کردن در بازه $[-1, 1]$ از رابطه زیر بدست آمده است:

$$X = 2 * \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} - 1 \quad (16-3)$$

که در آن X مقدار واقعی، X_{\min} کمترین مقدار واقعی و X_{\max} بیشترین مقدار واقعی طول درزه می-باشد. در نهایت با مقادیر R^2 به ترتیب $0/9607$ ، $0/9418$ و $0/9577$ و مقادیر RMSE، $0/7949$ ، $0/9414$ و $0/8119$ برای سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی بهترین مدل‌ها آماده شده است. شکل ۳-۳ ساختار مدل SVM بکار برده شده برای تخمین طول درزه را نشان می‌دهد. که این نتایج نشان می‌دهند که کارایی ماشین بردار پشتیبان از شبکه عصبی در تخمین طول درزه بیشتر می‌باشد. به همین دلیل در تحقیق از نتایج ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است.



شکل ۳-۳- ساختار مدل SVM بکار برده شده برای تخمین طول درزه

۳-۴-۶- تخمین اندازه طول درزه با استفاده از شبکه‌های آموزش داده شده

در نهایت با بکارگیری مدل‌های آموزش داده شده SVM برای هر سه نوع سنگ، طول درزه-هایی که کاملاً مشخص نیستند تخمین زده شده و میانگین آن‌ها دوباره محاسبه شده است و با میانگین مشاهده شده مقایسه شده است (جدول ۳-۶).

جدول ۳-۶- خلاصه‌ی درزه‌های برداشتی از نه رخنمون در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی

نوع سنگ	سایت	تعداد درزه‌ها	تعداد دسته درزه‌ها	نوع پایانه درزه‌ها			میانگین طول درزه‌ها	
				R ₀	R ₁	R ₂	مشاهده شده	تخمین زده شده با SVM
آذرین	SI1	۱۹۵	۵	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۶۷	۲/۵۹	۳/۸۲
	SI2	۲۰۱	۴	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۵۷	۲/۲۴	۳/۲۸
	SI3	۱۶۰	۳	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۶۹	۵/۱۵	۵/۵۸
دگرگونی	SM1	۱۶۵	۳	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۴۳	۷/۵۹	۸/۰۲
	SM2	۲۱۰	۳	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۴۲	۵/۰۹	۷/۱۵
	SM3	۱۴۳	۴	۰/۳۴	۰/۱۰	۰/۵۶	۲/۹۶	۳/۰۸
رسوبی	SS1	۱۷۳	۴	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۵۶	۳/۳۷	۳/۶۳
	SS2	۲۲۴	۳	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۵۲	۱/۱۳	۲/۲۱
	SS3	۱۸۱	۴	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۶۲	۲/۴۵	۳/۵۱

با توجه به جدول ۳-۶، توجه به تفاوت مقادیر میانگین طول درزه مشاهده شده و تخمین زده شده توسط مدل‌های SVM حائز اهمیت می‌باشد. در مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان دید که اگر بیشتر درزه‌های رخنمون سنگی پوشانده شده باشند، میانگین طول درزه مشاهده شده نمی‌تواند میانگین طول درزه را در رخنمون به خوبی نشان دهد. این نتایج به روشنی نشانگر آن است که استفاده از مدل‌های تخمین‌گر مانند SVM برای پی بردن به مقادیر واقعی‌تر میانگین طول درزه ضروری است.

۳-۵- برآورد تابع توزیع طول درزه

با توجه به نتایج به دست آمده از قسمت‌های قبلی، به روشنی می‌توان دید که استفاده از مدل‌های تخمین‌گر مانند SVM برای پی بردن به مقادیر واقعی‌تر میانگین طول درزه و یا بدست آوردن تابع توزیع طول درزه با استفاده از برازش بهترین تابع بر روی داده‌های جمع‌آوری شده، ضروری است.

آزمون‌های بهترین برازش^۱ (GOF) برای آزمودن این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) پیروی می‌کنند یا خیر، طراحی شده است. آزمون شامل ارزیابی تابع داده‌ها، آمار GOF، و بررسی این نتایج با استفاده از توزیع چگالی احتمال آمار با فرض صادق بودن فرضیه می‌باشد. استفاده از آزمون‌های بهترین برازش در مواقعی که تعداد بعدها بیشتر از یک و داده‌ها پیوسته بوده، مفید واقع می‌شود (Hameren, 2006). تفاوت میان داده‌های برداشت شده و شکل تئوری توابع می‌تواند منشاءهای متفاوتی داشته باشد. ممکن است تئوری مسئله غلط باشد و یا اینکه به دلیل خطای اندازه‌گیری داده‌ها و یا آلودگی پس‌زمینه^۳، در آن‌ها بایاس رخ داده باشد. که در طبیعت با مورد آخر روبرو هستیم.

آزمون‌های بهترین برازش سازگاری نمونه‌ی تصادفی را با توابع چگالی احتمال تئوری اندازه-گیری می‌کنند. به عبارت دیگر، این آزمون‌ها بهترین توزیعی که بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌شود را نشان می‌دهند. در این تحقیق از آزمون‌های بهترین برازش کولموگروف-اسمینوروف^۴، آندرسون-دارلینگ^۵ و کای-سکویر^۶ برای ارزیابی تابع چگالی احتمال طول درزه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط SVM استفاده شده است.

¹ . Goodness-of-fit (GOF) tests
² . probability density function (PDF)
³ . Background contamination
⁴ . Kolmogorov-Smirnov test
⁵ . Anderson-Darling test
⁶ . Chi-Squared test

آزمون کولموگروف-اسمینوروف برای تشخیص فرضیه توزیع پیوسته بکار برده می‌شود. این آزمون بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی^۱ (ECDF) بنا نهاده شده است. نمونه‌های تصادفی x_1, x_2, \dots, x_n را توزیعی با تابع توزیع تجمعی $F(x)$ در نظر بگیرید. تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از رابطه زیر نشان داده شده است

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \cdot [\text{Number of observation} \leq x] \quad (17-3)$$

آماره کولموگروف-اسمینوروف^۲ (D) بر اساس بزرگترین اختلاف بین تابع توزیع تجمعی تئوری و تجربی بدست می‌آید.

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (18-3)$$

آزمون آندرسون-دارلینگ برآزش تابع توزیع تجمعی مشاهده شده را با تابع توزیع تجمعی مورد نظر مقایسه می‌کند. این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف-اسمینوروف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می‌دهد. آماره آندرسون-دارلینگ^۳ (A^2) مانند زیر تعریف شده است

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (19-3)$$

آزمون کای-سکویر برای آزمودن جامعه که از کدام توزیع پیروی می‌کند مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمون بر روی داده‌های دسته بندی شده^۴ اعمال می‌شود، پس مقدار آماره آزمون به چگونگی دسته‌بندی بستگی دارد. آماره کای-سکویر^۵ (χ^2) مطابق زیر تعریف شده است

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (20-3)$$

که در آن O_i فراوانی مشاهده شده دسته i ، و E_i فراوانی مورد انتظار بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود

¹ . Empirical Cumulative Distribution Function

² . The Kolmogorov-Smirnov statistic (D)

³ . The Anderson-Darling statistic (A^2)

⁴ . binned data

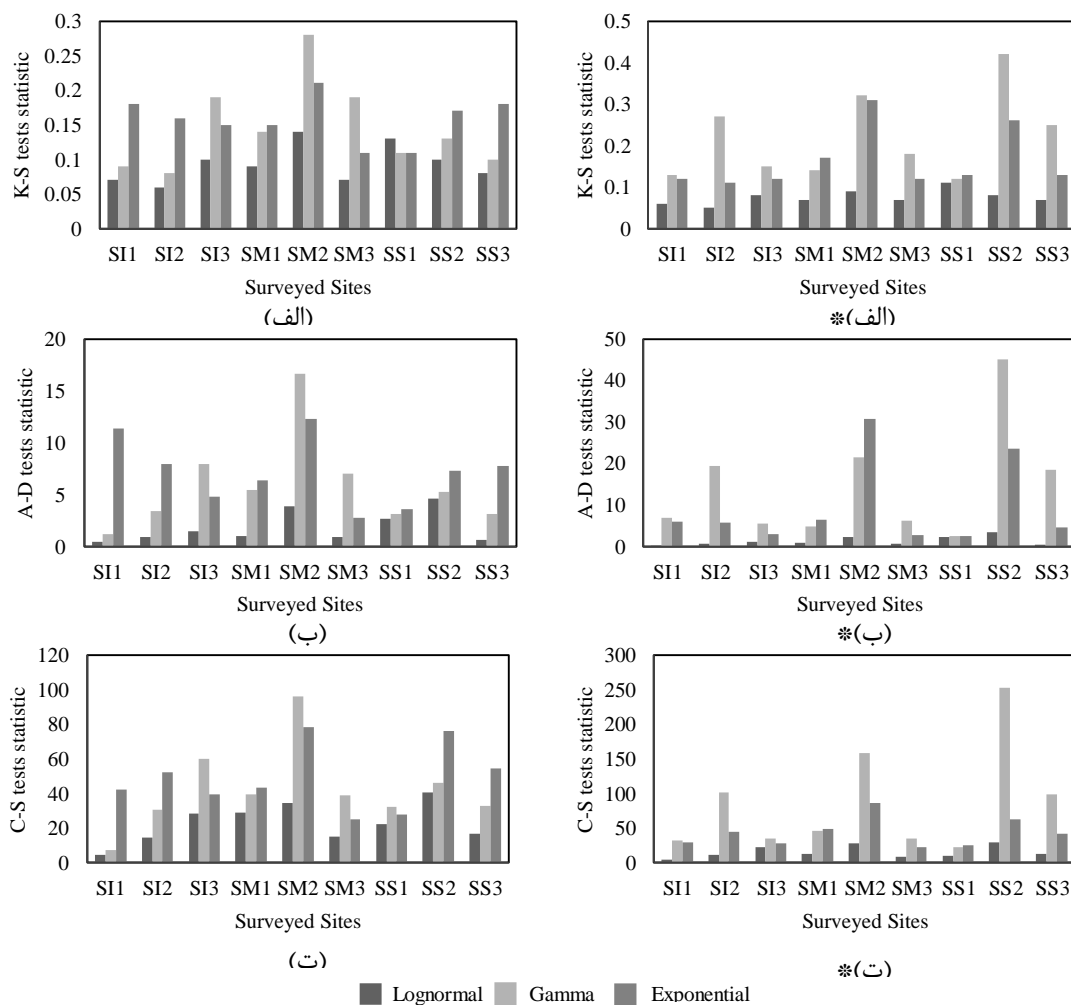
⁵ . The Chi-Squared statistic

$$E_i = F(x_2) - F(x_1), \quad (21-3)$$

که در آن $F(x)$ تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال تحت آزمون، x_1 و x_2 ، کران‌های دسته می‌باشند (D'Agostino, et al., 1986).

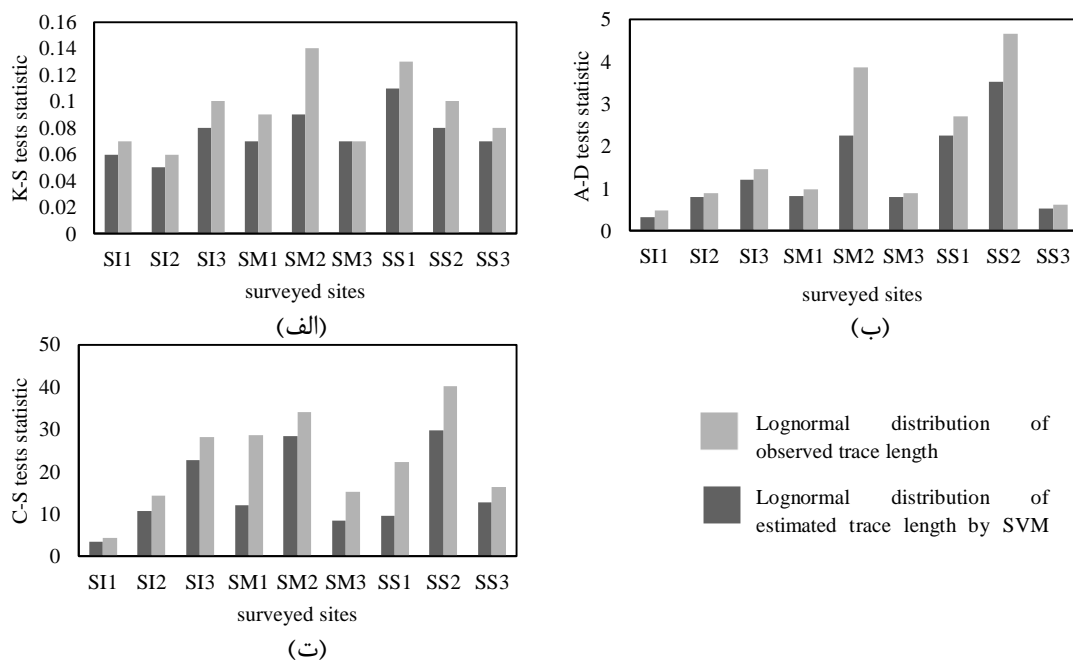
در سطح اعتماد مشخص (α) اگر مقدار آماره آزمون‌های کولموگروف-اسمینوروف (D)، آندرسون-دارلینگ (A^2) و کای-سکویر (χ^2) از مقدار بحرانی آن‌ها بیشتر باشد، فرضیه شکل توزیع رد خواهد شد. از مقادیر α برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۵، معمولاً برای ارزیابی فرض تهی^۱ (H_0) در سطح اعتمادهای مختلف استفاده می‌شود. در اغلب موارد مقدار α برابر ۰/۰۵ استفاده می‌شود در این تحقیق نیز از همین مقدار استفاده شده است. به دلیل گزارشات محققان قبلی، در این تحقیق آزمون-های بهترین برازش برای توابع توزیع گاما، نمایی و لاگ‌نرمال به طور جداگانه انجام شده است. گزارش مقایسه‌ای نتایج آزمون‌های بهترین برازش برای تمام داده‌های برداشت شده طول درزه در نه رخنمون سنگی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

^۱ . null hypothesis (H0)



شکل ۳-۴- گزارش مقایسه‌ای نتایج آزمون‌های بهترین برازش: (الف) آماره آزمون کولموگروف-اسمینوروف، (ب) آماره آزمون آندرسون-دارلینگ و (ت) آماره آزمون کای-سکویر (علامت * تخمین طول توسط SVM را نشان می‌دهد)

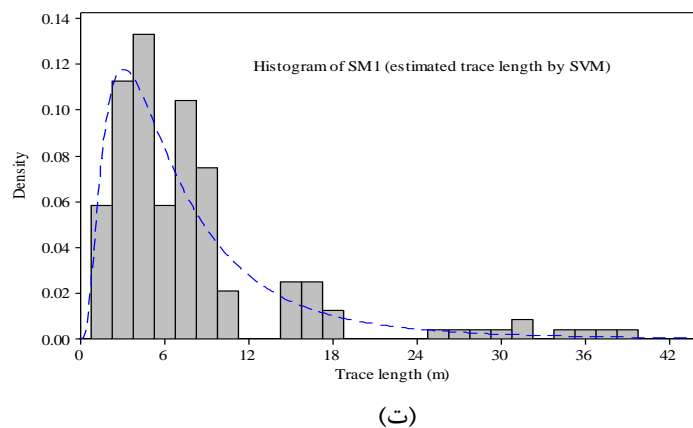
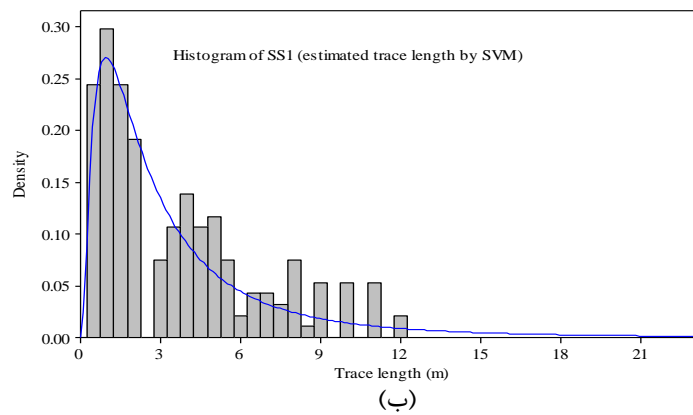
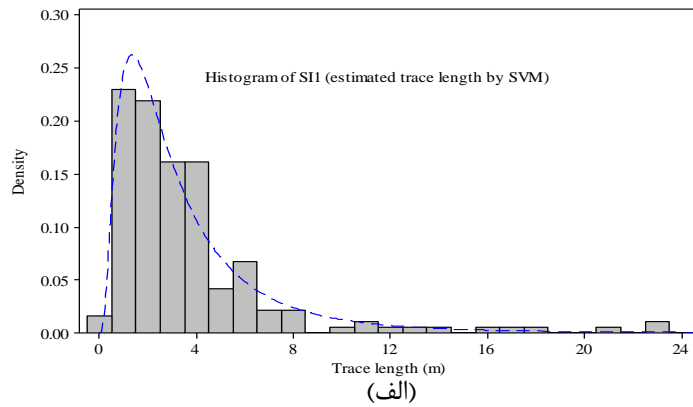
بر طبق آماره‌های آزمون‌های بهترین برازش، تابع توزیع لاگ‌نرمال بیشترین سازگاری را برای توزیع طول درزه از خود نشان داده است. همانطور که در شکل ۳-۵ دیده می‌شود توجه به تفاوت مقادیر آماره آزمون‌های بهترین برازش طول درزه‌های مشاهده شده و تخمین زده شده با مدل‌های SVM حائز اهمیت می‌باشد.



شکل ۳-۵- گزارش مقادیر آماره آزمون‌های بهترین برازش طول درزه‌های مشاهده شده و تخمین زده شده با مدل‌های SVM: (الف) آماره آزمون کولموگروف-اسمینوروف، (ب) آماره آزمون آندرسون-دارلینگ و (ت) آماره آزمون کای-سکویر

سکویر

با مقایسه نتایج مقادیر آماره آزمون‌های بهترین برازش برای تمام طول درزه‌های برداشتی رخنمون‌های سنگی، می‌توان دید که این مقادیر برای طول درزه‌های تخمینی نسبت به طول درزه‌های مشاهده شده برای تابع توزیع لاگ‌نرمال کمتر است. پس می‌توان گفت که اگر بیشتر درزه‌های برداشت شده کسری از طول آن‌ها پنهان شده باشد، نمی‌توان با برازش تابع توزیع بر آن‌ها تابع توزیع مربوطه را یافت. و این نشان دهنده آن است که در چنین مواقعی استفاده از ابزارهای تخمین‌گر مانند SVM ضروری می‌باشد. در ادامه در شکل ۳-۶ سه نمونه از تابع توزیع لاگ‌نرمال طول درزه نتیجه شده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این موارد طول درزه‌های پوشانده شده توسط مدل‌های SVM تخمین زده شده است.



شکل ۳-۶- سه نمونه از تابع توزیع لاگ-نرمال طول درزه نتیجه شده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی (الف) SI1

رخنمون سنگ‌های آذرین سرشیبو (ب) SM1 رخنمون سنگ‌های دگرگونی سرشیبو و (ت) SS1 رخنمون سنگ‌های

رسوبی معدن تزره

در نهایت می‌توان گفت که نتایج آزمون‌های بهترین برازش، سازگاری تابع توزیع تئوری لاگ-

نرمال را برای تابع توزیع طول درزه تایید می‌کنند، که شکل کلی این تابع به صورت زیر بیان شده

است

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (22-3)$$

که در آن μ مقدار میانگین و σ انحراف معیار استاندارد می‌باشد (Harr, 1977).

۳-۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

با توجه به اهداف تحقیق باید تابع توزیع طول درزه در سنگ‌ها تعیین گردد، در این تحقیق، برای هر یک از سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی در سه مکان درزه‌نگاری انجام شده است. طول درزه قابل مشاهده شده بر روی رخنمون‌ها، به اندازه و بایاس‌های سنسورینگ و ترانکیشن بستگی دارد. تاثیر بایاس ترانکیشن را با کاهش سطح ترانکیشن در موقع برداشت درزه، می‌توان کاهش داد. در این تحقیق طول ۰/۱ متر برای حد ترانکیشن انتخاب شده است. رخنمون‌های سنگی انتخاب شده نیز دارای اندازه نسبتاً بزرگ در برابر اندازه درزه‌های موجود می‌باشند، پس بایاس‌های ترانکیشن و اندازه مد نظر قرار نمی‌گیرند. با این حال، جهت حذف اثر بایاس سنسورینگ، از مدل‌های تخمین‌گر شبکه‌های عصبی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای تخمین طول درزه‌هایی که طول آن‌ها بطور کامل مشاهده نمی‌شود، استفاده شده است. در نهایت با استفاده از آزمون‌های بهترین برآزش کولموگروف-اسمینوروف، آندرسون-دارلینگ و کای-سکویر جهت ارزیابی تابع چگالی احتمال طول درزه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط SVM استفاده شده است. در نهایت با توجه به نتایج این آزمون‌ها، تابع توزیع لاگ‌نرمال بیشترین سازگاری را برای توزیع طول درزه از خود نشان داده است.

۴- فصل چهارم

ساخت مدل در نرم افزار UDEC

روش اجزای مجزا، یک روش عددی است که معمولاً به منظور تحلیل رفتار سیستم‌های ناپیوسته بکار می‌رود، این روش، به منظور بررسی رفتار تغییر شکل پذیری منفصل در سنگ‌های درزه-دار توسعه داده شده است. توانایی بی‌نظیر روش اجزای مجزا این است که توده‌سنگ بصورت مجموعه-ایی از بلوک‌های مجزا که به وسیله درزه‌ها تفکیک شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و در این روش امکان ایجاد تغییر شکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد (Itasca, 1992).

با توجه به ماهیت ناپیوسته محیط‌های سنگی، روش اجزاء مجزا به طور روزافزونی به منظور ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ بکار برده می‌شود. در این روش توده‌سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تاثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌های دیگر قابل بررسی است (Zhu, et al., 2003). روش اجزاء مجزا تفاوت چندانی نسبت به روش‌های عددی دیگر ندارد و تفاوت اصلی آن با سایر روش‌های عددی در این است که در این روش کل هندسه مدل و المان‌ها توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود (Sharma, et al., 1999).

فرمول‌سازی و توسعه روش اجزای مجزا نخستین بار توسط کندال (Cundall, 1971) آغاز شد و روند تکامل آن طی چند دهه اخیر ادامه یافته است (Cheng, 1998). یکی از نرم‌افزارهایی که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل می‌پردازد، تحت عنوان UDEC شناخته شده است و در سال ۱۹۸۰ توسط کندال به ثبوت رسیده است. توسعه بیشتر UDEC توسط کندال در سال ۱۹۸۵ انجام شد و قابلیت‌های آن را افزایش داد (Itasca, 1992).

۱-۱-۴ - اصول روش اجزا مجزا

روش اجزاء مجزا یک روش مدل‌سازی ناپیوسته به منظور شبیه‌سازی محیط‌های سنگی درزه‌دار تحت شرایط استاتیک، شبه استاتیک و دینامیک می‌باشد.

نکته برجسته و قابل توجه روش اجزاء مجزا را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- قابلیت شبیه‌سازی محیط ناپیوسته به صورت بلوک‌هایی در کنار هم چیده شده که از طریق تماس با یکدیگر درهم‌کنش دارند.
- ناپیوستگی‌ها بعنوان مرز درهم‌کنش بین بلوک‌ها تلقی می‌شوند که برای تعریف و نشان دادن رفتار آن‌ها مدل‌های رفتاری مربوط به ناپیوستگی‌ها وجود دارد.
- روش کار مطابق الگوریتم حل صریح وابسته به زمان می‌باشد.
- توده‌سنگ از بلوک‌هایی تشکیل می‌شود که نمی‌توانند نسبت به یکدیگر جابجایی و چرخش - های بزرگ انجام دهند. روش اجزاء مجزا بر پایه فرآیند حل صریح¹ بنا نهاده شده است که فرآیندهای وابسته به زمان می‌باشد و روش حل صریح بر این پایه استوار است که در یک زمان محدود، اطلاعات مربوط به سیستم بلوک‌ها توسعه داده می‌شوند. زمان انجام محاسبات در هر حلقه محاسباتی، توسط یک پله زمانی تعریف می‌شود.

نکته قابل توجه این است که هر پله زمانی باید به قدر کافی کوچک باشد به نحوی که انتقال اطلاعات از یک بلوک به بلوک‌های مجاور از نظر فیزیکی مقدور نباشد. به عبارت دیگر در طی محاسبات مربوط به یک پله زمانی شرایط باید به گونه‌ای باشد که بتوان سرعت موجود را ثابت فرض نمود. هر چند که پس از محاسبات چندین حلقه در طول اجزای بلوک، می‌تواند اغتشاش‌هایی منتشر شود و آنچه را که از نظر فیزیکی امکان وقوع دارد شبیه‌سازی نماید (Dagic, 2002).

در این روش المان‌های بلوک سنگ به صورت متصل و یا در تاثیر متقابل با یکدیگر (بواسطه سطوح دنده‌ها) در نظر گرفته می‌شوند. رفتار غیرخطی و ناهمسانگرد توده‌سنگ می‌تواند مستقیماً و به آسانی بوسیله حرکت یا چرخش بلوک نشان داده شود. تماس گوشه‌ها و لبه‌های بین بلوک‌های سنگ با یکدیگر سبب افزایش جابجایی قائم (ΔV_n) و جابجایی مماسی (ΔV_s) می‌شود.

¹.Explicit Solution Method

اگر سختی نرمال، K_n ، و سختی برشی برابر با K_s باشد، برای هر اتصال مشخص، افزایش در مقدار تنش نرمال ($\Delta\sigma_n$) و تنش برشی ($\Delta\sigma_s$) می‌تواند از رابطه ساده زیر بدست آید:

$$\Delta\sigma_n = K_n \Delta V_n \quad (1-4)$$

$$\Delta\sigma_s = K_s \Delta V_s \quad (2-4)$$

معادلات فیرهارست^۱ در مورد مقایسه روش اجزاء محدود در آنالیز پایداری فضاهای زیرزمینی در سنگ‌های درزه‌دار نشان می‌دهد که درجه تشابه بین این دو روش رابطه مستقیم با سختی نرمال و برشی درزه‌ها (K_s ، K_n) دارد. هر چه سختی درزه‌ها کمتر باشد، تفاوت دو روش بیشتر می‌شود و سختی بالای درزه‌ها منجر به نتایج تقریباً مشابه در دو روش می‌شود (Fairhurst, et al., 1990).

۴-۱-۲- نرم‌افزار UDEC

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دو بعدی است که به زبان برنامه‌نویسی فترن ۷۷ نوشته شده است. این نرم‌افزار از اصول اجزاء مجزا تبعیت می‌کند و بر اساس روش حل صریح وابسته به زمان محیط‌های ناپیوسته را تحلیل می‌نماید. در ضمن، این نرم‌افزار می‌تواند هر بلوک را به صورت صلب یا تغییرشکل‌پذیر در نظر بگیرد (Itasca, 1992).

نرم‌افزار UDEC کارآیی بالایی از نظر دنبال نمودن روند رفتارهای خطی و یا غیرخطی بلوک-های سنگی و ناپیوستگی‌ها دارد و از نظر تلفیق مسائل هیدرولیکی یا حرارتی با مسائل مکانیک سنگ قابلیت بسیار بالایی دارد. برخی از قابلیت‌های ویژه این نرم‌افزار را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد (Ferror, et al., 2004, Itasca, 1992).

- اعمال ساختارهای مختلف ناپیوستگی (لایه‌بندی، درزه، گسل و ...) به صورت مختلف و نسبت دادن مدل‌های رفتاری مختلف به هر یک از آن‌ها.
- نسبت دادن مدل‌های رفتاری مختلف سنگ بکر به بلوک‌های مجزا و همچنین قابلیت تحلیل

¹.Fairhurst

مسائل در محدوده‌های رفتاری الاستیک و پلاستیک

- در نظر گرفتن مواد مختلف با خواص متفاوت در مدل
- مدل کردن سیالات و جریان آن از میان درزه‌ها
- مدل کردن جریان گرمایی زودگذر و تنش‌های القایی - حرارتی ناشی از آن
- اعمال شرایط اولیه و مرزی متنوع و پیچیده در تحلیل استاتیکی و دینامیکی
- قابلیت پیدا نمودن اشتباهات و خطاهای دستوری در زمان مدل‌سازی
- خروجی‌های متنوع برنامه قابلیت تحلیل را آسان می‌کند.

۳-۱-۴ پارامترهای مورد نیاز نرم‌افزار UDEC

این نرم‌افزار پارامترهای سنگ بکر و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها را بر اساس مدل‌های رفتاری اختصاص یافته به آن‌ها نسبت می‌دهد، مهمترین پارامترهای مورد استفاده در این نرم‌افزار عبارتند از (Itasca, 1992):

- وزن مخصوص یا چگالی سنگ بکر
- خواص تغییرشکل‌پذیری سنگ بکر شامل مدول بالک و مدول برشی. مقادیر پارامترهای فوق‌الذکر را از طریق زیر می‌توان تعیین نمود

$$K = \frac{E}{3(1-\nu)} \quad (3-4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+2\nu)} \quad (4-4)$$

که در آن‌ها E مدول الاستیک و ν ضریب پواسون می‌باشد.

- خواص مقاومتی سنگ بکر شامل چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مقاومت کششی (T).
- خواص مربوط به ناپیوستگی‌ها مانند شیب، فاصله‌داری، تداوم، جدایش، زاویه اصطکاک و چسبندگی سطح درزه، زاویه اتساع، مقاومت کششی، سختی نرمال و برشی ناپیوستگی.

۴-۱-۴ - مدل‌های رفتاری بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها

در نرم‌افزار UDEC، به منظور تعریف رفتار بلوک‌ها از هفت مدل رفتاری با خصوصیات مختلف استفاده می‌شود که مدل‌های مذکور عبارتند از: مدل تهی^۱، مدل الاستیک - ایزوتروپ، مدل پلاستیک دراگر - پراگر، مدل پلاستیک موهر - کلمب، مدل درزه‌های قفل شونده^۲، مدل الاستیوپلاستیک با کرنش سخت شونده^۳، مدل تسلیم دوگانه^۴.

همچنین در UDEC برای تعریف ناپیوستگی‌ها پنج مدل رفتاری وجود دارد که این مدل‌ها عبارتند از: مدل تماس نقطه‌ای لغزش کلمب^۵، مدل تماس سطحی لغزش کلمب^۶، مدل تماس سطحی لغزش کلمب با در نظر گرفتن جابجایی - سست شدگی^۷، مدل تسلیم شدگی پیوسته^۸، مدل درزه بارتن - بندیس.

۴-۱-۵ - مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار UDEC

در قدم اول مدل‌سازی، سه مرحله اساسی باید مورد توجه قرار گیرد (Itasca, 1992):

(۱) تهیه بلوک کلی مدل و تعریف هندسه‌ی مساله

(۲) نسبت دادن مدل‌های رفتاری و خواص مرتبط با آن به مواد مدل

(۳) اعمال شرایط مرزی و اولیه

پس از اتمام مراحل فوق‌الذکر، رفتار مدل بررسی می‌شود. در این مرحله تعادل مدل قبل از انجام حفر فضای زیرزمینی بررسی می‌شود. در این مرحله فضای زیرزمینی حفر می‌شود و سپس واکنش مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتیکه تحلیل دینامیکی مد نظر باشد، بارگذاری

¹. Null Model

². Ubiquitous Joint Model

³. Strain-Hardening/Softening

⁴. Double-Yield Model

⁵. Point Contact-Coulomb Slip Model

⁶. Joint Area Contact-Coulomb Model

⁷. Displacement-Wakening

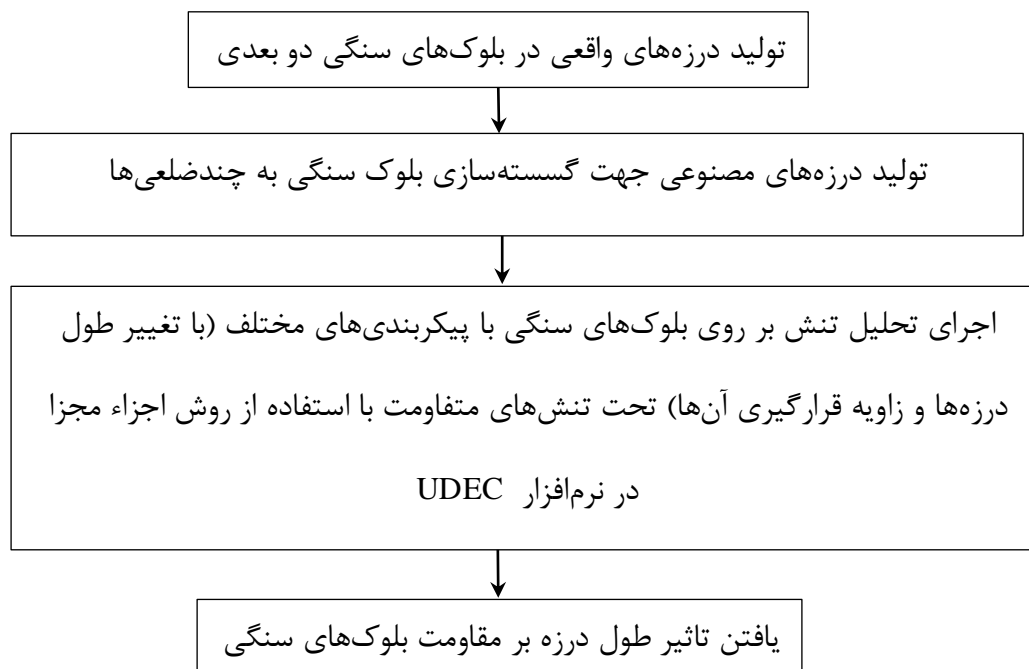
⁸. Continuously-Yielding Model

دینامیکی را می‌توان به مراحل فوق اضافه نمود. یکی از بزرگترین قابلیت‌های این نرم‌افزار تنوع خروجی‌های برنامه می‌باشد. در نرم‌افزار این قابلیت ایجاد شده است که در هر لحظه بتوان نتایج را به صورت خروجی نمایش داد.

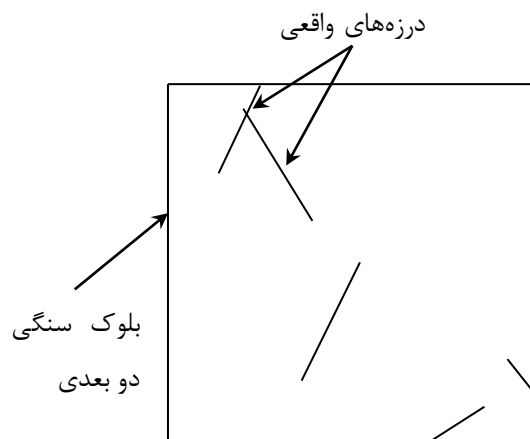
۲-۴- ساختار بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ درزه‌دار

ساختار بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ درزه‌دار و یافتن ویژگی‌های احتمالی المان حجم معرف توده سنگ درزه‌دار در

شکل ۱-۴ نشان داده شده است. گام اول تولید درزه‌های واقعی در دو بعد می‌باشد. تولید پنج درزه واقعی در شکل ۲-۴ نشان داده شده‌اند.



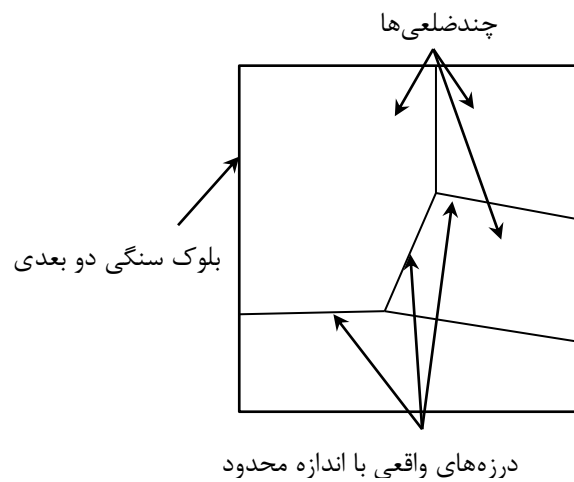
شکل ۱-۴- ساختار بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ درزه‌دار و یافتن ویژگی‌های احتمالی المان حجم معرف توده سنگ درزه‌دار



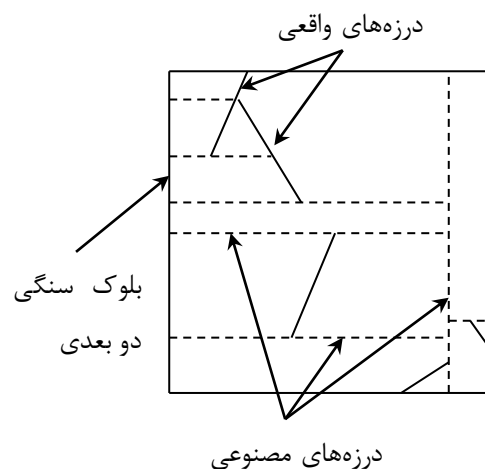
شکل ۴-۲- شبکه درزه‌های محدود که بلوک دو بعدی را به چند ضلعی گسسته نمی‌کند

برای تحلیل تنش توسط روش اجزای مجزا، لازم است که محیط مورد بررسی به چندضلعی-هایی گسسته‌سازی شود. هنگامی که بلوک سنگی فقط شامل ناپیوستگی‌های مداوم باشد، چندضلعی-ها به صورت خودکار ساخته می‌شوند. در شرایط واقعی، ناپیوستگی‌های فرعی مانند درزه‌ها، ترک‌ها، صفحات لایه‌بندی و غیره دارای طول محدود هستند. همانطور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، اگر این درزه‌های محدود یکدیگر را قطع کنند، ممکن است که چندضلعی‌ها تشکیل شوند. در حالت طبیعی تشکیل چنین حالتی نادر می‌باشد. بنابراین، در گام بعدی لازم است که درزه‌های مصنوعی تولید شوند، پس با اتصال این درزه‌های مصنوعی به درزه‌های واقعی با اندازه محدود، حوزه مسئله به چندضلعی‌هایی گسسته‌سازی می‌شود (شکل ۴-۴). این بلوک‌های تولید شده آماده اجرای تحلیل‌های تنش توسط کد روش اجزاء مجزا بر روی آن‌ها می‌باشند. سپس از نتایج این تحلیل‌ها می‌توان به اثر طول درزه بر مقاومت توده‌سنگ پی برد و می‌توان ویژگی‌های ممکن REV را یافت. با این حال، دانستن ویژگی‌های مواد سازنده سنگ بکر، درزه‌های واقعی و مصنوعی برای اجرای تحلیل تنش ضروری خواهد بود. با استفاده از انجام آزمایش‌های مقاومتی و تغییرشکل بر روی سنگ بکر و درزه-های واقعی می‌توان ویژگی‌های مواد سازنده سنگ بکر و درزه‌های واقعی را تخمین زد. با این حال، در ارتباط با درزه‌های مصنوعی، جهت شبیه‌سازی رفتار مواد سنگ بکر نیازمند تعیین مقدار معرف برای ویژگی‌های مکانیکی درزه‌های مصنوعی هستیم. قبل از اینکه به گام اصلی تحلیل پردازیم لازم است

که این گام را انجام داد.



شکل ۳-۴- تشکیل چندضلعی‌ها در بلوک سنگی دو بعدی تنها با شبکه‌ای از درزه‌هایی با اندازه محدود



شکل ۴-۴- وارد نمودن درزه‌های مصنوعی به شبکه درزه نشان داده شده در شکل ۲-۴ برای گسسته‌سازی بلوک سنگی به چند ضلعی

۳-۴- تولید دو بعدی پارامترهای هندسی درزه

در این تحقیق، برای تولید پارامترهای هندسی درزه‌ها از نرم‌افزار MINITAB استفاده شده

است. پارامترهای تولید شده درزه توسط این نرم‌افزار شامل:

(۱) موقعیت مرکز درزه‌ها و

(۲) طول درزه‌ها.

هنگامی که توزیع آماری پارامترهای هندسی درزه مشخص باشد، می‌توان نمونه‌ای از آن جامعه را توسط شبیه‌سازی آماری (در بخش ۴-۴-) تولید کرد. پس، هر دزه واقعی در دو بعد را می‌توان با تعریف موقعیت مرکز آن، جهت‌داری و طول آن تولید نمود. از سوی دیگر، می‌توان برای تولید درزه از مقادیر قطعی برای هر پارامتر هندسی درزه استفاده نمود. بنابراین، کد تولید درزه شامل دو گزینه می‌باشد:

(۱) احتمالی

(۲) قطعی

در ادامه چگونگی تولید انتخاب موقعیت، جهت‌داری و طول درزه توصیف شده است.

۴-۴- تولید هندسه دو بعدی درزه‌های واقعی

در این تحقیق جهت تولید هندسه دوبعدی درزه‌های واقعی از نرم‌افزار MINITAB استفاده شده است. برای انجام این امر، اندازه بلوک سنگی را به صورت قطعی و با سطحی معادل یک متر مربع در نظر گرفته شده است، سپس در داخل بلوک، موقعیت مرکز درزه‌های واقعی تولید شده است. در نهایت نیز طول درزه‌های واقعی را با توجه به تابع توزیع لاگ‌نرمال تولید شده است. در ادامه چگونگی تولید هندسه دو بعدی درزه‌های واقعی توضیح داده شده است. چون هدف این تحقیق مدل‌سازی طول درزه و یافتن تاثیر آن بر مقاومت توده سنگ می‌باشد پس برای تحلیل حساسیت، طول درزه‌های واقعی را با توجه به موقعیت‌های مختلف نسبت به توده سنگ تغییر داده و اثر آن را ثبت می‌کنیم. برای رسیدن به این هدف باید موقعیت درزه‌ها را با تابع مربوطه و با استفاده از تابع لاگ‌نرمال طول آن‌ها را تعیین کرده و سپس تحلیل تنش را در جهت‌های مختلف بر روی آن انجام داد.

۴-۴-۱- تعداد درزه‌ها

جهت تولید درزه‌های قطعی، دانستن اندازه بلوک، تعداد دسته درزه و چگالی هر دسته درزه

ضروری خواهد بود. از سوی دیگر، با استفاده از مبحث احتمالاتی می‌توان تعداد درزه‌های هر دسته درزه را تعیین نمود. با این حال، در این تحقیق، جهت تعیین تعداد درزه‌ها، تعداد درزه‌ها آنقدر افزایش داده می‌شود تا تاثیر آن‌ها بر پارامتر مقاومتی بلوک سنگی به مقدار ثابتی برسد، در نتیجه این تعداد از درزه‌ها به عنوان تعداد درزه‌های موجود در بلوک در نظر گرفته خواهد شد.

۲-۴-۴- موقعیت درزه‌ها

برای تولید قطعی، ممکن است موقعیت مرکز درزه‌های هر دسته درزه در داخل یک مستطیل با سیستم مختصات x و y تعریف شود. سپس، این مقادیر x و y به عنوان پارامترهای ورودی هر درزه استفاده شوند. برای تولید احتمالاتی، موقعیت درزه‌ها را با توزیع یکنواخت در نظر می‌گیرند (Kulatilake, et al., 1990b). همچنین مختصات x و y مرکز درزه‌ها در داخل سطح توسط متغیرهای یکنواخت با استفاده از شبیه‌سازی آماری تعیین شده است.

توزیع یکنواخت آماری پیوسته بوده و شکل ریاضی تابع چگالی یکنواخت مانند رابطه زیر

تعریف می‌گردد:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{RHIGH - RLOW} & RLOW < x < RHIGH \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۵-۴)$$

که در آن $RHIGH$ حد بالایی و $RLOW$ حد پایینی می‌باشد. تابع توزیع تجمعی، $F(x)$ ، برای متغیرهای تصادفی x که به صورت یکنواخت توزیع شده باشند به قرار زیر می‌باشد:

$$F(x) = \int_{RLOW}^x \frac{1}{RHIGH - RLOW} dt = \frac{x - RLOW}{RHIGH - RLOW}. \quad (۶-۴)$$

پس، $R1 = F(x)$ ، موقعی که $R1$ مقدار تصادفی تولید شده راندم باشد، و حل شده آن برای x برابر است با

$$x = RLOW + R1(RHIGH - RLOW). \quad (۷-۴)$$

در این تحقیق، تولید موقعیت درزه بر اساس توزیع یکنواخت تشریح شده بالا می‌باشد پس

موقعیت درزه‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند.

۳-۴-۴- جهت‌داری درزه‌ها

برای تولید قطعی جهت‌داری درزه هر دسته درزه، جهت‌داری اندازه‌گیری شده درزه از محور x به عنوان مقدار ورودی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید احتمالاتی، جهت‌داری درزه را می‌توان هم طبق توزیع احتمالاتی تئوری و هم طبق توزیع تجربی بدست آمده از داده‌ها تولید نمود. توزیع‌های احتمالاتی تئوری ممکن برای جهت‌داری، نیم‌کره‌ای نرمال^۱، بینگهام و بینگهام دو متغییره نرمال می‌باشند. این توزیع‌ها در سه بعد تعریف شده‌اند. برای تولید دو بعدی، باید این‌ها را به دو بعد کاهش داده شوند. با توجه به اهداف تحقیق، برای تولید جهت‌داری درزه از تولید قطعی استفاده شده است.

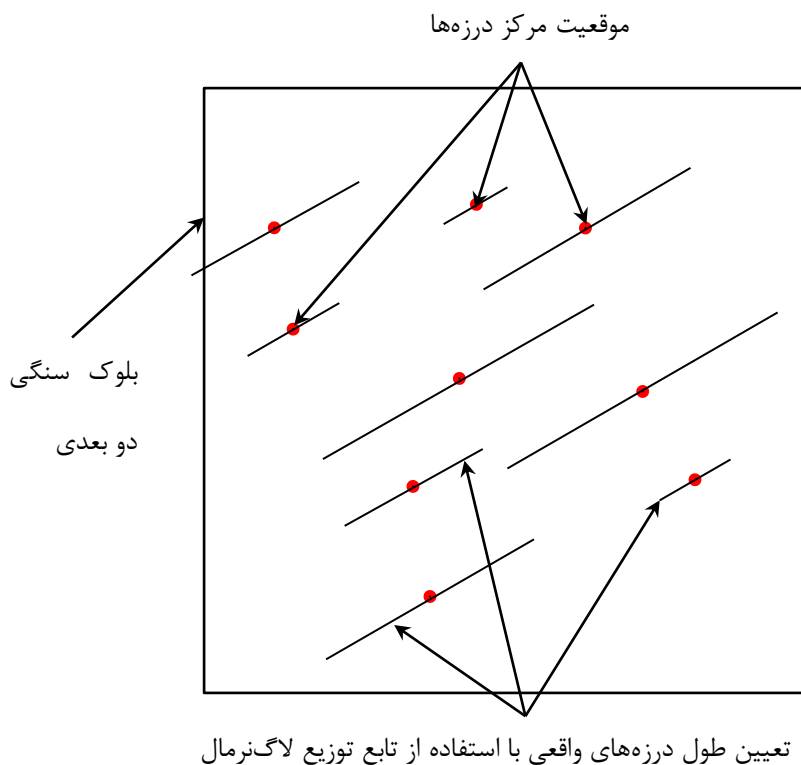
۴-۴-۴- طول درزه‌ها

هنگامی که درزه‌ها رخنمون‌ها، دیوار و سقف تونل‌ها و یا ترانشه‌ها را قطع می‌کنند طول درزه‌ها شکل می‌گیرد و یا تولید می‌شود.

مدل‌سازی ابعاد درزه یکی از بزرگترین مشکلات مدل‌سازی هندسی می‌باشد زیرا دستیابی به یک توده‌سنگ به صورت سه بعدی دشوار می‌باشد. هندسه واقعی درزه‌ها هیچگاه معلوم نمی‌گردد و اطلاع از شکل درزه‌ها هم بسیار محدود است. ولی بسیاری از محققان از جمله بارتون دریافتند که دستیابی به آن دور از دسترس نیست اگر درزه‌ها به صورت یک دیسک حلقوی در نظر گرفته شود یعنی شکل درزه حلقوی فرضی را بر اساس مشاهدات طول رخساره درزه در راستای امتداد و شیب سنگ‌های مختلف در نظر بگیریم. قطر از طریق اندازه‌گیری طول رخساره و فرضیات شکل درزه به دست می‌آید. حال در این تحقیق با توجه به مشاهداتی که از طول درزه‌ها در رخنمون‌های سنگی انجام شده است، تابع توزیع لاگ‌نرمال برای آن بدست آمده است و با استفاده از این تابع توزیع در

¹. Hemispherical normal

نرم افزار MINITAB داده های مربوط به طول درزه تولید شده است. در شکل ۴-۵ تولید موقعیت مرکز نه درزه طبق توزیع یکنواخت و طول درزه ها با استفاده از تابع توزیع لاگ نرمال بعد از ۶۰ درجه چرخش نشان داده شده است.

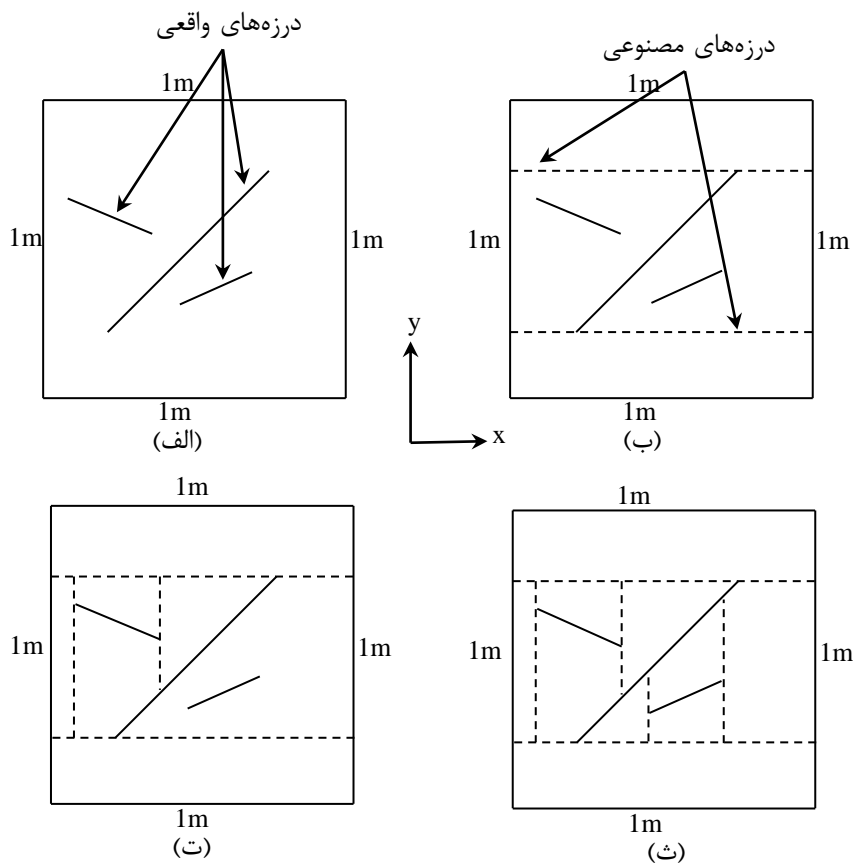


شکل ۴-۵- تولید موقعیت مرکز نه درزه طبق توزیع یکنواخت و طول درزه ها با استفاده از تابع توزیع لاگ نرمال بعد از ۶۰ درجه چرخش

۴-۵- ارتباط بین درزه های واقعی با اندازه محدود با درزه های مصنوعی

بدلیل اینکه تحلیل تنش در این تحقیق توسط کد اجزاء مجزا (UDEEC) انجام می شود، لازم است که درزه های واقعی با اندازه محدود را با درزه های مصنوعی ارتباط دهیم. همانطور که قبلاً گفته شد، UDEEC نیازمند تشکیل چندضلعی ها در داخل بلوک می باشد. بنابراین، درزه های مصنوعی در داخل بلوک سنگی تولید می شود. این درزه های مصنوعی بسته به زاویه جهت داری درزه های واقعی نسبت به محور x می توانند هم عمودی و هم افقی باشند. شکل ۴-۶ (ب) تا (ث) عملیات فرآیند ساخت

درزه‌های مصنوعی برای سیستم درزه‌های واقعی شکل ۴-۶ (الف) را نشان می‌دهند (Wang, 1992).



شکل ۴-۶- فرایند اتصال بین درزه‌های واقعی با اندازه محدود با درزه‌های مصنوعی: (الف) یک بلوک مربعی با سه درزه واقعی، (ب) سیستم درزه در داخل بلوک بعد از ساخت درزه‌های مصنوعی برای اولین درزه واقعی، (ت) سیستم درزه در داخل بلوک بعد از ساخت درزه‌های مصنوعی برای دو درزه واقعی اولیه و (ث) سیستم درزه در داخل بلوک بعد از ساخت درزه‌های مصنوعی برای هر سه درزه (بر گرفته از (Wang, 1992)).

۴-۶- ارتباط هندسه دوبعدی درزه‌های تولید شده و کد تحلیل تنش اجزای مجزا (UDEEC)

فایل خروجی هندسه دوبعدی درزه‌ها که حاوی نقاط انتهایی درزه‌های مصنوعی و درزه‌های واقعی می‌باشد به عنوان فایل ورودی کد تحلیل تنش اجزاء مجزا (UDEEC) استفاده شده است. این درزه‌های واقعی و مصنوعی، تمام بلوک را به چندضلعی‌ها گسسته می‌کنند. حال با مشخص بودن ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری سنگ بکر، درزه‌های واقعی و درزه‌های مصنوعی، می‌توان تحلیل تنش را در شرایط مختلف انجام داد.

۴-۷- تعیین مقادیر مناسب برای ویژگی‌های مکانیکی درزه‌های مصنوعی برای شبیه‌سازی

رفتار سنگ بکر برای نوع سنگ انتخابی

هنگامی که درزه‌های مصنوعی مانند سنگ بکر عمل می‌کنند، پس بلوک‌های سنگی ذکر شده تنها شامل سنگ بکر می‌باشند. پس، یافتن حل تحلیلی الاستیک برای رفتار جهانی این بلوک-های سنگی تحت تنش مورد نظر جهت توصیف رفتار قبل از شکست^۱ ممکن می‌باشد. شکست سنگ بکر را می‌توان با معیار موهر-کلمب که شامل کشش cut-off^۲ می‌باشد محاسبه کرد. برای بررسی نمودن اینکه نتایج عددی با نتایج تحلیلی همخوانی دارد یا نه، مقایسه‌هایی مابین حل‌های عددی و تحلیل الاستیکی انجام شده است. تا رسیدن به همخوانی قابل قبولی مابین نتایج عددی و حل تحلیلی، مقادیر JKS و JKN را تغییر داده‌اند.

در مطالعات عددی با روش اجزاء مجزا، هدف بدست آوردن مقادیر مناسب JKS و JKN برای درزه‌های مصنوعی برای شبیه‌سازی رفتار سنگ بکر بوده است. متأسفانه، در مورد دانستن مقادیر مناسب آن‌ها، دانش کمی وجود دارد. با این حال، زیرا که نسبت E/G سنگ بکر شبیه نسبت JKN/JKS درزه‌های مصنوعی می‌باشد، پس انتظار می‌رود که بازه قابل قبول برای نسبت JKN/JKS ممکن است از کمترین نسبت E/G سنگ بدست آید. بر طبق تئوری الاستیک خطی ایزوتروپ^۳، نسبت E/G برابر $2(1+\nu)$ می‌باشد. زیرا که بیشترین بازه ممکن برای ν مابین ۰ و ۰/۵ می‌باشد، پس بیشترین بازه ممکن طبق تئوری الاستیسیته برای نسبت E/G مابین ۲ و ۳ می‌باشد. با این حال، نسبت E/G اکثر سنگ‌ها مابین بازه ۲/۱ و ۲/۹ می‌باشد. با توجه به دلایل ذکر شده، بازه قابل قبول برای نسبت JKN/JKS مابین ۲ و ۳ می‌باشد. با این حال، تائیدیه تئوری قابل قبول برای درست بودن $E/G=JKN/JKS$ وجود ندارد. بنابراین، تصمیم گرفته شد که برای یافتن مقدار مناسب برای نسبت JKN/JKS ، بازه ۱ تا ۳ را برای این امر بررسی کنند. در گام اول، برای اجرای حل عددی مقادیر

^۱. Prefailure behavior

^۲. Tension cut-off

^۳. isotropic linear elasticity theory

مختلفی از $1E8 \text{ Pa/m}$ تا $1E17 \text{ Pa/m}$ را برای JKS انتخاب کردند و نسبت JKN/JKS را برابر یک در نظر گرفتند. جهت شبیه‌سازی رفتار سنگ بکر، پارامترهای مختلف بدست آمده از روش عددی با نتایج بدست آمده با حل تحلیلی جهت بدست آوردن مقادیر مناسب JKS درزه‌های مصنوعی مقایسه گردید. در حل با روش عددی برای بررسی نمودن تاثیر نسبت JKN/JKS، حل‌های عددی با برای مقدار ۳ این نسبت هم تکرار شدند (Wang, 1992).

آزمایش‌های مشابهی برای سنگ‌های مختلف تکرار شدند. نتایج حاصل از حل عددی این‌ها نیز مشابه نتایج ذکر شده بودند. با توجه به تجربیات حاصل این محققان، نسبت G/JKS مابین $0/008$ و $0/012$ و نسبت JKN/JKS مابین ۱ و ۳ می‌باشند.

۴-۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

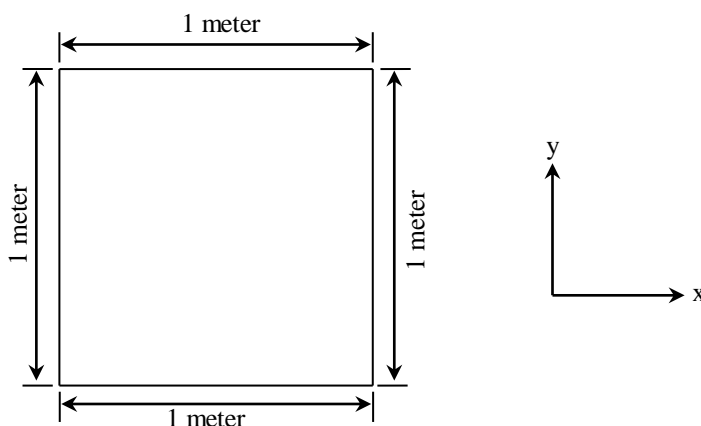
روش اجزاء مجزا، یک روش عددی است که معمولاً به منظور تحلیل رفتار سیستم‌های ناپیوسته بکار می‌رود، این روش، به منظور بررسی رفتار تغییرشکل پذیری منفصل در سنگ‌های درزه-دار توسعه داده شده است. توانایی بی‌نظیر روش اجزاء مجزا این است که توده‌سنگ بصورت مجموعه-ای از بلوک‌های مجزا که به وسیله درزه‌ها تفکیک شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و در این روش امکان ایجاد تغییر شکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد. نرم‌افزاری که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل می‌پردازد، تحت عنوان UDEC شناخته شده است.

در این تحقیق جهت تولید هندسه دوبعدی درزه‌های واقعی از نرم‌افزار MINITAB استفاده شده است. برای انجام این امر، اندازه بلوک سنگی را به صورت قطعی و با سطحی معادل یک متر مربع در نظر گرفته شده است، سپس در داخل بلوک، موقعیت مرکز درزه‌های واقعی تولید شده است. در نهایت، با توجه به تابع توزیع لاگ‌نرمال طول درزه‌های واقعی تولید شده است. سپس برای گسسته-سازی بلوک سنگی به چندضلعی‌ها، درزه‌های واقعی را به درزه‌های مصنوعی وصل شده است. در نهایت مدلی که با نرم‌افزار UDEC سازگاری داشته باشد آماده شده است.

۵- فصل پنجم

بررسی تاثیر تداوم درزه بر مقاومت توده سنگ

برای این تحقیق، بلوک‌های سنگی با سطح مقطع یک متر مربع و بعد عمود بر این سطح نامحدود (جهت ارضای شرایط کرنش صفحه‌ای) در نظر گرفته شده‌اند. برای شبیه‌سازی تحلیل‌های تنش بر روی بلوک‌های سنگی، بلوکی سنگی مانند شکل ۱-۵ در نظر گرفته شده است. در هر بلوک، درزه‌های واقعی با اندازه محدود و پیکربندی متفاوت جای داده شده‌اند. این درزه‌های واقعی با درزه‌های افقی و عمودی مصنوعی متصل شده و بلوک سنگی را به چندضلعی‌هایی گسسته‌سازی کرده‌اند. این امر به روش اجزاء مجزا این امکان را می‌دهد که به عنوان ابزار تحلیل تنش استفاده شود.

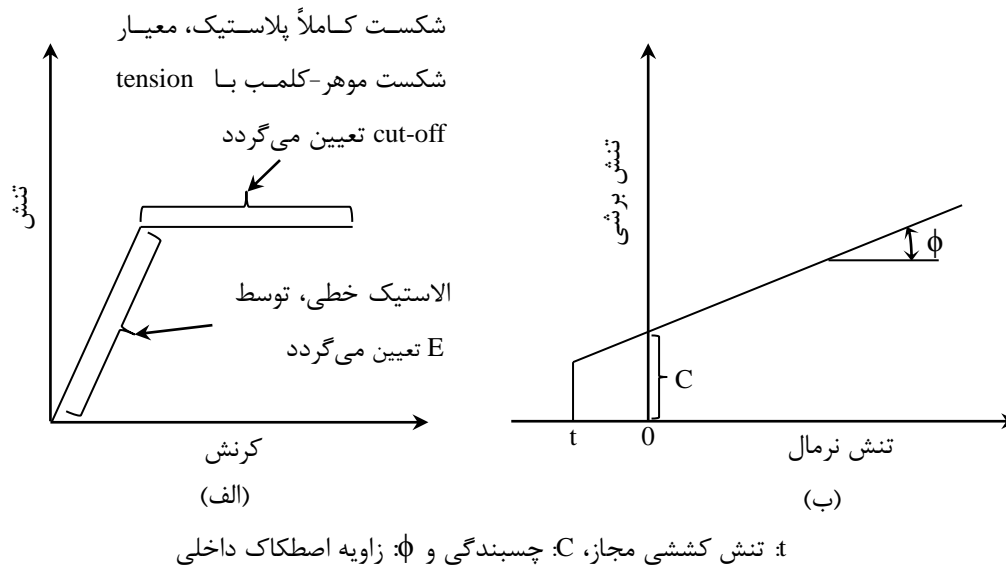


شکل ۱-۵ - سطح مقطع بلوک سنگی برای تحلیل‌های تنش در دو بعد

رفتار مکانیکی هم درزه‌های مصنوعی و هم سنگ بکر توسط مدل‌های تشکیل‌دهنده^۱ الاستیک خطی - کاملاً پلاستیک با معیار شکست موهر-کلمب که شامل tension cut-off می‌باشد در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۲-۵ و شکل ۳-۵). مقادیر یکسانی برای پارامترهای مقاومتی سنگ بکر و درزه‌های مصنوعی استفاده شده است. پارامترهای تغییرشکل‌پذیری برای قسمت الاستیک خطی سنگ بکر به وسیله ترکیب مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (ν)، و یا توسط ترکیب مدول برشی (G) و مدول حجمی (K) تعیین شده است. مقادیر مناسب برای پارامترهای برشی سنگ بکر انتخاب شده

¹. Constitutive models

است. تغییر شکل پذیری الاستیک خطی درزه‌های مصنوعی نیازمند تعیین سختی نرمال درزه‌ها JKN و سختی برشی درزه‌ها JKS می‌باشد.

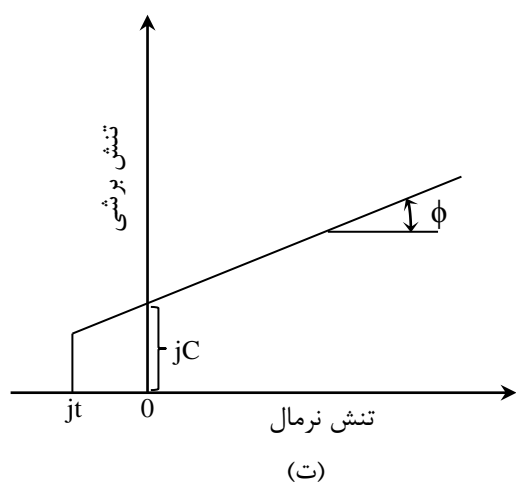
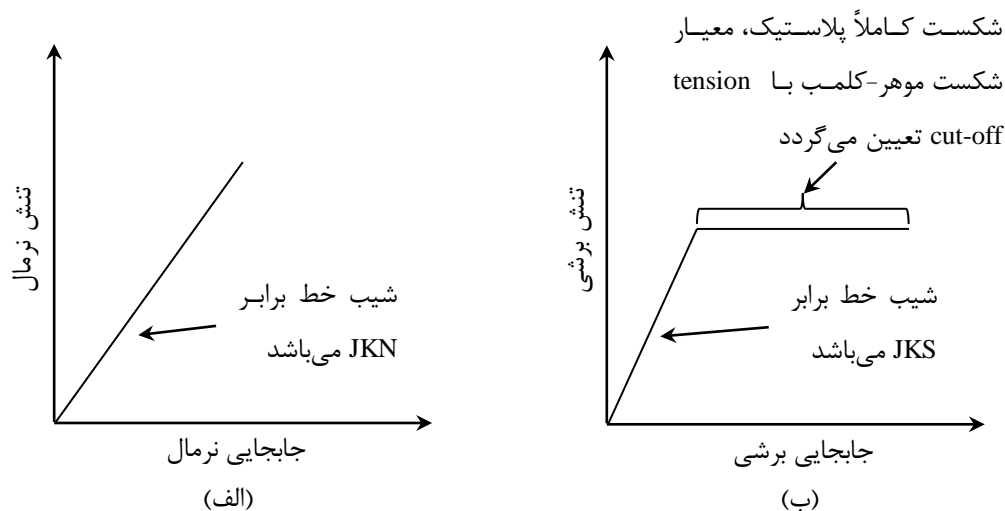


شکل ۲-۵- مدل‌های تشکیل دهنده در نظر گرفته برای سنگ بکر: (الف) تنش در مقابل کرنش و (ب) معیار شکست موهر-کلمب با tension cut-off

همچنین رفتار مکانیکی درزه‌های واقعی توسط مدل‌های تشکیل دهنده الاستیک خطی - کاملاً پلاستیک با معیار شکست موهر-کلمب که شامل tension cut-off می‌باشد در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۵). برای این تحقیق، مقادیر پارامترهای سنگ بکر، درزه‌های مصنوعی و واقعی نشان دهنده سنگ گرانیت گنیسی انتخاب شده است (Hardin, 1982, Barton, et al., 1988, Stephansson, 1989). برای پارامترهای مکانیکی سنگ بکر و درزه‌های مصنوعی مقادیر یکسانی استفاده شده است. مقادیر مناسبی هم برای پارامترهای تغییر شکل پذیری سنگ بکر انتخاب شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای تغییر شکل پذیری درزه‌های مصنوعی از بازه مناسب JKS با JKN /JKS=2.5 انتخاب شده‌اند.

برای نشان دادن رفتار مکانیکی توده سنگ دو حالت در نظر گرفته شده است: (الف) رفتار

قبل از شکست توسط مدل تشکیل دهنده آنیزوتروپ الاستیک خطی افزایشی^۱ و (ب) شکست توسط مقادیر آنیزوتروپ مقاومت. در این تحقیق رفتار بعد از شکست مطالعه نشده است.



jt: تنش کششی مجاز درزه‌ها
zC: چسبندگی درزه‌ها
 ϕ : زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها

شکل ۳-۵- مدل‌های تشکیل دهنده در نظر گرفته برای درزه‌ها: (الف) تنش نرمال در مقابل جابجایی نرمال، (ب)

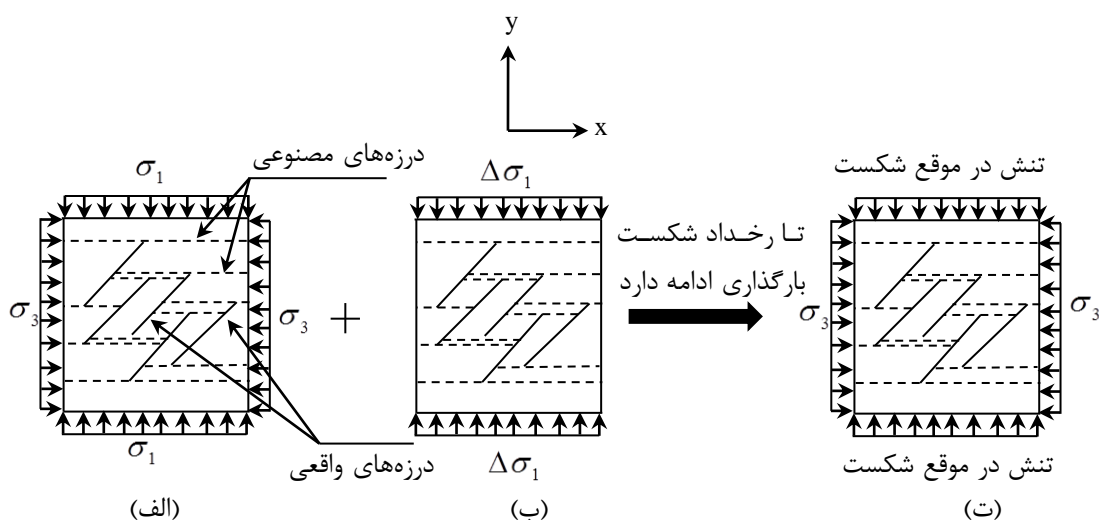
تنش برشی در مقابل کرنش برشی و (ت) معیار شکست موهر-کلمب با tension cut-off

جابجایی‌های لبه‌های بلوک سنگی نشان داده شده در شکل ۵-۱ برای تعیین کرنش میانگین در جهت محور y ثابت، و سپس نمودار تنش-کرنش مربوطه رسم شده است. برای بدست آوردن مقاومت توده سنگ (تنش اصلی با شکست متفاوت است) σ_y ، بلوک‌های سنگی تا زمانی که شکسته می‌شوند در جهت y بارگذاری می‌شوند. تمام فرآیند برای تخمین پارامترهای ذکر شده توده سنگ تکرار خواهد

¹ Incremental linear elastic anisotropic constitutive model

شد. هدف نهایی این تحلیل، بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت توده سنگ در دو بعد می‌باشد.

برای تخمین پارامترهای توده سنگ، مسیر تنش نشان داده شده در شکل ۴-۵ در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ بکر، درزه‌های مصنوعی و درزه‌های واقعی به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۴-۵- سنگ با سیستم تنش و شرایط مرزی استفاده شده برای بارگذاری در جهت محور y ، (الف) اعمال تنش- های محصور کننده، (ب) اعمال بارگذاری در جهت محور y و (ت) بارگذاری تا موقعی که بلوک سنگی می‌شکند.

مقادیر پارامترهای مکانیکی سنگ بکر و درزه‌های مصنوعی و واقعی استفاده شده جهت

تحلیل در این تحقیق در جدول ۱-۵ نشان داده است (Hardin, 1982, Barton, et al., 1988).

(Stephansson, 1989). همچنین در این تحقیق شرایط کاملاً خشک برای توده سنگ در نظر گرفته

شده است.

جدول ۵-۱ - مقادیر پارامترهای مدل‌های تشکیل دهنده سنگ گرانیت بکر، درزه‌های مصنوعی و درزه‌های

واقعی با اندازه محدود

درزه‌ها		سنگ بکر		
واقعی	مصنوعی	پارامتر	مقدار	پارامتر
مقدار	مقدار			
67.2E9 (Pa/m)	5E12 (Pa/m)	سختی نرمال (JKN)	۲۵۰۰ (Kg/m ³)	چگالی (d)
2.7E9 (Pa/m)	2E12 (Pa/m)	سختی برشی (JKS)	۶۰ (GPa)	مدول یانگ (E)
۰/۴ (MPa)	۵۰ (MPa)	چسبندگی (jc)	۰/۲۵	نسبت پواسون (ν)
۰	۰	ضریب اتساع (jd)	۴۰ (GPa)	مدول حجمی (K)
۰	۱۰ (MPa)	مقاومت کششی (jt)	۲۴ (GPa)	مدول برشی (G)
۰/۶۵۴	۰/۸۳۹	ضریب اصطکاک ($Tan\phi$)	۵۰ (MPa)	چسبندگی (C)
			۱۰ (MPa)	مقاومت کششی (t)
			۰/۸۳۹	ضریب اصطکاک ($Tan\phi$)

۵-۲ - بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل توده سنگ

برای بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل توده سنگ، ابتدا لازم است که تعداد درزه‌های

موجود در بلوک سنگی تعیین گردند. طبق رابطه جیگر، حداقل مقاومت زمانی حاصل می‌شود که

$\beta = 45 + \frac{\phi}{2}$ باشد، در این تحقیق مقدار زاویه اصطکاک درزه برابر ۳۳ درجه در نظر گرفته شده

است، پس کمترین مقدار مقاومت در زاویه ۶۱/۵ درجه اتفاق خواهد افتاد. در این مرحله جهت تعیین

تعداد درزه‌ها در واحد سطح (چگالی درزه‌ها)، درزه‌هایی در داخل بلوک سنگی با زاویه ۶۱/۵ درجه

(بحرانی‌ترین حالت) نسبت به افق در نظر گرفته شده است (لازم به ذکر است که موقعیت مرکز درزه-

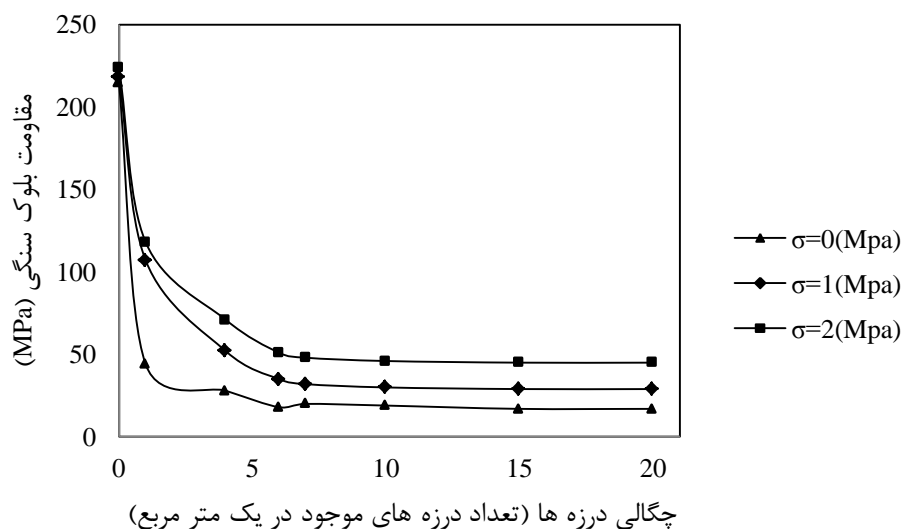
ها با توجه به فرایند توضیح داده شده در فصل قبلی انتخاب شده‌اند). سپس در هر مرحله درزه‌هایی با

طولی معادل بعد بلوک (بحرانی‌ترین حالت) در داخل بلوک سنگی قرار داده شده و توسط نرم‌افزار

UDEC تحلیل‌های لازم بر روی این بلوک سنگی انجام گرفته است. سپس تعداد درزه‌ها را افزایش

داده تا در نهایت تاثیر تعداد درزه‌ها بر مقاومت توده سنگ مشخص شده است. در شکل ۵-۵ نتایج

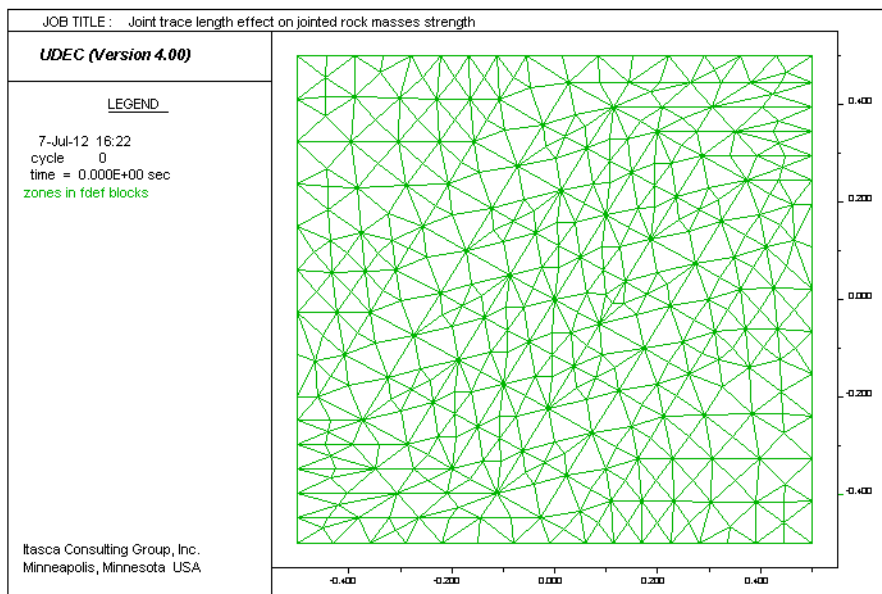
حاصل از این تحلیل‌ها نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش تعداد درزه‌ها مقاومت بلوک سنگی کاهش پیدا می‌کند و هنگامی که تعداد درزه‌ها برابر شش می‌شود، مقاومت بلوک سنگی به مقدار ثابتی خواهد رسید.



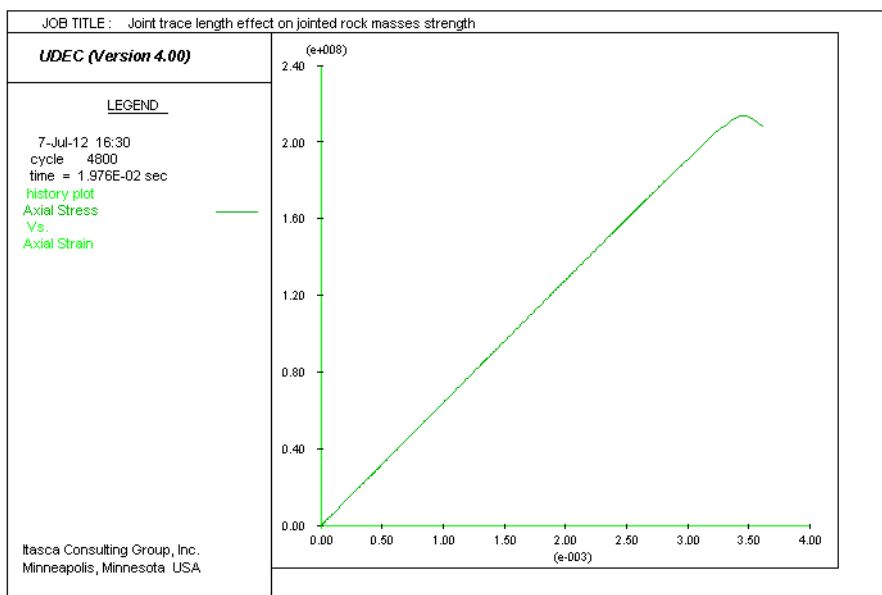
شکل ۵-۵- تاثیر چگالی درزه در سطح بر مقاومت معادل توده سنگ

جنس سنگی که درزه‌ها در آن قرار داده شده‌اند الاستیک خطی، همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است. جهت شبیه‌سازی تغییرشکل‌پذیری الاستیک در محیط نرم‌افزار UDEC، بلوک سنگی به شبکه‌ایی از مثلث‌های هم‌اندازه گسسته‌سازی شده است (شکل ۵-۶).

در این مرحله جهت بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل توده سنگ، درزه‌های موجود در بلوک سنگی با زاوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق و طول‌های مختلف برابر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۷-۵ نمونه‌ایی از نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی فاقد درزه نشان داده شده‌است.



شکل ۵-۶- گسسته‌سازی بلوک سنگی در نرم‌افزار UDEC

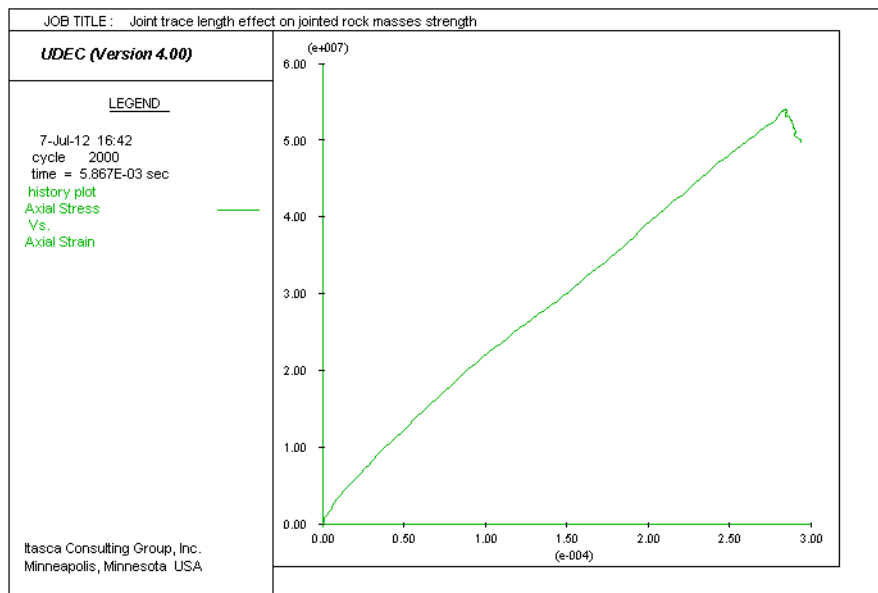


شکل ۵-۷- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی فاقد درزه

شکل ۵-۸ تا شکل ۵-۱۲ نمودارهای تنش - کرنش حاصل از این تحلیل‌ها را در تنش‌های

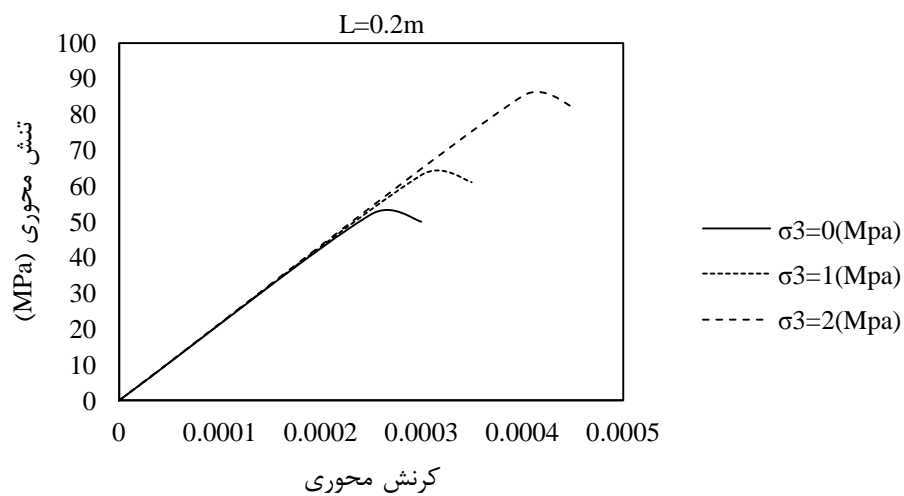
محصورکننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال را برای زاویه ۶۰ درجه (بحرانی‌ترین حالت) نشان می‌دهند. با

توجه به این نمودارها به روشنی دیده می‌شود که تاثیر نسبت طول درزه به اندازه ابعاد بلوک بر مدول توده سنگ کم می‌باشد. همچنین با افزایش میانگین طول درزه‌ها، مقاومت توده سنگ کاهش می‌یابد. همچنین در این نمودارها به روشنی دیده می‌شود که با افزایش تنش محصورکننده مقاومت بلوک سنگی درزه‌دار افزایش پیدا می‌کند.

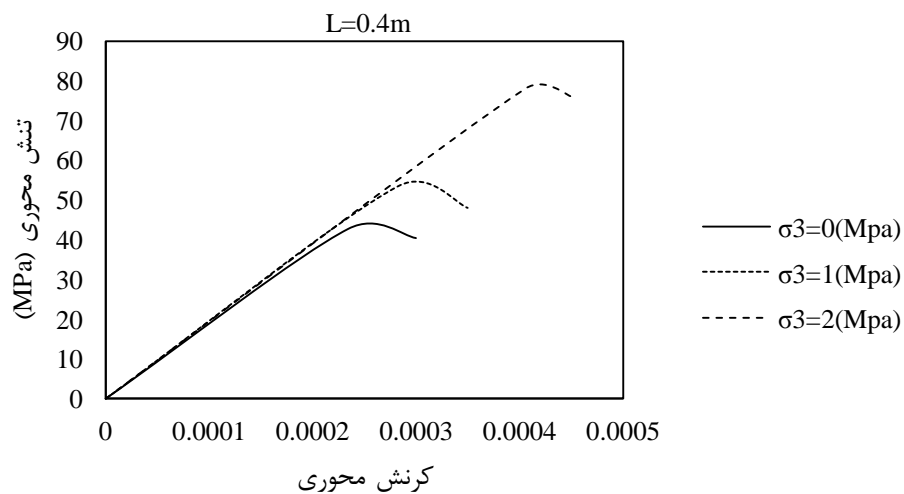


شکل ۵-۸- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول ۰/۸ متر، زاویه ۶۰

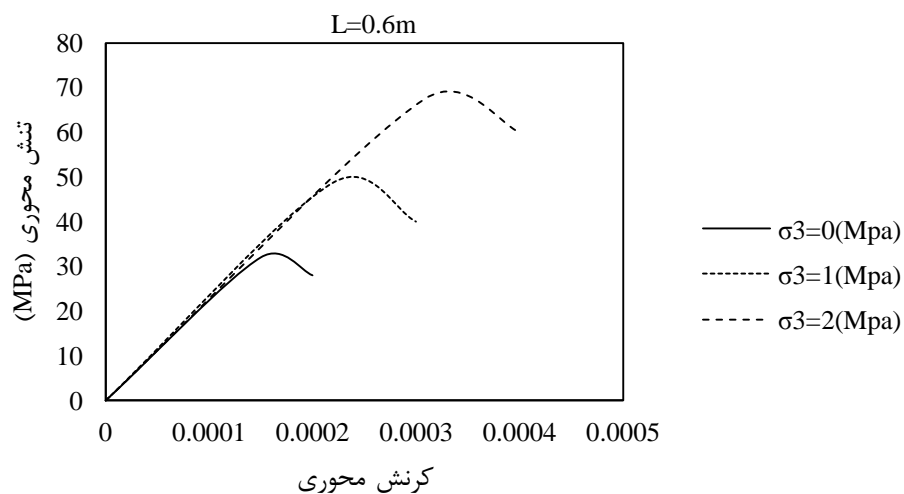
درجه نسبت به افق و تنش محصور کننده سه مگاپاسکال در نرم‌افزار UDEC



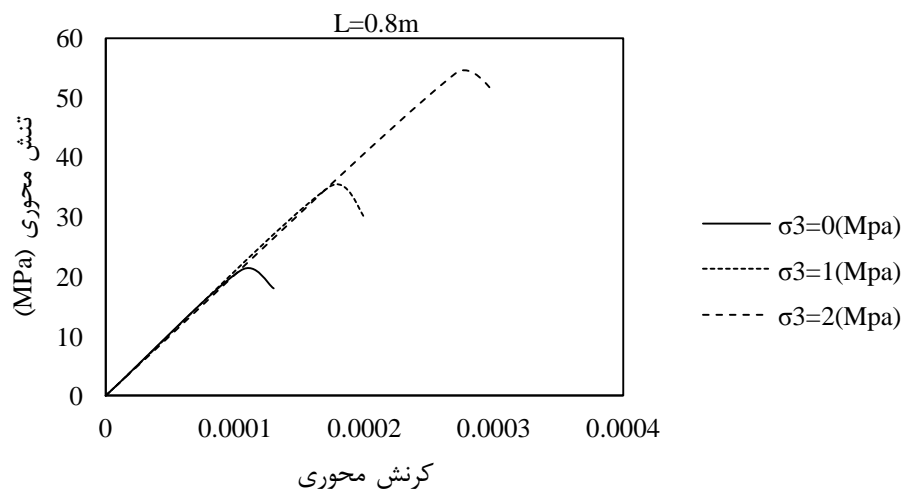
شکل ۵-۹- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول ۰/۲ متر، زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال



شکل ۵-۱۰- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول ۰/۴ متر، زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال



شکل ۵-۱۱- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول ۰/۶ متر، زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال

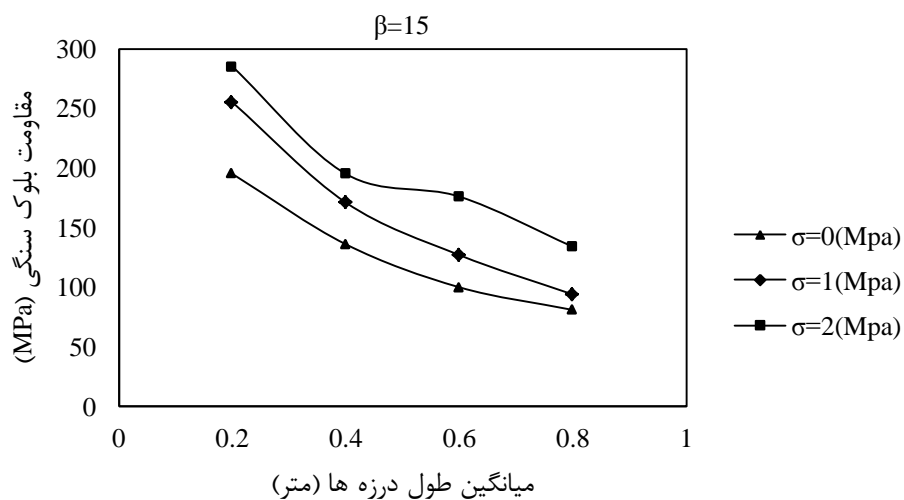


شکل ۵-۱۲- نمودار تنش و کرنش محوری بلوک سنگی شامل هفت درزه با میانگین طول ۰/۸ متر، زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق و تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال

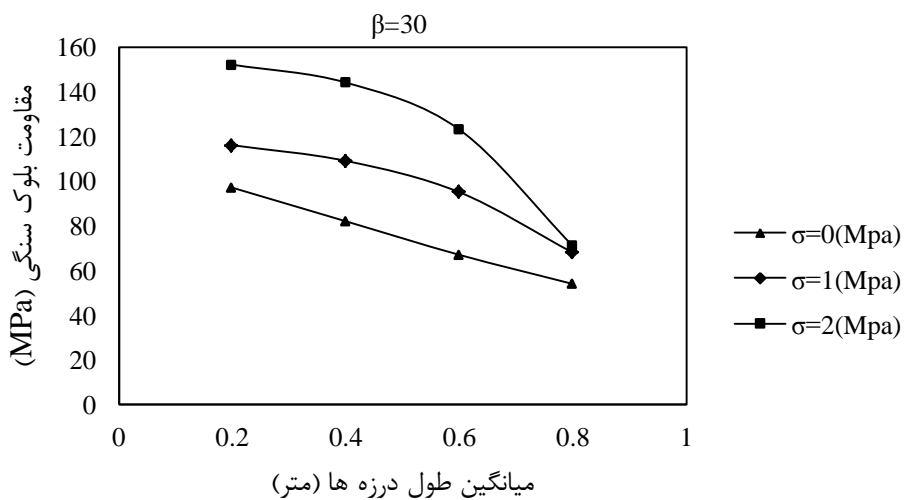
در نهایت می‌توان تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک‌های سنگی را در شکل ۵-۱۳ تا

شکل ۵-۱۷ نشان داد. که مقاومت معادل همان نقاط پیک مربوط به نمودارهای تنش-کرنش نتیجه

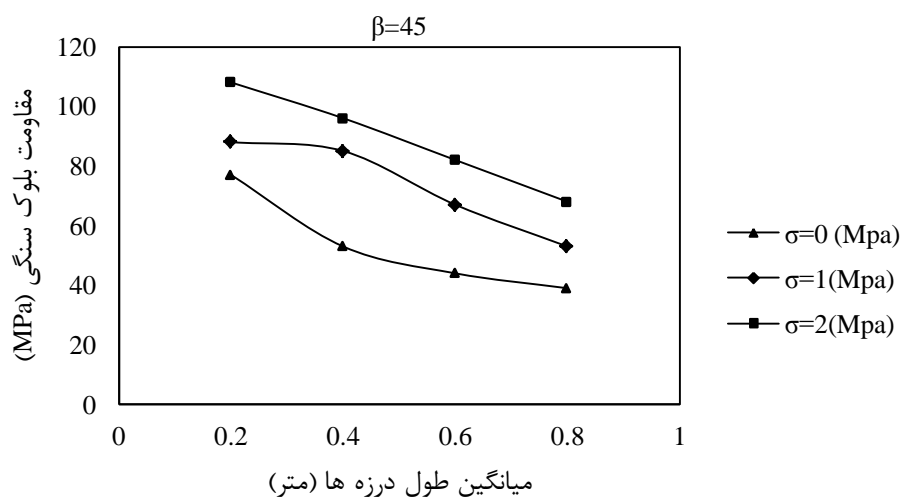
شده از تحلیل تنش در نرم‌افزار UDEC می‌باشد.



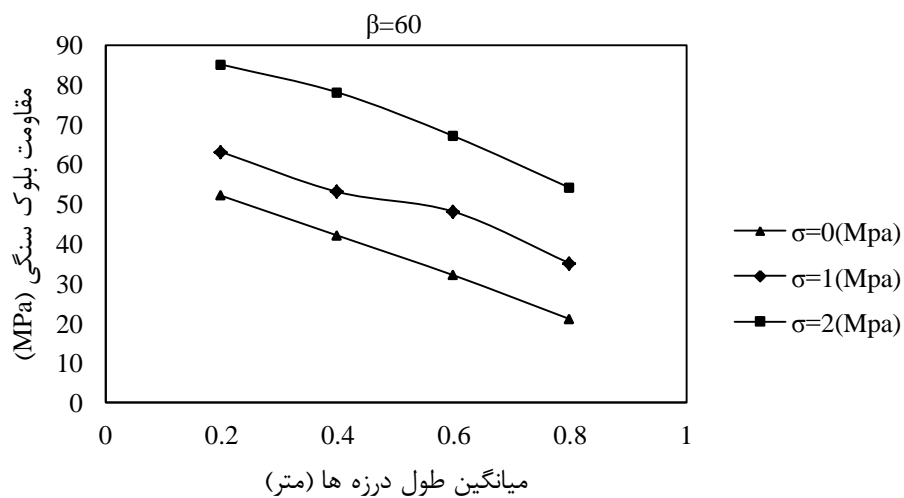
شکل ۵-۱۳- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال برای زاویه ۱۵ درجه



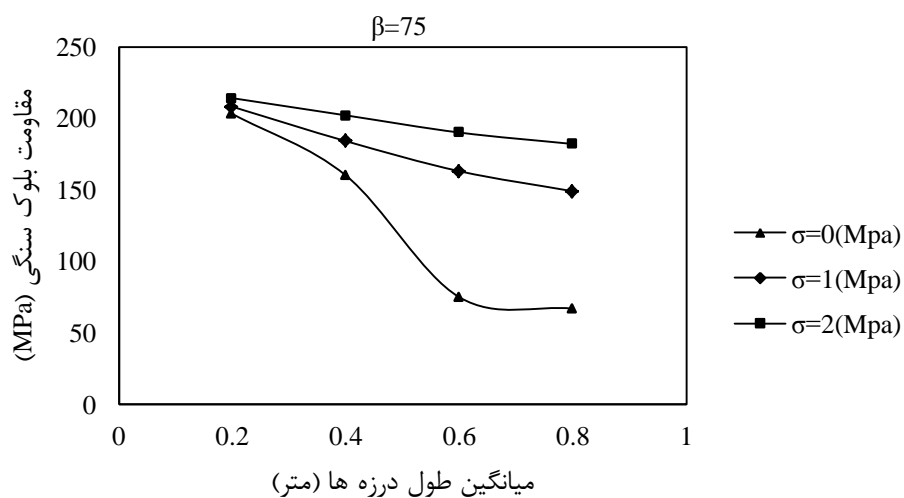
شکل ۵-۱۴- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال برای زاویه ۳۰ درجه



شکل ۵-۱۵- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه دار در تنش های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال برای زاویه ۴۵ درجه



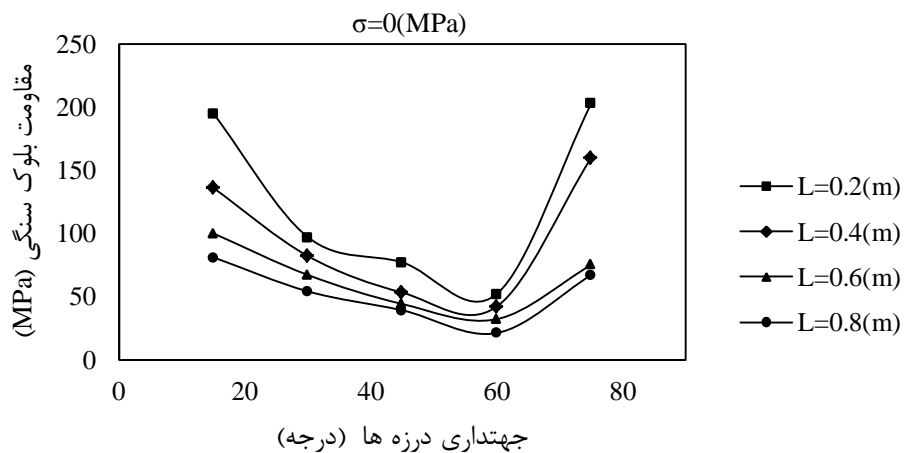
شکل ۵-۱۶- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه دار در تنش های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال برای زاویه ۶۰ درجه



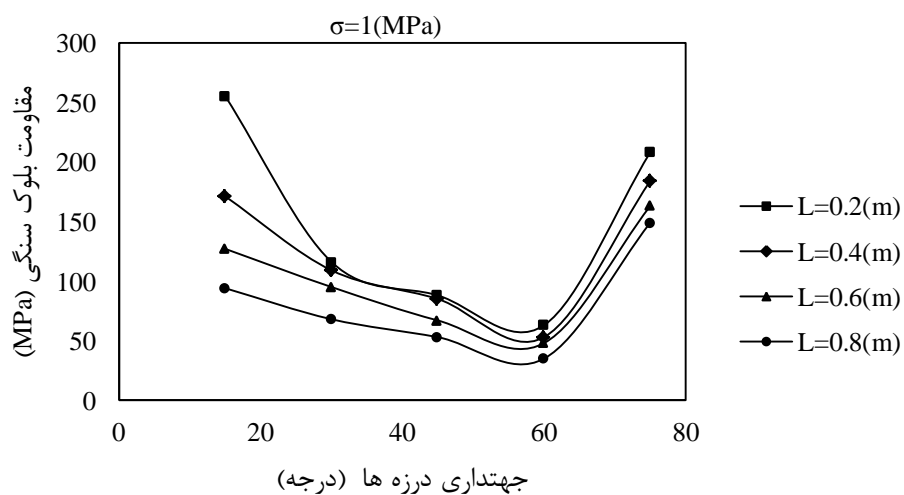
شکل ۵-۱۷- تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال برای زاویه ۷۵ درجه

در این شکل‌ها به روشنی دیده می‌شود که با افزایش میانگین طول درزه‌ها مقاومت معادل بلوک سنگی کاهش پیدا می‌کند. همچنین هنگامی که درزه‌ها با افق زاویه ۶۰ درجه تشکیل می‌دهند، بلوک سنگی کمترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد.

در شکل ۵-۱۸ تا شکل ۵-۲۰، تاثیر جهت‌داری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار در تنش‌های محصور کننده ۰، ۱ و ۲ مگاپاسکال نشان داده شده است.

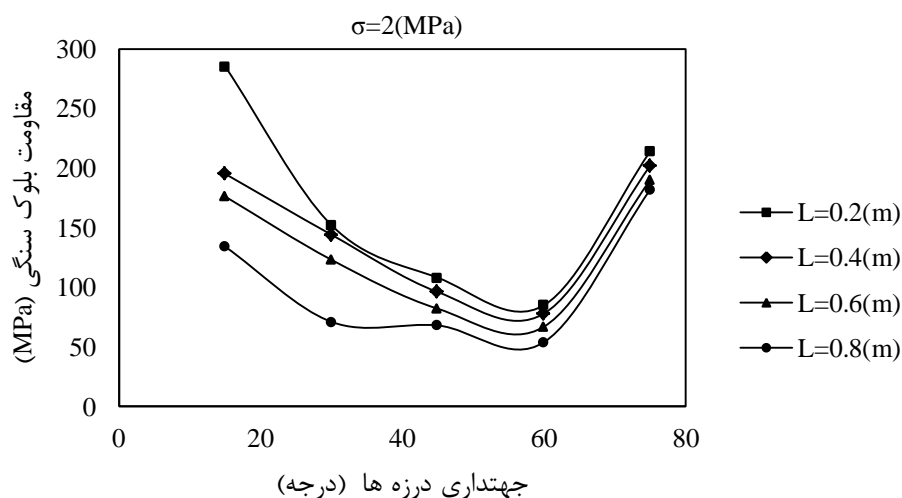


شکل ۵-۱۸- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی دزه‌دار بدون تنش محصور کننده



شکل ۵-۱۹- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی دزه‌دار در تنش محصور کننده ۱

مگاپاسکال



شکل ۵-۲۰- تاثیر جهتداری و طول درزه‌ها با همدیگر بر مقاومت معادل بلوک سنگی دزه‌دار در تنش محصور کننده ۲

مگاپاسکال

در شکل‌های فوق به روشنی دیده می‌شود که با افزایش زاویه درزه‌ها نسبت به افق تا ۶۰ درجه، مقاومت معادل بلوک سنگی کاهش پیدا می‌کند و در این حالت کمترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. سپس با افزایش زاویه درزه‌ها نسبت به افق، مقاومت معادل بلوک سنگی افزایش پیدا می‌کند.

۳-۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل، بلوک‌های سنگی با سطح مقطع یک متر مربع و بعد عمود بر این سطح نامحدود (جهت ارضای شرایط کرنش صفحه‌ای) جهت تحلیل تنش، در نظر گرفته شد. سپس در هر بلوک، درزه‌های واقعی با اندازه محدود و پیکربندی متفاوت جای داده شده است. زیرا که ابزار تحلیل تنش در این تحقیق روش اجزاء مجزا بوده، درزه‌های واقعی با درزه‌های افقی و عمودی مصنوعی متصل شده و بلوک سنگی را به چندضلعی‌هایی گسسته‌سازی کرده و این امر به روش اجزاء مجزا این امکان را می‌دهد که به عنوان ابزار تحلیل تنش استفاده شود. رفتار مکانیکی هم درزه‌های مصنوعی و درزه‌های واقعی و همچنین سنگ بکر توسط مدل‌های تشکیل‌دهنده الاستیک خطی - کاملاً پلاستیک با معیار

شکست موهر-کلمب که شامل tension cut-off می‌باشد در نظر گرفته شده‌اند. و همچنین، مقادیر یکسانی برای پارامترهای مقاومتی سنگ بکر و درزه‌های مصنوعی استفاده شده است. در نهایت مدل تهیه شده که شامل هفت درزه بوده در نرم‌افزار UDEC جهت بررسی تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی درزه‌دار استفاده شده است. نتایج این بررسی‌ها در نمودارهایی که نشان دهنده تاثیر طول درزه بر مقاومت معادل بلوک سنگی می‌باشد نشان داده شده است.

۶- فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

تحلیل، طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده سنگ‌ها ساخته می‌شوند ملزوم درک صحیح ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت و تغییرشکل‌پذیری) توده‌سنگ‌های درزه‌دار می‌باشد. به دلیل وجود ناپیوستگی‌های متعدد با طبیعت آماري ویژگی‌های هندسی و ژئومکانیکی آن-ها، پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های مکانیکی و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار خیلی مشکل می‌باشد.

بدلیل ماهیت تصادفی ویژگی‌های درزه و اینکه، بطور معمول در بازه وسیعی متغیر هستند، پس بایستی تقریباً در همان طراحی‌های اولیه مد نظر قرار بگیرند. بنابراین، به دلیل این ماهیت رخدادهای طبیعی و وجود روش‌های گسترده احتمالاتی در زمینه‌های علوم‌زمین، تاکید داشته‌اند که استفاده از روش‌های احتمالاتی نسبت به روش‌های قطعی بیشتر به واقعیت نزدیک‌تراند. با این حال، ممکن است در تخمین یک رفتار احتمالی، طیف وسیعی از داده‌های آن ویژگی تصادفی مد نظر قرار بگیرند. با استفاده از تابع توزیع احتمال، می‌توان به هدف ذکر شده دست یافت، که هم بازه‌ای که متغیر می‌تواند داشته باشد و هم فراوانی مربوطه‌ی هر مقداری در این بازه را تعیین می‌کند.

طول درزه قابل مشاهده شده بر روی رخنمون‌ها، به اندازه و خطاهای سنسورینگ و ترانکیشن بستگی دارد (Kulatilake, et al., 1993)، تاثیر خطای ترانکیشن را با کاهش سطح ترانکیشن در موقع برداشت درزه می‌توان کاهش داد. در این تحقیق طول ۰/۱ متر برای حد ترانکیشن انتخاب شده است. رخنمون‌های سنگی انتخاب شده نیز دارای اندازه نسبتاً بزرگ در برابر اندازه درزه‌های موجود می‌باشند، پس خطاهای ترانکیشن و اندازه مد نظر قرار نمی‌گیرند. با این حال، جهت حذف اثر خطای سنسورینگ، از مدل‌های تخمین‌گر شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای تخمین طول درزه‌هایی که طول آن‌ها بطور کامل مشاهده نمی‌شود، استفاده شده است.

برای اهداف این تحقیق، سه مجموعه داده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی آماده شده

است. این مجموعه داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به ۱۶۵۲ درزه برداشت شده از رخنمون‌های سنگی می‌باشد. برای تخمین طول درزه سه مجموعه داده از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی آماده شده است. هر مجموعه داده‌ها به صورت تصادفی به دو دسته داده آموزشی و آزمایشی تقسیم‌بندی شده‌اند. برای ساخت هر مدل ۷۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و بقیه‌ی داده‌ها جهت آزمایش مدل بکار برده شده‌اند. جهت لحاظ نمودن اثر مکان برداشت در هر نوع سنگ، به مکان‌های برداشت در کدهای ۱ تا ۳ داده شده است. و همچنین برای لحاظ نمودن فاصله‌داری، فاصله نقطه تقاطع هر درزه با خط برداشت از ابتدای خط برداشت نیز در نظر گرفته شده است. پس مکان برداشت، فاصله تقاطع با خط برداشت، بازشدگی، جهت شیب، شیب، زبری، مقاومت دیواره (واجهش چکش اشمیت) و دسته درزه به عنوان پارامترهای ورودی مدل و طول درزه نیز به عنوان خروجی مدل مورد در نظر گرفته‌اند. سپس مدل‌های بهینه شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان برای تخمین طول درزه آموزش داده شد و با توجه به بهتر بودن مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، از مدل‌های آن برای تخمین طول درزه استفاده شده است. در نهایت با استفاده از آزمون‌های بهترین برازش کولموگروف-اسمینوروف، آندرسون-دارلینگ و کای-سکویر جهت ارزیابی تابع چگالی احتمال طول درزه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط SVM استفاده شده است. در نهایت با توجه به نتایج این آزمون‌ها، تابع توزیع لاگ‌نرمال بیشترین سازگاری را برای توزیع طول درزه از خود نشان داده است.

به دلیل وجود شبکه پیچیده شکستگی‌ها، رفتار مکانیکی توده سنگ‌های درزه‌دار ویژگی‌های تاثیر مقیاس و آنیزوتروپی از خود نشان می‌دهند. یافتن المان حجم معرف و ویژگی‌های آن از مسائل مهم رفتار وابسته به مقیاس توده سنگ‌ها می‌باشد. جهت انجام بررسی ذکر شده، روش عددی اجزای مجزا (نرم‌افزار UDEC) به عنوان ابزار تحلیل تنش در دو بعد بر روی بلوک‌های سنگی شامل درزه‌های مختلف با طول‌های مختلف و جهت‌داری‌های متغییر استفاده شده است.

در این تحقیق مدل‌های تشکیل دهنده برای رفتار قبل از شکست توده‌سنگ‌های درزه‌دار از

الاستیک خطی استفاده شده است. برای تخمین پارامترهای مقاومتی توده سنگ از بارگذاری در جهت قائم استفاده شده است. در هر مرحله از تحلیل بلوک سنگی شامل درزه‌های واقعی با طول معین بوده و تحت زوایای مختلف توسط روش اجزای مجزا بررسی شده است. در مرحله نخست از تحلیل‌ها تعداد درزه‌ها در بلوک سنگی تا شش عدد باعث کاهش مقاومت معادل بلوک سنگی شده و از آن پس دیگر مقاومت تقریباً بدون تغییر بوده است. نکته قابل توجه در تحلیل تنش حاصل از تاثیر طول درزه بر مقاومت بلوک‌های سنگی درزه‌دار این که با افزایش طول درزه، مقاومت بلوک سنگی تا موقعی که میانگین طول درزه‌ها بر ابعاد بلوک کمتر از $0/8$ است کاهش پیدا می‌کند و بعد از آن تقریباً تاثیر آنچنانی بر مقاومت بلوک سنگی ندارد.

۶-۲- پیشنهادات

در این تحقیق جهت تخمین برآورد طول درزه، هر سه نوع سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی انتخاب شده است، اما با توجه به طیف گسترده سنگ‌های مختلف این انتخاب نمی‌تواند نمایانگر جامعی از تمام سنگ‌ها باشد. پس باید مجموعه کاملی از تمام سنگ‌ها تهیه شود زیرا که تمام ویژگی‌های هندسی درزه‌ها به طور کامل بررسی نشده‌اند پس باید از مجموعه داده‌های تهیه شده توابع توزیع تمام ویژگی‌های هندسی درزه‌ها مشخص شوند.

با توجه به اینکه تمام ویژگی‌های هندسی درزه از مکانیسم‌های مشابهی به وجود آمده‌اند، پیشنهاد می‌شود که روابط هر یک از این پارامترها با همدیگر در سنگ‌های مختلف مورد بررسی قرار بگیرند.

در نهایت جهت شبیه‌سازی که به حالت طبیعی بیشتر نزدیک باشد پیشنهاد می‌گردد که بلوک سنگی را همراه با ویژگی‌های هندسی و مکانیکی درزه در سه بعد شبیه‌سازی شود و تاثیر هر یک از پارامترها بر رفتار مکانیکی، مقاومتی و هیدرولیکی توده سنگ بررسی شود.

فهرست منابع -۷

- Attwell, P.B, and I.W Farmer. *Principles of Engineering geology, Chapman & Hall, London.* 1976.
- Ayday, C. "Statistical analysis of discontinuity parameters of Golbasi (Ankara) andesites, Supren (Eskisehir) marble, and Porsuk Dam (Eskisehir) peridotite, Ph.D. Dissertation, Middle East Technical." 1989, 186.
- Badgely, C Petter. *Structural and tectonic principles, Harper and Row publishers.* 1965.
- Baecher, 1983. "Statistical analysis of rock mass fracturing." *Journal of Mathematical Geology* 15 (1983): 329-347.
- Baecher, G.B, and N.A Lanney. "trace length biases in joint surveys, Proc. 19th Rock Mech., Nevada." 1978. 56-65.
- Baecher, G.B, N.A Lanney, and H.H Einstein. "Statistical description of rock properties and sampling, Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mech., Colorado, 5C1.1 5C1.8." 1977.
- Barton, C.M. "Analysis of joint traces, Proc. 19th Symp. Rock Mech. Am. Inst. Min. Eng." 1978. 39-40.
- Barton, N, P Chryssanthakis, and K Monsen. "Validation of MUDEC against colorado school of mines, block test data., Technical Report, Norwegian Geotechnical Institute." 1988.
- Bieniawski, Z.T. "Determining rock mass deformability: experience from case histories." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstr* 15 (1978): 237-247.
- Bieniawski, Z.T, and W.L Van Heerden. "The significance of in situ tests on large rock specimens." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomechanics Abstr* 12 (1975): 101-113.
- Bridges, M.C. "Presentation of fracture data for rock mechanics, Proc. 2nd Australia -

- New Zealand Conf. on Geomechanics, Brisbane." 1976.
- Brown, E.T. "Modes of failure in jointed rock masses." *Proc. 2nd Congress of the Inter. Soc. of Rock Mechanics, belgrade, Yugoslavia.* 1970. 3-42.
- Brown, E.T, and D.H Trollope. "Strenght of a model of jointed rock." *J. Of the Soil Mech. and Foundation Div. ASCE* 96 (1970): 685-704.
- Brown, ET. *ISRM suggested methods: rock characterization, testing and monitoring, London, Pergamon.* 1981.
- Burges, C.J.C. "A tutorial on support vector machines for pattern recognition." *Data Mining Knowledge Discovery* 2, no. 2 (1998): 121-167.
- Burton, A.N. "Classification of rocks mechanics." *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2 (1965): 105.
- Call, R.D, J.P Savely, and D.E Nicholas. "Estimation of joint set characteristics from surfacemapping data." *Monograph on Rock Mechanics Applications in Mining. SME -AIME,* 1976: 65-73.
- Cheng, M.Y. "Advancements and improvement, in discontinuous deformation analysis." *Computer and Geotechnics* 22, no. 2 (1998): 153-163.
- Christianini, V, and J Shawe-Tylor. *An introduction to support vector machines. Cambridge: Cambridge University Press.* 2002.
- Courant, R, and D Hilbert. *Methods of Mathematical Physics. 1 and 2, Wiley Interscience, New.* 1970.
- Cruden, D.M. "Describing the size of discontinuities,." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 14 (1977): 133-137.
- Cundall, P.A. "A computer model for simulatin progressive large scale movements in blocky rock system." *Proc. Int. Soc. of Rock Mechanics Nancy, France.* 1971.
- Cundall, P.A. "Formulation of three-dimensinal distinct element methd-part 1. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstr* 25

(1988): 107-116.

Cundall, P.A. "UDEC-a generalized distinct element method program for modeling jointed rock." *Rpt. PCAR-180, P.Cundall Assocs., Contract DAJA37-79-C-5048, Europ., Research Off., U.S. Army*, 1980.

Cundall, P.A, and R.D Hart. "Development of generalized 2-D and 3-D distinct element programs for modeling jointed rock." *MISC Paper SL-85-1, U.S. Army Corps of Engineering*, 1985.

Dagic, Snleyman. "Tunneling in fault zones, Tuzla Tunnel." *Turkey Tunneling & Underground Space Technology* (Elseveir Ltd), 2002: 453-465.

D'Agostino, R.B, and M.A Stephens. *Goodness-of-fit Techniques, New York: Marcel Dekker*. 1986.

Dan, Zh, L Jian, P Jing-tao, and M.A Heng. "Hybrid genetic algorithm for the optimization of mine ventilation network." *JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING* 15, no. 4 (2009): 389-393.

Deer, D.U, R.B Peck, J.E Monsees, and B Schmidt. "Design of tunnel liners and support system. Office of high speed ground transportation, U.S. Department of transportation. PB 183799." 1969.

Denby, B, and D Schofield. *Open pit design and Scheduling by use of Genetic Algorithms. Transcation of the Institution of Mining & Metallurgy, London, 102(A)*. 1994.

Dershowitz , W.S, and H.H Einstein. "Characterizing rock joint geometry with joint system models." *Rock mechanics and rock engineering* 21 (1988): 21-51.

Dibike, YB, S Velickov, D Solomatine, and M.B Abbott. "Model Induction with support vector machines: Introduction and Application." *J Comput Civil Eng* 15, no. 3 (2001): 208-216.

Ehlen, Judy. "some effects of weathering on joints in granitic rocks." *Catena* 49 (2002): 91-109.

Einstein, H.H, and R.C Hirschfeld. "Model studies on mechanics of jointed rock." *J. of*

the Soil Mech. and Foundation Div., ASCE 99 (n.d.): 229-242.

Einstein, H.H, G.B Baecher, and K.J O'Reilly. "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 20 (1983): 227-236.

Eshwaraiah, H.V, and V.S Upadhyaya. "Influence of rock joints in performance of major civil engineer ring structures." *Proc. of Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Balkema Publ.* 1990. 951-968.

Evans, E, N Hastings, and B peacock. *Statistical Distributions second ed. John Wiley & Sons, New York.* 1993.

Fairhurst, C, and J Pei. "A comparison between the Distinct Element Method and the Finite Element Method for analysis of the stability of an Excavation in Jointed Rock." *Tunneling & Underground Space Technology* 5, no. 1,2 (1990): 111-117.

Ferror, A, and M Migliazza. "Analysis of Tunnel Stability; Comparison between Continuous and discontinuous Approaches." *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* (Elsevier Ltd), 2004.

Fooks, P.G, and B Deness. "Observational studies on fissure patterns in Cretaceous sediments of South-East England." *Geotechnique* 19, no. 4 (1969): 453-477.

Goodman, R.E, R.L Taylor, and T.L Brekke. "A model for the mechanics of jointed rock." *J of the Soil Mech. and Foundation Div., ASCE* 94 (1968): 637-659.

Gregory B, B Baecher. "Statistical Analysis of Rock Mass fracturing." *Mathematical Geology* 15, no. 2 (1983): 329-348.

Grierson, DE, and WH Park. "Optimal sizing geometrical and topological design using genetic algorithm." *Struct. Optim.* 6 (1993): 151-159.

Gumede , H, and T.R Stacey. "Measurement of typical joint characteristics in South African gold mines and the use of these characteristics in the prediction of rock falls." 107 (2007): 335-344.

Gunn, S.R. *Support Vector Machines for Classification and Regression, Technical Report, University of Southampton, Faculty of Engineering, Science and*

Mathematics School of Electronics and Computer Science. 1998.

Gupta, V, M Mohanty, M Mahajan, and S.K Biswal. "Genetic algorithms – A novel technique to optimize coal preparation plants." *Int. J. Miner, Process* 84 (2007): 133-143.

Hameren, A.Van. "Goodness-of-fit tests in many dimensions." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 559 (2006): 167-171.

Han, D, and I Cluckie. "Support vector machines identification for runoff modeling. 6th International Conference on Hydro- informatics - Liong, Phoon & Babovic (Eds), Singapore." 2004. 21-24.

Hardin, E.L. "A heated flatjack test to measure the thermomechanical and transport properties of rock masses, Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus, OH, ONWI." 1982, 260.

Harr, M.E. *Mechanics of Particulate Matter-A Probabilistic Approach, McGraw-Hill, New York. 1977.*

Hart, R, P.A Cundall, and J Lemos. "Formulation of a three-dimensional distinct element model-part 2: mechanical calculation for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstr* 25 (1988): 117-126.

Hayashi, M. "Strength and dilatancy of brittle jointed masses: The extreme value stochastics and anisotropic failure mechanism." *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mechanics, Lisbon. 1966. 295-302.*

Henriksen, H, and A Branthen. "Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses n groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway." *Hydrogeology Journal*, 2006: 444-461.

Herget, G. "Probabilistic slope design for open pit mines." *Rock Mechanics* 12 (1982): 163-178.

Heuze, F.E. "Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability." *Rock Mechanics* 12 (1980): 167-192.

- Heuze, F.E, and R.E Goodman. "Three dimensional approach for design of cuts in jointed rock." *Proc, 13th Symp. Rock Mechanics, University of Illinois,Urbana.* 1972. 397-441.
- Hoek, E, and E.T Brown. "Emperical strength criterion for rock masses." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 1980: 1013-1035.
- Hopfield, J.J. "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities." *Conference Proceeding.* 1982. 2554-2558.
- Hudson, J.A, and J.P Harrison. *Engineering rock mechanics: An intoduction to the principles.* Elsevier, Oxford, 1997.
- Hudson, J.A, and S Stephen Priest. "Discontinuity frequency in rock masses." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract 20*, no. 2 (1983): 73-89.
- Inc, Itasca Consulting Group. "UDEC, Universal distinct element code, Version 4.00,Vol 1&2: User Manual." 1992.
- ISRM, International Society for Rock Mechanics. "Commission on Standardization of Laboratory andField Tests: Suggested methods for the quantitative description of dis-continuities in rock masses." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomechanics Abstract 15* (1978): 319-368.
- Itasca Consulting Group Inc. "UDEC, Universal distinct element code, Version 4.00,Vol 1&2: User Manual." 1992.
- Kulatilake, P.H.S.W. "Estimating elastic constants and strength of discontinuous rock." *J.Geotech. Engrg., ASCE 3* (1985): 847-864.
- Kulatilake, P.H.S.W, D.N Wathugala, M Poulton, and O Stephansson. "Analysis of structural homogeneity of rock masses." 29 (1990a): 195-211.
- Kulatilake, P.H.S.W, D.N Watugala, and O Stephenson. "joint network modeling with a validation exercise in Strip mine, Sweden." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30 (1993): 503-526.
- Kulatilake, P.H.S.W, J Chen, J Teng, X Shufang, and G Pan. "Discontinuity Geometry

- Characterization in a Tunnel Close to the Proposed Permanent Shiplock Area of the Three Gorges Dam site in China." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics Abstract* 33, no. 3 (1996): 255-277.
- Kulatilake, P.H.S.W, J Chen, J Teng, X Shufang, and G Pan. "Discontinuity Geometry Characterization in a Tunnel Close to the Proposed Permanent Shiplock Area of the Three Gorges Dam site in China." *International Journal of Rock Mechanics, Mining & Geomechanics Abstract* 33, no. 3 (1996): 255-277.
- Kulatilake, P.H.S.W, T.H Wu, and D.N Wathugala. "Probabilistic Modeling of joint orientation." *Int. J. of Numerical & Analytical Methods in Geomechanics* 14 (1990b): 325-350.
- Kulatilake, P.H.S.W, Um Jeong-gi, Wang Mingyu, Escandon Richard F, and Narvaiz John. "stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA." *Engineering Geology* 70 (2003): 131-155.
- Kurmal, M. "Reliability – based optimization of a mine production system using genetic algorithms." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 (2005): 186-189.
- Ladanyi, B, and G Archambault. "simulation of shear behavior of a jointed rock mass." *Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, AIME, New York.* 1970. 105-125.
- Laslett, G.M. "Censoring and edge effect in areal and line transect sampling of rock joint traces." *Journal of Mathematical Geology* 14, no. 2 (1982): 125-140.
- Lin, CY, and P Hajela. "Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer design variables." *Engrg. Optim.* 19 (1992): 309-327.
- Liu, Wen-Kai, Rui-fang Wang, and Xiao-juna Zheng. "estimating coal reserves using a support vector machine." *JOURNAL OF CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY* 18 (2008): 103-106.
- MCCLay, K.R. "The mapping of geological structures 2nd edition, Open University Press London." 1989.

- Mercer, J. *Functions of positive and negative type and their connection with the theory of integral*. 1909.
- Meyer, T, and H.H Einstein. "Geologic Stochastic Modeling and Connectivity Assessment of Fracture Systems in the Boston Area." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 35, no. 1 (2002): 23-44.
- Michalewicz, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Springer, New York. 1996.
- Milanovic, P.T. *Karst Hydrogeology*. Water Resources publication. 1988.
- Milanovic, P.T. "Karst Hydrology WRP, Colorado, U.S.A." 1981.
- Muspartt, M.A. "Numerical statistics in engineering geology." *Engineering Geology* 6 (1972): 67-78.
- Nieto, A.S. "Some geologic factors in the location design and construction of large underground chambers in rock." *Proc. Rapid Exc. & Tunn.Conf. AIME* 1983. 1983. 569-596.
- Odling, N.E, et al. "Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoir." *Petroleum Geoscience* 5 (1999): 373-384.
- Palmstrom, A. "A rock mass characterization system for rock engineering purposes PhD thesis Oslo University, Norway." 1995, 400.
- Park, H.J, and T.R West. "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure." *Engineering Geology* 59 (2001): 223-251.
- Piteau, D.R. "Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock." *Proc. Symp. on Planning Open Pit Mines, Johannesburg, South Africa*. 1970. 33-53.
- Pratt, H.R, A.D Black, W.S Brown, and W.F. Brace. "The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstr* 9 (1972): 513-529.
- Price, N.J, and J.W Cosgrove. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University

- Press, Cambridge. 1990.*
- Priest, D Stephen. *Discontinuity analysis for rock engineering, London, Chapman & Hall. 1993.*
- Priest, D Stephen, and J.A Hudson. "Discontinuity spacing in rock." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract 13* (1976): 135-148.
- Priest, D Stephen, and J.A Hudson. "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract 18* (1981): 183-197.
- Rajeev, S, and CS Krishnamoorthy. "Discrete optimization of structures using genetic algorithms." *Struct. Engrg. ASCE 118* (1992): 1233-1250.
- Sari, Mehmet , Celal Karpuz, and Can Ayday. "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites." *Computers & Geosciences 36* (2010): 959-969.
- Sari, Mehmet. "the stochastic assessment of strength and deformability characteristics for apyroclastic rock mass." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46* (2009): 613-628.
- Selmer -Olsen, R. *Geology and engineering geology. (in Norwegian). Tapir, Trondheim, Norway. 1964.*
- Sharma, V.M, K.R Saxena, and R.D Woods. "Distinct element modeling in geomechanics." *Ballcema/Rotterdam, 1999: 823-829.*
- Shi, G. "Modeling rock joints and blocks by manifold method." *Proc. 33rd U.S. Symp. on Rock Mech., Santa Fe, New Mexico. 1992. 369-348.*
- Shi, G, and R.E Goodman. "Discontinuous deformation analysis-a new method for computing stress, strain and sliding of block systems." *Proc. 29th U.S Symp. on Rock Mech., Minneapolis, MN. 1988. 381-393.*
- Shojai, Kaveha N, F Mohammadi, and S.N Ashrafzadeh. "Prediction of cell voltage and current efficiency in a lab scale chlor-alkali membrane cell based on support

- vector machines." *Chemical Engineering Journal* 147 (2009): 161-172.
- Sivanandam, SN, and SN Deepa. *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
- Song, Jae-Joon, and Chung-In Lee. "Estimation of joint length distribution using window sampling." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 (2001): 519-528.
- Stephansson, O. "Modeling of rock mass. In G. Backblom and R. Stanfors (Editors). Interdisciplinary study of post-glacial faulting in the lansjarv area, Northern Sweden., Technical Report 89-31. Sweden Nuclear Fuel and Waste Management Co. Stockholm." 1989.
- Terzaghi, K. "Introduction to tunnel geology, In Rock tunneling with steel supports, by Proctor and White." 1946, 5-153.
- Vapnik, V. *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag, New York, USA. 1999.
- Vapnik, V.N. *Statistical learning theory*, New York: Wiley. 1998.
- Villaescusa, E, and ET Brown. "Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements." *Rock Mechanics & Rock Engineering* 25 (1992): 67-87.
- Wallis, R.F, and M.S King. "Discontinuity spacings in a crystalline rock." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 17, no. 1 (1980): 63-66.
- Wang, C, G.W Ma , J Zhao, and C.K Soh. "Identification of dynamic rock properties using a genetic algorithm." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, no. 3 (2004).
- Wang, WJ, ZB Xu, WZ Lu, and XY Zhang. "Determination of the spread parameter in the Gaussian kernel." 55 (2003): 643-663.
- Warburton, P.M. "a sterological interpretation of joint trace data." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract* 17 (1986): 181-190.

Weiss, Menachem. "Technique s for estimating fracture size: A comparison of methods." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 15 (2008): 460-466.

Wyllie, D.C. *Foundation on Rock, 2nd edn, Taylor and Francis, London, UK.* 1999.

Zhang, L, and H.H Einstein. "Estimating the mean trace length of rock discontinuities." *RRock Mechanics and Rock Engineering* 31, no. 4 (1998): 217-235.

Zhu, W, Li Shucai, Shuchen Li, Weizhong Chen, and C.F Lee. "Systematic numerical simulation of rock tunnel stability considering different rock conditions and construction effects." *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, no. 5 (2003): 531-536.

فخرایی, زهره". تاثیر نسبت تنش افقی به عمودی و جهت ناپیوستگی ها در پایداری تونل ها، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس. 1380."

مدنی, حسن. زمین شناسی ساختمانی و تکتونیک. انتشارات جهاد دانشگاهی - واحد طباطبایی, 1385.

نیک پیمان, یاسر". بررسی تاثیر خطواره ها بر روی جریان آب زیرزمینی در آبخوان های کارستی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه آب شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود". 1388.