

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی

برآورد مدل هندسی سه بعدی ناپیوستگی‌ها در توده سنگ بر اساس چگالی ناپیوستگی‌ها

نگارنده: حسن رضانی

اساتید راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر مهدی نوروزی

بهمن ۱۳۹۶

تقدیم به...

پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفقایشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

سپاس

سپاس از خداوند متعال که این راه را بر من هموار ساخت تا این پایان نامه را به سرانجام رسانم. از

استادان گران قدر، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مهدی نوروزی به عنوان اساتید

راهنما، که نگارنده را برای انجام این پژوهش راهنمایی نمودند کمال تشکر را دارم. همچنین بر خود واجب

دانم از جناب مهندس جواد نصری، سامان مشیری و مهدی اسماعیلی که با تأمین داده‌های میدانی و

برداشت‌های صحرائی از ساخت گاه سد کارون ۴، سد پارسیان و سد آزاد، راه را بر من هموار ساختند، تشکر

و قدر دانی نمایم.

تعهد نامه

این جانب حسن رضائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برآورد مدل هندسی سه بعدی شبکه ناپیوستگی های توده سنگ بر اساس چگالی خطی درزه داری تحت راهنمایی آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مهدی نوروزی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون 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 شاهرود می باشد 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 تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

چکیده

ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ از مهم‌ترین عوامل اثر گذار بر نرخ جریان سیال (نفت، آب و گاز)، مقاومت و پایداری توده سنگ و نیز نرخ نفوذ دستگاه TBM است. در بسیاری از مناطق امکان برداشت ناپیوستگی‌ها به دلیل عدم وجود رخنمون در سطح زمین وجود ندارد. در این حالت تنها راه برداشت اطلاعات هندسی شبکه ناپیوستگی‌ها، گمانه زدن در منطقه و بررسی ناپیوستگی‌ها در اعماق زمین است. گمانه‌ها بسیاری از اطلاعات موردنظر برای مدل‌سازی از جمله، شیب و جهت شیب (در صورتی که حفاری به صورت ژئوتکنیکی انجام نشده باشد) و طول اثر را در اختیار قرار نمی‌دهند. هدف اصلی در این پایان‌نامه، تخمین مدل هندسی شبکه ناپیوستگی‌های توده سنگ بر اساس کمترین اطلاعات حاصل از گمانه‌ها، یعنی چگالی خطی درزه‌داری است. به این منظور با استفاده از داده‌های سه منطقه سد مخزنی پارسیان، سد کارون ۴ و سد آزاد بر اساس اطلاعات مغزه‌های حفاری و برداشت سطحی، مدل‌سازی در پنج سطح از دقت انجام شده است. برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، ابتدا در اولین سطح، از فراوانی کلی ناپیوستگی‌ها و به ترتیب در سطوح بعدی اطلاعات فراوانی هر دسته درزه، بازشدگی، شیب و جهت شیب و اطلاعات برداشت سطحی اضافه شده است. درصد اعتبار مدل‌سازی بر اساس مقایسه‌ی بین شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در مدل شبیه‌سازی شده و مدل مبنا صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اطلاعات برداشت شده از شبکه ناپیوستگی‌ها، دقت مدل‌سازی افزایش می‌یابد. درصد خطا (اختلاف) هر سه منطقه‌ی مورد بررسی در مرحله اول ۴۶-۴۹، مرحله دوم ۳۵-۳۷، مرحله سوم ۱۲-۱۴، مرحله چهارم ۱۰-۱۲، مرحله پنجم ۲-۴ برآورد شده است. در سطح سوم از شبیه‌سازی نسبت به سطح چهارم تغییرات شدت حجمی و میزان اعتبار مدل به شدت افزایش می‌یابد که نشان دهنده حساسیت بیشتر اعتبار مدل‌سازی نسبت به طول اثر ناپیوستگی‌ها است. همچنین شیب و جهت شیب تاثیر چندانی بر روی شدت حجمی مدل نخواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا، چگالی درزه، مدل‌سازی هندسی

مقالات استخراج شده از پایان نامه:

- ۱- رضانی، حسن، جلالی، سید محمد اسماعیل، نوروزی، مهدی. بررسی روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها. اولین کنفرانس ملی مدل‌سازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی. اردیبهشت ۱۳۹۷.
- ۲- رضانی، حسن، جلالی، سید محمد اسماعیل، نوروزی، مهدی. برآورد مدل هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ بر اساس کمترین اطلاعات موجود.

فهرست مطالب

فصل اول- کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- سابقه موضوع ۳
- ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ۴
- ۴-۱- روش تحقیق ۵
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم- پیشینه تحقیق

- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها ۹
 - ۱-۲-۲- جهت داری ۹
 - ۲-۲-۲- اندازه ناپیوستگی (پایایی) ۱۰
 - ۳-۲-۲- پرشدگی ۱۰
 - ۴-۲-۲- بازشدگی ۱۱
 - ۵-۲-۲- شدت ناپیوستگی ۱۱
 - ۶-۲-۲- چگالی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها ۱۲
- ۳-۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها ۱۴
- ۴-۲- روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها ۲۰
 - ۱-۴-۲- رابطه‌ی میان چگالی سطحی و حجمی ۲۰
 - ۲-۴-۲- رابطه‌ی بین چگالی خطی و چگالی سطحی ۲۲
 - ۳-۴-۲- روابط تبدیل شدت ناپیوستگی در ابعاد مختلف ۲۳
 - ۴-۴-۲- رابطه‌ی میان فراوانی (شدت یک بعدی) و جهت‌داری ناپیوستگی ۳۴

- ۳۵ ۵-۴-۲- رابطه‌ی پایایی و طول اثر ناپیوستگی روی دیواره چال
- ۳۶ ۱-۵-۴-۲- شرایط برخورد چال و صفحه‌ی ناپیوستگی
- ۴۱ ۶-۴-۲- رابطه‌ی میان ν و RQD
- ۴۲ ۷-۴-۲- رابطه‌ی شدت حجمی و فاصله‌داری
- ۴۳ ۸-۴-۲- ارتباط بین بازشدگی و طول اثر
- ۴۶ ۹-۴-۲- رابطه‌ی بین ترند و پلانژ و شیب و جهت شیب
- ۴۷ ۱۰-۴-۲- رابطه‌ی چگالی خطی و فاصله‌داری
- ۴۹ ۱۱-۴-۲- رابطه‌ی بین بازشدگی و چگالی خطی ناپیوستگی
- ۵۰ ۵-۲- جمع‌بندی

فصل سوم- بررسی توابع منطبق بر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها

- ۵۲ ۱-۳- مقدمه
- ۵۳ ۲-۳- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌ها
- ۵۴ ۱-۲-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو
- ۵۴ ۲-۲-۳- توزیع جهت یافتگی
- ۵۵ ۳-۲-۳- چگالی حجمی درزه
- ۵۶ ۴-۲-۳- توزیع فاصله‌داری
- ۵۶ ۵-۲-۳- توزیع طول (پایایی)
- ۵۷ ۱-۵-۲-۳- توزیع لاگ نرمال
- ۵۷ ۲-۵-۲-۳- توزیع گاما
- ۵۸ ۶-۲-۳- توزیع بازشدگی ناپیوستگی‌ها
- ۵۸ ۷-۲-۳- موقعیت مکانی ناپیوستگی‌ها
- ۵۹ ۳-۳- آزمون‌های بهترین برازش
- ۶۱ ۵-۳- جمع‌بندی

فصل چهارم - موارد مطالعاتی

۶۴	۱-۴ - مقدمه
۶۴	۲-۴ - معرفی پروژه‌های مورد بررسی
۶۴	۱-۲-۴ - ساختگاه سد مخزنی پارسیان
۶۴	۱-۱-۲-۴ - موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی
۶۵	۲-۱-۲-۴ - خلاصه‌ای از زمین‌شناسی عمومی و مهندسی
۶۵	۳-۱-۲-۴ - واحدهای چینه‌شناسی
۶۶	۴-۱-۲-۴ - مطالعات میدانی
۶۷	۲-۲-۴ - ساختگاه سد کارون ۴
۶۷	۱-۲-۲-۴ - موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی
۶۸	۲-۲-۲-۴ - واحدهای چینه‌شناسی
۶۸	۳-۲-۲-۴ - زمین‌شناسی ساختمانی سد کارون ۴
۶۸	۴-۲-۲-۴ - مطالعات میدانی
۶۹	۳-۲-۴ - ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد
۶۹	۱-۳-۲-۴ - موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی
۶۹	۲-۳-۲-۴ - زمین‌شناسی عمومی
۷۱	۳-۳-۲-۴ - زمین‌شناسی ساختمانی
۷۱	۴-۳-۲-۴ - مطالعات میدانی
۷۲	۳-۴ - توابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها
۷۲	۱-۳-۴ - ساختگاه سد مخزنی پارسیان
۷۳	۱-۱-۳-۴ - توزیع جهت‌داری
۷۴	۲-۱-۳-۴ - توزیع طول خط اثر (پایایی) ناپیوستگی‌ها
۷۷	۳-۱-۳-۴ - توزیع بازشدگی
۷۹	۴-۱-۳-۴ - شدت خطی ناپیوستگی‌ها (P_1)
۷۹	۲-۳-۴ - سد کارون ۴

- ۷۹..... ۴-۳-۲-۱- توزیع جهت‌داری
- ۸۰..... ۴-۳-۲-۲- توابع توزیع آماری طول خط اثر ناپیوستگی‌ها
- ۸۲..... ۴-۳-۲-۳- توزیع بازشدگی
- ۸۴..... ۴-۳-۲-۴- شدت خطی ناپیوستگی‌ها (P_1)
- ۸۵..... ۴-۳-۳- سد آزاد
- ۸۵..... ۴-۳-۳-۱- توزیع جهت‌داری
- ۸۶..... ۴-۳-۳-۲- توزیع طول اثر
- ۸۸..... ۴-۳-۳-۳- توزیع بازشدگی
- ۹۰..... ۴-۳-۳-۴- شدت خطی ناپیوستگی‌ها (P_1)
- ۹۰..... ۴-۴- جمع‌بندی

فصل پنجم- مدل سازی بندی

- ۹۲..... ۵-۱- مقدمه
- ۹۲..... ۵-۲- روش مدل سازی
- ۹۵..... الف- مدل سازی مبتنی بر P_1 کلی در امتداد خط برداشت
- ۹۶..... ب- مدل سازی مبتنی بر P_1 هر دسته‌درزه
- ۹۶..... پ- مدل سازی مبتنی بر P_1 و اندازه‌گیری بازشدگی بر روی مغزه‌ها
- ۹۶..... ت- مدل سازی مبتنی بر P_1 ، بازشدگی و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها
- ۹۷..... ج- مدل سازی مبتنی بر اطلاعات مغزه حفاری و امکان برداشت سطحی
- ۹۷..... ۵-۲- تولید شبکه ناپیوستگی‌ها
- ۹۷..... ۵-۲-۱- اندازه حجم معرف
- ۹۹..... ۵-۲-۲- مدل سازی ناپیوستگی‌ها
- ۱۰۳..... ۵-۲-۳- رابطه‌ی تجربی میان P_1 و P_{22}
- ۱۰۶..... ۵-۲-۴- مراحل مدل سازی ناپیوستگی‌ها
- ۱۰۶..... ۵-۲-۴-۱- مدل سازی مبتنی بر P_1 کلی خط برداشت
- ۱۰۹..... ۵-۲-۴-۲- مدل سازی مبتنی بر P_1 هر دسته‌درزه در طول خط برداشت

- ۱۱۱ ۳-۴-۲-۵ مدل سازی مبتنی بر P_1 و اندازه گیری بازشدگی بر روی مغزه های حفاری
- ۱۱۳ ۴-۴-۲-۵ مدل سازی مبتنی بر P_1 ، بازشدگی و جهت داری ناپیوستگی ها
- ۱۱۵ ۵-۴-۲-۵ مدل سازی مبتنی بر اطلاعات حفاری و امکان برداشت سطحی
- ۱۱۷ ۵-۲-۵ اعتبار سنجی مدل
- ۱۲۰ ۳-۵ جمع بندی

فصل ششم - نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۲۲ ۱-۶ مقدمه
- ۱۲۲ ۲-۶ نتایج
- ۱۲۳ ۳-۶ پیشنهادها
- ۱۲۴ منابع و مراجع

فهرست اشکال:

- شکل ۱-۲: اندازه‌گیری شدت خطی ناپیوستگی در بررسی‌های سطحی و عمقی..... ۱۱
- شکل ۲-۲: روش خط برداشت ناپیوستگی..... ۱۳
- شکل ۳-۲: پنجره‌ی برداشت نشان‌دهنده‌ی اثر ناپیوستگی‌ها..... ۱۶
- شکل ۴-۲: نمایش تعداد برخوردهای مورد انتظار در پنجره‌ی برداشت..... ۱۸
- شکل ۵-۲: برداشت پنجره‌ی دایره‌ای..... ۱۹
- شکل ۶-۲: (الف) حجم بلوک (ب) موقعیت درزه‌های U و V..... ۲۱
- شکل ۷-۲: دید کلی از فرکانس خطی، ناحیه‌ای و اندازه ناپیوستگی‌ها..... ۲۳
- شکل ۸-۲: نمونه برداری ناحیه‌ای درزه‌های ناپایا..... ۲۵
- شکل ۹-۲: نمونه برداری خطی ناپیوستگی‌های ناپایا..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲: زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و راستای چال..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲: نمایش زوایای α و β ۲۹
- شکل ۱۲-۲: محاسبه ضریب یک‌بعدی وانگ..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲: محاسبه‌ی ضریب دوبعدی وانگ..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲: وابستگی اندازه چگالی سطحی به ابعاد ناحیه‌ی مورد بررسی..... ۳۲
- شکل ۱۵-۲: اندازه شدت ناپیوستگی در سه بعد..... ۳۳
- شکل ۱۶-۲: برخورد چال و ناپیوستگی‌ها..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲: برخورد کامل و ناقص ناپیوستگی با چال..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲: نمونه‌ی بازشده‌ی چال و اثر برخوردهای کامل و ناقص سینوسی ناپیوستگی..... ۳۷
- شکل ۱۹-۲: تصویر ناپیوستگی بر روی صفحه‌ی افق..... ۳۸
- شکل ۲۰-۲: برخورد ناپیوستگی و چال بر روی صفحه‌ی افق..... ۳۹
- شکل ۲۱-۲: جواب معادله‌ی اندازه ناپیوستگی..... ۴۰
- شکل ۲۲-۲: نسبت بازشدگی به طول اثر در مقادیر مختلف ممان دوم..... ۴۶
- شکل ۲۳-۲: اندازه‌ی یک و دوبعدی شدت ناپیوستگی..... ۴۸
- شکل ۲۴-۲: عدم وابستگی S و P_1 به اندازه ناپیوستگی..... ۴۹
- شکل ۲۵-۲: رابطه‌ی بازشدگی و شدت..... ۵۰

- شکل ۳-۱ : شبیه‌سازی تصادفی سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ با روش مونت کارلو..... ۵۴
- شکل ۳-۲ : موقعیت مرکز درزه‌ها در یک مدل سه‌بعدی ۵۹
- شکل ۴-۱ : موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی ساختگاه سد پارسیان ۶۵
- شکل ۴-۲ : موقعیت جغرافیایی سد کارون ۴..... ۶۷
- شکل ۴-۳ : موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به محدوده سد آزاد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آن ۶۹
- شکل ۴-۴ : نمایی از عوارض ریخت‌شناختی و آبراهه‌های موجود در ساختگاه سد آزاد ۷۰
- شکل ۴-۵ : جدایش دسته ناپیوستگی‌ها در نرم افزار D ps ۷۳
- شکل ۴-۶ : رتبه بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی دسته ناپیوستگی‌ها..... ۷۵
- شکل ۴-۷ : تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۱ (سد مخزنی پارسیان)..... ۷۵
- شکل ۴-۸ : تابع توزیع نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۲ (سد مخزنی پارسیان)..... ۷۶
- شکل ۴-۹ : تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۳ (سد مخزنی پارسیان)..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰ : تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۴ (سد مخزنی پارسیان)..... ۷۶
- شکل ۴-۱۱ : نتایج بهترین برازش بازشدگی دسته ناپیوستگی‌ها سد مخزنی پارسیان..... ۷۸
- شکل ۴-۱۲ : تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پارسیان..... ۷۸
- شکل ۴-۱۳ : تعداد دسته‌درزه‌های ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار دیپس ۸۰
- شکل ۴-۱۴ : اولویت‌بندی توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته ناپیوستگی‌های سد کارون ۴..... ۸۱
- شکل ۴-۱۵ : توابع توزیع برازش شده بر طول خط اثر دسته ناپیوستگی‌ها ۱ (کارون ۴)..... ۸۱
- شکل ۴-۱۶ : تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۲ (کارون ۴)..... ۸۲
- شکل ۴-۱۷ : تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۳ (کارون ۴)..... ۸۲
- شکل ۴-۱۸ : اولویت‌بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی ناپیوستگی‌های سد کارون ۴ ۸۳
- شکل ۴-۱۹ : تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۱ (سد کارون ۴)..... ۸۴
- شکل ۴-۲۰ : تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۲ (سد کارون ۴)..... ۸۴
- شکل ۴-۲۱ : تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۳ (سد کارون ۴)..... ۸۴
- شکل ۴-۲۲ : جدایش دسته ناپیوستگی‌ها بر روی شبکه‌ی استریونت (سد آزاد)..... ۸۵
- شکل ۴-۲۳ : نمودار بهترین تابع توزیع طول اثر دسته ناپیوستگی‌ها (سد آزاد)..... ۸۶
- شکل ۴-۲۴ : تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۱ (سد آزاد)..... ۸۷

- شکل ۴-۲۵: تابع توزیع برآزش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۲ (سد آزاد)..... ۸۷
- شکل ۴-۲۶: تابع توزیع برآزش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۳ (سد آزاد)..... ۸۸
- شکل ۴-۲۷: توابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی‌ها (سد آزاد)..... ۸۹
- شکل ۴-۲۸: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۱ (سد آزاد)..... ۸۹
- شکل ۴-۲۹: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۲ (سد آزاد)..... ۸۹
- شکل ۴-۳۰: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۳ (سد آزاد)..... ۹۰
- شکل ۵-۱: روند مدل سازی..... ۹۴
- شکل ۵-۲: نقاط برخورد ناپیوستگی‌ها با خط برداشت..... ۹۵
- شکل ۵-۴: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد پارسیان)..... ۹۸
- شکل ۵-۵: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد کارون ۴)..... ۹۸
- شکل ۵-۶: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد آزاد)..... ۹۸
- شکل ۵-۷: شبکه‌ی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پارسیان..... ۱۰۰
- شکل ۵-۸: شبکه ناپیوستگی‌های سد مخزنی کارون ۴..... ۱۰۰
- شکل ۵-۹: شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۰: چال‌ها و رخنمون‌های عمودی و افقی..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۱: ترکیب ناپیوستگی‌ها و گمانه‌ها..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۲: برخورد ناپیوستگی‌ها با مقطع افقی در محدوده احداث سد کارون ۴..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۳: ارتباط میان شدت یک و سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد پارسیان..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۴: ارتباط میان شدت یک و سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد کارون ۴..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۵: ارتباط میان شدت یک و سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد آزاد..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۶: تغییرات شدت خطی و حجمی گمانه‌ها بر اساس شماره گمانه..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۷: شبکه‌ی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پارسیان در مرحله اول..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۸: توزیع ناپیوستگی‌ها در راستای گمانه بر اساس چگالی خطی گمانه..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۹: شبکه ناپیوستگی‌های کارون ۴..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۰: شبکه ناپیوستگی‌های مرحله اول سد آزاد..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۱: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد پارسیان در مرحله دوم..... ۱۱۰

- شکل ۵-۲۲: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد کارون ۴ در مرحله دوم ۱۱۰
- شکل ۵-۲۳: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد آزاد در مرحله دوم ۱۱۱
- شکل ۵-۲۴: شبکه ناپیوستگی‌های سد پارسیان در مرحله سوم ۱۱۲
- شکل ۵-۲۵: شبکه ناپیوستگی‌های کارون ۴ در مرحله سوم ۱۱۲
- شکل ۵-۲۶: شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد در مرحله سوم ۱۱۳
- شکل ۵-۲۷: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد پارسیان در مرحله چهارم ۱۱۴
- شکل ۵-۲۸: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد کارون ۴ در مرحله چهارم ۱۱۴
- شکل ۵-۲۹: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد آزاد در مرحله چهارم ۱۱۵
- شکل ۵-۳۰: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های سد پارسیان ۱۱۶
- شکل ۵-۳۱: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های محل احداث سد کارون ۴ ۱۱۶
- شکل ۵-۳۲: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد ۱۱۶
- شکل ۵-۳۳: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد پارسیان ۱۱۷
- شکل ۵-۳۴: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد کارون ۴ ۱۱۸
- شکل ۵-۳۵: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد آزاد ۱۱۸

فهرست جداول:

- جدول ۱-۲: تعریف مفاهیم شدت، چگالی و تخلخل ناپیوستگی‌ها ۱۲
- جدول ۲-۲: رابطه‌ی میان ثابت فیشر و زاویه‌ی ρ ۳۰
- جدول ۳-۲: رابطه‌ی میان ثابت فیشر و زاویه‌ی ρ ۳۱
- جدول ۱-۴: پارامترهای هندسی دسته ناپیوستگی‌های برداشت‌شده ۷۴
- جدول ۲-۴: مقادیر مربوط به بازشدگی حاصل از برداشت‌های میدانی و گمانه‌ها ۷۷
- جدول ۳-۴: چگالی خطی ناپیوستگی‌ها برای سد مخزنی پارسیان ۷۹
- جدول ۴-۴: مشخصات دسته ناپیوستگی‌های سد کارون ۴ (میانگین شیب، جهت شیب و ثابت فیشر) ۸۰
- جدول ۵-۴: شدت خطی دسته ناپیوستگی‌ها (سد کارون ۴) ۸۴
- جدول ۶-۴: مشخصات جهت‌داری دسته ناپیوستگی‌های سد آزاد ۸۵

- جدول ۴-۷: شدت‌های خطی دسته ناپیوستگی‌ها (سد آزاد)..... ۹۰
- جدول ۵-۱: مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها برای هر سه مورد مطالعاتی..... ۹۹
- جدول ۵-۲: محاسبه شدت یک و سه‌بعدی در مدل جهت استخراج رابطه‌ی تجربی..... ۱۰۴
- جدول ۵-۳: شدت‌های شبیه‌سازی شده در مدل ناپیوستگی‌های سد پارسیان..... ۱۰۸
- جدول ۵-۴: شدت‌های شبیه‌سازی شده در مدل ناپیوستگی‌های سد کارون ۴..... ۱۰۸
- جدول ۵-۵: شدت خطی و حجمی ثانویه سد آزاد در مرحله اول..... ۱۰۹
- جدول ۵-۶: شدت‌های خطی و حجمی مدل شبیه‌سازی شده..... ۱۱۱
- جدول ۵-۷: شدت‌های خطی و حجمی موارد مطالعاتی در مرحله سوم..... ۱۱۳
- جدول ۵-۸: شدت‌های خطی و حجمی در مرحله چهارم..... ۱۱۵
- جدول ۵-۹: شدت‌های خطی و حجمی ناپیوستگی‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی شده..... ۱۱۷
- جدول ۵-۱۰: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد پارسیان)..... ۱۱۹
- جدول ۵-۱۱: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد کارون ۴)..... ۱۱۹
- جدول ۵-۱۲: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد آزاد)..... ۱۱۹

فصل اول

کلیات

در بسیاری از کاربردهای مهندسی، ناپیوستگی‌ها عامل بحرانی در تعیین رفتار توده سنگ هستند. ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مشخصات جریان سیال (نفت، آب و گاز)، مقاومت و پایداری توده سنگ و نرخ نفوذ^۱ TBM است.

برای ارزیابی ناپیوستگی‌ها، باید اطلاعات مورد نظر از منطقه بر اساس برداشت خطی یا پنجره‌ای حاصل شود. با استفاده از این اطلاعات و توابع توزیع آماری ناپیوستگی‌ها می‌توان مدلی دقیق از شبکه هندسی ناپیوستگی‌ها بر اساس روش شبکه ناپیوستگی‌های مجزا (DFN^۲) تولید نمود. مشکلی که عمدتاً در خصوص ارزیابی ناپیوستگی‌ها وجود دارد، عدم دسترسی به اطلاعات کامل پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها است. در بسیاری از موارد تنها اطلاعات موجود، اطلاعات حاصل از گمانه‌ها است. مشکلاتی که برداشت از گمانه نسبت به برداشت سطحی دارد، در دسترس نبودن برخی از پارامترهای هندسی همچون طول اثر، شیب و جهت شیب (در صورتی که گمانه‌ها به صورت ژئوتکنیکی برداشت نشود) است. تنها اطلاعات موجود در طول گمانه در این شرایط، فراوانی ناپیوستگی‌ها و در برخی مواقع پرشدگی و بازشدگی است. در ارزیابی مغزه‌های حاصل از گمانه‌ها، حتی در مورد فاصله‌داری ممکن است مشکلاتی بروز نماید، زیرا در هنگام مغزه‌گیری و یا جابجایی، ممکن است مغزه‌ها دچار شکستگی ثانویه شوند.

طراحی مدل سه بعدی دقیق از شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها، برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش زمان انجام عملیات معدنی یا عمرانی و افزایش ایمنی بسیار مفید و کمک کننده است. بنابراین با فرض برداشت دقیق فاصله‌داری و دیگر ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها بر اساس اطلاعات محدود

^۱ Tunnel boring machin

^۲ Discrete Fracture Network

برداشت شده از گمانه‌ها لازم است به منظور دستیابی به مدلی سه بعدی، روابط موجود بررسی و روابط جدیدی برای رسیدن از اطلاعات یک‌بعدی به اطلاعات سه‌بعدی گسترش داد.

۱-۲- سابقه موضوع

مدل‌های تصادفی شبکه ناپیوستگی‌ها، طبیعت ناهمگن توده سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از آرایه شبکه‌ای از ناپیوستگی به صورت عناصری گسسته در فضا با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور تصادفی تعریف شده‌اند، نمایش می‌دهد. مطالعات هادسون^۱ و لاپونته^۲ در سال ۱۹۸۰ و رابینسون^۳ در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوش و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی دانست (Fox and Forchhammer, 2012).

پریست^۴ و هادسون (۱۹۷۹)، آندرسون^۵ و همکاران (۱۹۸۴) و هلیوت^۶ و همکاران (۱۹۸۸) با در نظر گرفتن خط برداشت و اندازه‌گیری فراوانی ناپیوستگی‌ها، مدلی سه‌بعدی و ناپایا از ناپیوستگی‌ها ارائه نمودند (Priest, 1993).

ترزاقی^۷ در سال (۱۹۶۵) با فرض ناپیوستگی‌های موازی، روابطی برای مدل‌سازی سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها با استفاده از فراوانی ناپیوستگی‌ها به دست آورد. در این روابط تنها از زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و راستای خط برداشت استفاده شده است.

ویلاسکوز^۸ (۱۹۹۳)، کولاتیلاک^۱ و همکاران (۱۹۹۳)، برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در حالت سه‌بعدی، درزه‌ها را به صورت دیسک‌هایی در فضا جانمایی نمودند. انجام این کار، نیاز به اطلاعاتی نظیر مرکز

^۱Hodson

^۲ La Pointe

^۳ Robinson

^۴ Priest

^۵ Anderson

^۶ Huloet

^۷ Terzaghi

^۸ Velasques

دیسک، جهت‌داری و قطر ناپیوستگی دارد که به ترتیب توسط تابع توزیع پواسون، تابع توزیع فیشر و تابع توزیع لاگ نرمال پیاده‌سازی می‌شوند. درشواویتز^۲ (۱۹۹۸) با بررسی شدت خطی، سطحی و حجمی ناپیوستگی‌ها به‌عنوان پارامترهای هندسی توده سنگ، روابطی برای ساخت مدل‌های یک، دو و سه‌بعدی بدست آورد (Mauldon and Dershowitz, 2000).

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

ناپیوستگی‌ها در نرخ پیشروی پروژه‌های تونل‌زنی، امکان‌پذیری روش‌های زیرزمینی همچون تخریب بلوکی و یا برای تخمین آنگذری و دیگر موارد مرتبط نقش اساسی دارند، بنابراین مدل کردن شبکه ناپیوستگی‌ها برای تصمیم‌گیری در مورد هر پدیده بسیار کمک‌کننده خواهد بود. در روش مورد بررسی، هدف رسیدن به ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها در دو و سه بعد با استفاده از ویژگی‌های هندسی یک بعدی است. این مساله در شرایطی که ناپیوستگی‌ها هیچ‌گونه رخنمونی بر روی سطح زمین ندارند، اهمیت بسیار زیادی دارد. در این وضعیت تنها استفاده از حفر گمانه و بررسی ناپیوستگی‌ها در عمق امکان‌پذیر است. در صورت بررسی مغزه‌های حفاری، تنها به فراوانی ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری، بازشدگی و جهت‌داری (در صورت حفر گمانه به روش ژئوتکنیکی) می‌توان دست یافت. طول اثر به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر ناپیوستگی و به تبع آن شدت سه بعدی ناپیوستگی‌ها، در این شرایط نامعلوم است. بنابراین لازم است محاسبه طول اثر بر اساس بازشدگی با توجه به روابط موجود بررسی گردد. همچنین تاکنون ارتباط بسیاری از پارامترهای هندسی درزه با یکدیگر، از جمله ارتباط طول اثر و جهت‌داری یا طول اثر و فاصله‌داری و یا بازشدگی و جهت‌داری مجهول است. لذا ضروری است که بتوان بر اساس کمترین اطلاعات موجود، تخمینی از وضعیت سه بعدی شبکه ناپیوستگی‌ها ارائه داد.

^۱ Kulatilake

^۲ Dershowitz

۱-۴- روش تحقیق

در این مطالعه توده سنگ ساخت‌گاه‌های سد مخزنی پارسیان، سد کارون ۴ و سد آزاد به‌عنوان موارد مطالعاتی در نظر گرفته‌شده و به منظور تهیه مدل شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا، برداشت‌های میدانی از مناطق، صورت گرفته است. در اولین گام با مطالعات کتابخانه‌ای روابط موجود بین مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها استخراج می‌شود. برای هر کدام از ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها، توابع توزیع آماری استخراج می‌شود و در مراحل بعدی مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از بررسی روابط موجود میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها، در صورت نیاز برقراری ارتباط بین پارامترهایی همچون طول اثر و فراوانی ناپیوستگی‌ها و در نظر گرفتن فرضیاتی جدید در مدل‌سازی ضروری است. پس از استخراج روابط بین پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها همانند طول اثر و بازشدگی، شدت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ناپیوستگی‌ها، مدل‌های سه بعدی از وضعیت ناپیوستگی‌های مناطق بر اساس سطوح مختلفی از دسترسی به اطلاعات ساخته می‌شود. برای اعتبارسنجی، مدل‌های جدید ساخته‌شده با مدل کامل ناشی از برداشت سطحی و عمقی مقایسه می‌شود. در این شرایط، اعتبارسنجی از جنبه‌های گوناگونی قابل بررسی است. یکی از این جنبه‌ها مقایسه‌ی P_{10} در طول یک راستای خاص در هر دو مدل است. جنبه‌ی دیگر مقایسه‌ی P_{21} در یک صفحه‌ی برداشت است. در نهایت بهترین نوع اعتبارسنجی، محاسبه‌ی P_{32} در هر دو مدل و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر است. در این تحقیق از روش سوم یعنی مقایسه‌ی میزان شدت درزه‌داری سه‌بعدی در هر دو مدل استفاده شده است.

۱-۵- ساختار پایان نامه

مطالب ارائه شده در این نوشتار در ۶ فصل گنجانده شده است.

- در فصل اول کلیات این تحقیق شامل مقدمه، هدف، ضرورت، روش تحقیق و خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی شبکه شکستگی‌های توده سنگ درزه‌دار در سه بعد با استفاده از اطلاعات یک‌بعدی ارائه شده است.
- در فصل دوم پیشینه‌ی تحقیق و روابط موجود میان ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و هر کدام به صورت جداگانه شرح داده شده است.
- در فصل سوم توابع توزیع پارامترهای هندسی و دامنه‌ی استفاده از هر تابع برای پیاده‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفته است.
- در فصل چهارم موقعیت‌های جغرافیایی، راه‌های دسترسی و ویژگی‌های زمین‌شناسی موارد مطالعاتی به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته است. سپس برای هر مورد مطالعاتی، توابع توزیع ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها با استفاده از نرم افزار easy-fit استخراج گردیده است.
- در فصل پنجم در ۵ سطح از دقت مدل‌سازی در نرم افزار 3DEC انجام شده است. سطح اول مدل‌سازی با استفاده از شدت خطی کلی در طول خط برداشت، سطح دوم بر اساس شدت خطی هر دسته درزه، سطح سوم با افزودن بازشدگی ناپیوستگی‌ها، سطح چهارم با اضافه کردن جهت‌داری و سطح پنجم با در نظر گرفتن امکان برداشت سطحی از رخنمون ناپیوستگی‌ها علاوه بر برداشت عمقی صورت گرفته است. برای اعتبار سنجی، تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله به صورت نمودار با یکدیگر مقایسه شده است.
- در فصل ششم به جمع‌بندی نتایج کلی از این تحقیق پرداخته شده و محورهای مطالعاتی آتی پیشنهاد شده است.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

اصطلاح ناپیوستگی اولین بار در حدود نیم قرن پیش توسط بعضی از پژوهشگران برای پوشش تمام نقایص مکانیکی که در سنگ موجود است پذیرفته شد. ناپیوستگی به‌طور کلی به صورت هر نوع شکستگی مکانیکی قابل توجه و یا شکستگی‌ها بدون در نظر گرفتن نیروی کششی در سنگ تعریف می‌شوند و منظور از شبکه ناپیوستگی، ترکیب ساختاری سه‌بعدی از ناپیوستگی‌ها است.

توده سنگ‌ها معمولاً دارای شکستگی‌ها، ریزترک‌ها، گسل‌ها، صفحات لایه‌بندی و دیگر نقص‌های مکانیکی هستند که توسط فرایندهای زمین‌شناسی ایجاد می‌شوند.

بررسی دقیق شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها، امکان کنترل ذخیره‌سازی نفت و گاز، نرخ نفوذ TBM و دیگر رفتارهای مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ را فراهم می‌کند. خصوصیات سیستم‌های ناپیوستگی برای درک و تجزیه و تحلیل تأثیرات آن بر رفتار توده سنگ اهمیت زیادی دارند. اطلاعات برداشت ناپیوستگی‌های سطحی مدت زمان زیادی است که توسط مهندسان و زمین‌شناسان برای مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی برای ناپیوستگی‌های زیرسطحی که از گمانه‌ها، چاه‌ها، تونل‌ها حاصل شده، معمولاً نمونه‌های با کیفیت در دسترس نیست.

در دسترس نبودن نمونه‌های با کیفیت ناپیوستگی‌ها در عمق زمین امکان ساخت مدل سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها را بسیار دشوار می‌کند. بنابراین در این فصل روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها استخراج شده است و از این روابط برای مدل‌سازی شبکه سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها استفاده شده است.

۲-۲- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

در این بخش ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها همچون جهت‌داری^۱، اندازه^۲ ناپیوستگی، پرشدگی^۳، بازشدگی^۴، شدت ناپیوستگی، چگالی و فاصله‌داری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲-۱- جهت‌داری

جهت‌داری می‌تواند توسط امتداد، شیب و جهت شیب و یا جهت نرمال صفحه‌ی ناپیوستگی‌ها نشان داده شود. روش‌های مورد استفاده برای نشان دادن جهت‌داری سه بعدی شامل طرح‌های استریوگراف و نیم کره مندرج است (Duncan, 1981). یک خط را به وسیله یک نقطه و یک سطح را به وسیله یک منحنی در سطح نیم کره (صفحات دایره‌ای مشبک) می‌توان نشان داد. کل ناپیوستگی‌های یک دسته درزه، موازی هم فرض می‌شوند در حالی که در واقعیت چنین نیست (Chen and Tonon, 2012). جهت‌داری یکی از مهم‌ترین پارامترهای ناپیوستگی‌ها است. به دلیل مشکل بودن محاسبه‌ی جهت‌داری کل ناپیوستگی‌ها، ضروری است که جهت‌داری در محل‌هایی چون رخنمون‌ها، گمانه‌ها و ترانسه‌ها اندازه‌گیری شود و بر اساس یک مدل آماری ارایه شود. پژوهشگران تعدادی از توابع توزیع آماری را که از تطابق خوبی با داده‌های جهت‌داری برخوردارند، مانند توزیع فیشر، توزیع بینگهام و توزیع نرمال نام برده‌اند. در یک تحلیل اساسی از جهت‌داری‌های آماری، فرض می‌شود که مقادیر جهت‌داری حول برخی مقادیر حقیقی (نزدیک به واقعیت) توزیع شده‌اند. این فرض معادل با ناپیوستگی‌های طبیعی توزیع شده است (Chen and Tonon, 2012).

¹ Orientation

² Size

³ Filling

⁴ Opening

۲-۲-۲- اندازه ناپیوستگی (پایایی)

محاسبه اندازه ناپیوستگی‌ها (پایایی) بسیار مشکل است، زیرا تنها در حالتی که توده سنگ کاملاً عاری از هر نوع پوششی باشد، اندازه‌گیری سطح کامل هر ناپیوستگی ممکن می‌شود. در عین حال این امکان به هیچ وجه با طبیعت توده سنگ سازگار نیست (Priest, 2012). شکل ناپیوستگی‌ها می‌تواند به صورت دیسک‌های دایره‌ای، بیضی، مربع، مستطیل و چند ضلعی در نظر گرفته شود. به دلیل مشکلات موجود در نمونه‌برداری سه بعدی ناپیوستگی‌ها، فرضیه‌های آرایه شده در مورد شکل آن‌ها، قابل اثبات یا رد نیستند. معمولاً فرضیه‌های دیسکی یا مستطیلی شکل بودن ناپیوستگی‌ها به عنوان صفحات نامحدود تیغه مانند، شکاف مانند و پولکی شکل، در اکثر موارد صدق می‌کند. در اندازه‌گیری ناپیوستگی‌ها، طول اثر که فصل مشترک شکستگی و رخنمون است اغلب به جای طول واقعی اندازه‌گیری می‌شود. مشخصات و پارامترهای اندازه ناپیوستگی‌ها را می‌توان به وسیله‌ی شکل، بعد صفحه‌ای یا سطحی (ارتفاع، قطر، طول اثر و ...)، بعد جنبشی یا حرکتی (بازشدگی، جابجایی، بالازدگی و پایین رفتگی) و بعد فضایی (فاصله داری و فراوانی) توصیف کرد (Ozkaya, 2003).

۲-۲-۳- پرشدگی

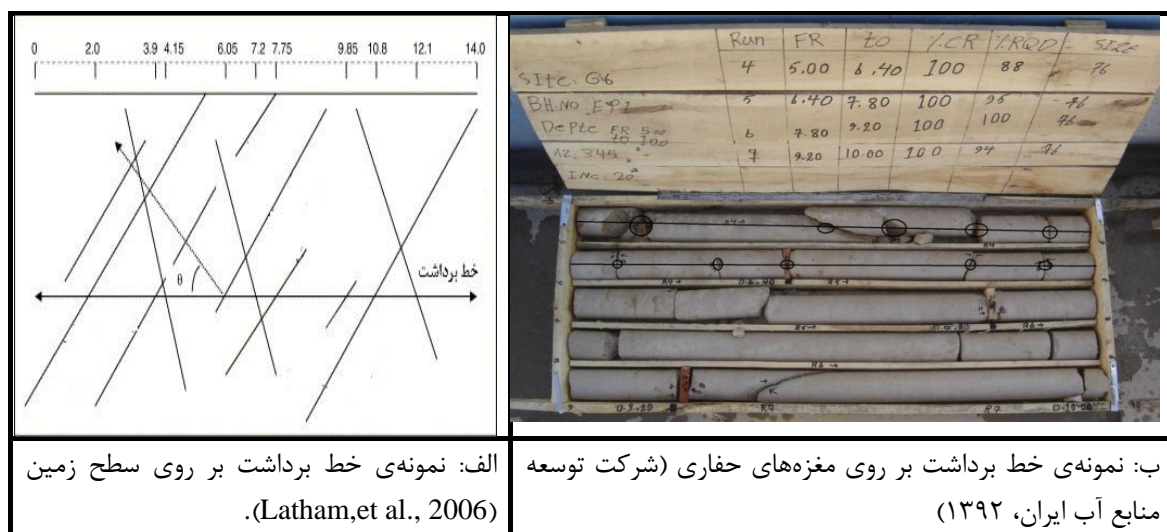
سیمانی شدن (پرشدگی) شامل فرایند ته‌نشینی اجزای معدنی محلول در آب، در شکاف‌های توده سنگ است. مواد پرکننده ممکن است شامل سیلیکا، کربنات‌ها، اکسیدهای آهن یا رس‌ها باشد. پرشدگی یا سیمانی شدن در ناپیوستگی‌ها در نواحی دارای آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد و یک فرایند دینامیکی و کم و بیش معادل با فرایندهای حل‌شدگی و غیر حل‌شدگی است. درجه عدم پرشدگی فضاهای منفذی بزرگ، عامل موثری در تراوایی شبکه ناپیوستگی‌ها است (Chen and Tonon, 2012).

۴-۲-۲- بازشستگی

بازشستگی به فاصله‌ی میان دو لبه‌ی ناپیوستگی گفته می‌شود. این پارامتر در مدل‌های هیدرومکانیکی جهت محاسبه‌ی نفوذپذیری و دبی آب ورودی استفاده می‌گردد. در بسیاری از موارد این پارامتر را نمی‌توان به‌صورت دقیق و واقعی، به دلیل جابجایی‌های صورت گرفته بر روی ناپیوستگی‌ها، محاسبه کرد. میان بازشستگی تفاوت‌هایی از نظر عبور جریان از آن‌ها وجود دارد. در صورتی که این بازشستگی‌ها به‌اندازه‌ای باشد که با چشم در سطح رخنمون دیده شود و ناشی از حفاری نباشند، باز محسوب شده و در حکم مسیری برای عبور جریان آب هستند (Fox and Forchhammer, 2012).

۵-۲-۲- شدت ناپیوستگی

تعریف شدت ناپیوستگی در ابعاد مختلف به‌طور خلاصه در جدول (۱-۲) بیان شده است. اندازه‌گیری شدت حجمی ناپیوستگی در واقعیت بسیار مشکل است. بنابراین با استفاده از روابط موجود و بر اساس مدل‌های آماری می‌توان شبکه‌ی سه بعدی ناپیوستگی‌ها را مشخص کرد. شدت خطی ناپیوستگی یا فراوانی، حاصل تقسیم تعداد ناپیوستگی‌هایی که با خط برداشت برخورد دارند بر طول خط برداشت است. خط برداشت می‌تواند به صورت سطحی و یا بررسی‌های عمقی صورت گیرد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: اندازه‌گیری شدت خطی ناپیوستگی در بررسی‌های سطحی و عمقی (الف: روی سطح زمین ب: روی

مغزه‌های حفاری).

جدول ۲-۱: تعریف مفاهیم شدت، چگالی و تخلخل ناپیوستگی‌ها (Mauldon and Dershowitz, 2000).

بعد	صفر	۱	۲	۳
صفر	$P_{00} (\text{Length}^0)$ تعداد نقاط ناپیوستگی بر واحد نقطه‌ی توده سنگ			
۱	$P_{10} (\text{Length}^{-1})$ تعداد نقاط ناپیوستگی بر واحد طولی خط برداشت (فرکانس یا چگالی خطی)	$P_{11} (\text{Length}^0)$ طول تقاطع‌های ناپیوستگی‌ها بر طول خط برداشت (تخلخل خطی)		
۲	$P_{20} (\text{Length}^{-2})$ تعداد مراکز آثار ناپیوستگی‌ها بر واحد سطح نمونه (چگالی سطحی)	$P_{21} (\text{Length}^{-1})$ طول آثار ناپیوستگی‌ها بر واحد سطح نمونه (شدت سطحی)	$P_{22} (\text{Length}^0)$ مساحت ناپیوستگی‌ها بر واحد سطح نمونه (تخلخل سطحی)	
۳	$P_{30} (\text{Length}^{-3})$ تعداد مراکز ناپیوستگی بر واحد حجم نمونه (چگالی حجمی)	$P_{31} (\text{Length}^{-1})$ قطر ناپیوستگی‌ها بر واحد حجم نمونه (شدت خطی)	$P_{32} (\text{Length}^{-1})$ مساحت ناپیوستگی‌ها بر واحد حجم نمونه (شدت حجمی)	$P_{33} (\text{Length}^0)$ حجم ناپیوستگی بر واحد حجم شکستگی (تخلخل حجمی)

۲-۲-۶- چگالی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

چگالی به عنوان تعداد مراکز ناپیوستگی‌ها بر طول خط برداشت و فاصله‌داری، به صورت فاصله‌ی میان دو ناپیوستگی در یک راستا تعریف می‌گردد (Mauldon, 1988). اطلاعات ناپیوستگی‌ها به صورت خطوط برداشت در گمانه‌ها و برداشت‌های سطحی، تنها در بخش محدودی از توده سنگ قابل اندازه‌گیری است و دسترسی به همه‌ی ناپیوستگی‌های توده سنگ وجود ندارد. در طول خط برداشت در گمانه‌ها اطلاعات به صورت یک‌بعدی هستند که به عنوان فرکانس ناپیوستگی شناخته می‌شوند و امکان اندازه‌گیری شدت ناپیوستگی به صورت مستقیم در سه بعد وجود ندارد. شدت حجمی می‌تواند با استفاده از مقادیر P_{10} ، P_{21} و با کاربرد روابط غیرمستقیم محاسبه گردد (Kulatilake, 1993):

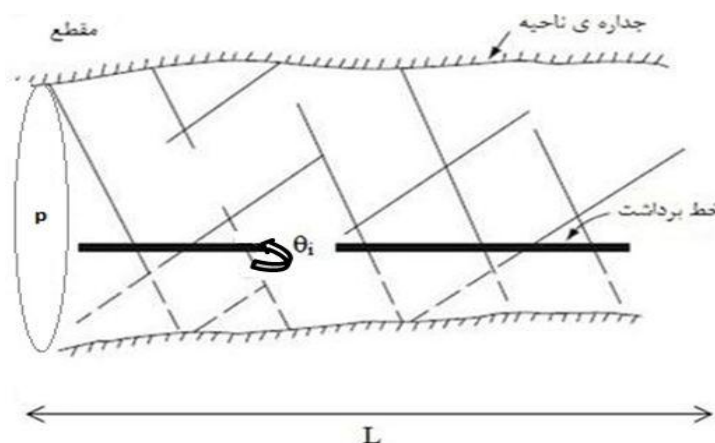
$$P_{32} = C_{21} \times P_{21} \quad (1-2)$$

$$P_{32} = C_{10} \times P_{10} \quad (2-2)$$

در این روابط C_{21} و C_{10} مقادیر ثابتی هستند و بستگی به جهت‌داری و شعاع ناپیوستگی‌ها دارند. مطابق نظر درشوایتز و هردا (Dershowitz and Herda, 1992) و مولدون (Mauldon, 1988) میانگین مساحت ناپیوستگی‌ها بر واحد حجم توده سنگ به‌عنوان شدت حجمی P_{32} تعریف می‌شود و با استفاده از توزیع اندازه و فراوانی ناپیوستگی‌ها محاسبه می‌گردد. شدت حجمی به جهت‌داری بستگی ندارد، بنابراین برای توصیف شدت و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به تانسورهای آنها نیاز است (Kulatilake, 1993).

در یک استوانه به طول L و مساحت مقطع P ، اگر تعداد n ناپیوستگی، امتداد خط برداشت درون چال را قطع کند و θ_i زاویه‌ی حاده‌ی بین صفحه‌ی ناپیوستگی i با راستای چال باشد، مساحت صفحه‌ی ناپیوستگی i درون چال، حاصل تقسیم p بر $\sin\theta_i$ است (شکل ۲-۲). در نتیجه شدت ناپیوستگی در سه بعد به‌صورت معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود (Singhal and Gupta, 2010):

$$p_{32} = \frac{1}{L \cdot P} \sum_{i=1}^n \frac{P}{\sin\theta_i} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sin\theta_i} \quad (3-2)$$



شکل ۲-۲: روش خط برداشت ناپیوستگی (Singhal and Gupta, 2010).

۲-۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

با توجه به تاثیرات ناپیوستگی‌ها بر روی توده سنگ، ابتدا لازم است ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها را به روش‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. به چند نمونه از مزیت‌های این اندازه‌گیری‌ها در زیر اشاره شده است [Priest, 1993]:

- کسب اطلاعات مربوط به ساختار زمین‌شناسی
- امکان طبقه‌بندی توده سنگ
- کسب داده‌های ورودی جهت آنالیزهای تحلیلی، تجربی و عددی تعیین‌کننده‌ی پایداری توده سنگ درزه‌دار

برای محاسبه پارامترهای هندسی، جمع‌آوری اطلاعات اولیه از منطقه بر اساس روش برداشت خطی یا پنجره‌ای صورت می‌گیرد، سپس بر اساس این اطلاعات و توابع آماری موجود می‌توان ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها را مدل‌سازی کرد. در ادامه هرکدام از روش‌های برداشت ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف: برداشت خطی

در این روش، برداشت در امتداد یک خط به طول دلخواه (بر اساس مساحت منطقه مورد بررسی) انجام می‌شود. خط برداشت می‌تواند به صورت یک خط بر روی سطح رخنمون و یا به صورت یک خط درون گمانه انتخاب شود (شکل ۲-۱). در روش برداشت خطی بر روی سطح رخنمون، امکان اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها به صورت کامل امکان‌پذیر است ولی در برداشت درون گمانه تنها فراوانی، بازشدگی و فاصله‌داری قابل محاسبه است. در صورتی که گمانه به صورت ژئوتکنیکی حفرشده باشد و یا از دوربین درون چال استفاده شده باشد امکان اندازه‌گیری شیب و جهت شیب نیز

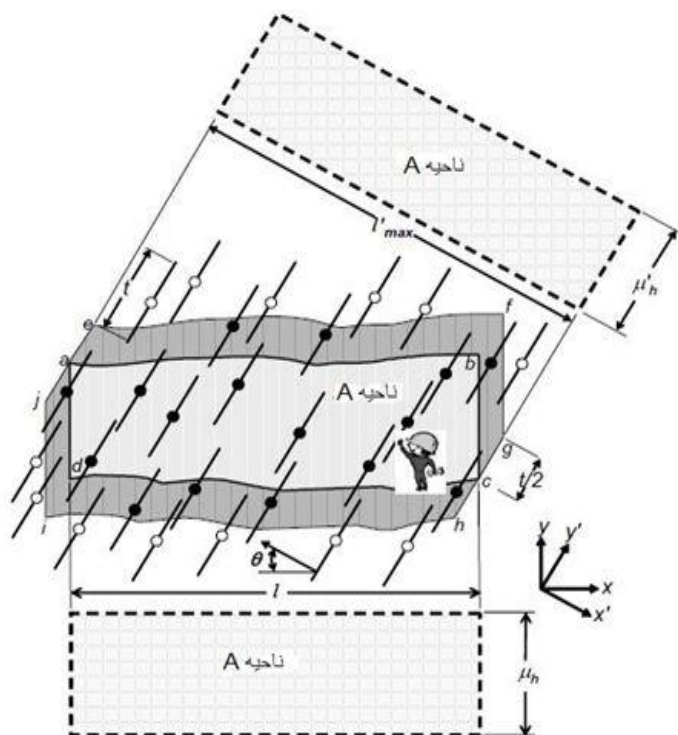
وجود دارد. بنابراین در برداشتهای خطی بهتر است که علاوه بر برداشت خطی درون گمانه از خطوط برداشت سطحی به صورت همزمان استفاده شود (Huang et al., 2016).

ب: برداشت پنجره‌ای

برداشت پنجره‌ای شامل یک قاب با اندازه‌ی مشخص (بر اساس محدوده مورد بررسی) است. درون این قاب ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند و پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها برداشت می‌شود. به عنوان مثال در شکل (۲-۳)، پنجره‌ی برداشت a-b-c-d (خاکستری روشن) نشان‌دهنده‌ی آثار ناپیوستگی با زاویه‌ی شیب θ و طول ثابت t است. تعداد ۱۶ ناپیوستگی که مراکز آنها به صورت دایره‌ی توپر نشان داده شده‌اند، ناحیه را قطع کرده‌اند. برای پوشش تمامی ناپیوستگی‌ها، دو پنجره‌ی فرضی با طول و عرض متفاوت ولی با مساحت مساوی A در نظر گرفته شده است. پنجره‌ی پایینی دارای طول l و ارتفاع μ_h و بالایی دارای طول l'_{max} (بیش‌ترین طول مورد نیاز برای پوشش ناپیوستگی‌ها) و ارتفاع μ'_h است. این دو پنجره‌ی برداشت فرضی برای آنالیزهای بعدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Decker, 2007).

در صورتی که مرکز ناپیوستگی درون پنجره‌ی برداشت قرار گرفته باشد در محاسبات اعمال می‌شود و در صورتی که مراکز آنها درون پنجره‌ی برداشت قرار نگیرد، از آن چشم پوشی می‌شود. ابعاد پنجره‌ی برداشت بستگی به جهت‌داری و اندازه ناپیوستگی‌ها دارد. از این ناحیه‌ی پنجره‌ای برای استخراج معادلات تخمین چگالی و طول‌اثر ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. اثر ناپیوستگی‌ها نمی‌تواند بیش از یک‌بار پنجره را قطع کند. برای درک بهتر این معادلات فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود (Decker, 2007).

- توابع آماری به موقعیت نمونه‌ی برداشت بستگی ندارند.
- ناپیوستگی‌ها به صورت موازی و با طول یکسان در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲-۳: پنجره‌ی برداشت نشان‌دهنده‌ی اثر ناپیوستگی‌ها (Decker, 2007).

با توجه به این که طول اثر ناپیوستگی‌ها یکسان است، تعداد اثر ناپیوستگی‌های برخوردی با ناحیه‌ی برداشت به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$E(N) = \rho(A + tl'_{max}) = \rho(\mu_h l + tl'_{max}) = \rho\mu_h l + \rho tl'_{max} \quad (۴-۲)$$

در این معادله:

t : طول ثابت اثر ناپیوستگی‌ها

ρ : چگالی ناپیوستگی‌ها (تعداد ناپیوستگی بر واحد سطح)

A : مساحت نمونه‌ی برداشت پنجره‌ای

l : طول پنجره برداشت در جهت x

μ_h : میانگین ارتفاع پنجره‌ی برداشت در جهت y است. بنابراین مساحت پنجره‌ی برداشت از رابطه‌ی

زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_h \times l = A$$

(۵-۲)

l'_{max} : بیشترین طول نمونه‌ی پنجره‌ای در جهت x'

μ'_h : میانگین ارتفاع پنجره‌ی برداشت در جهت y'

در حالتی که طول اثر ناپیوستگی‌ها متفاوت باشد، تعداد برخوردهای مورد انتظار ناپیوستگی‌ها با پنجره‌ی برداشت با ارتفاع μ_h به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E(N) = \rho \mu_h l + \rho l'_{max} \int_{t=0}^{t=\infty} t dF(t) = \rho \mu_h l + \rho \mu_t l'_{max} \quad (۶-۲)$$

در معادله ۶-۲:

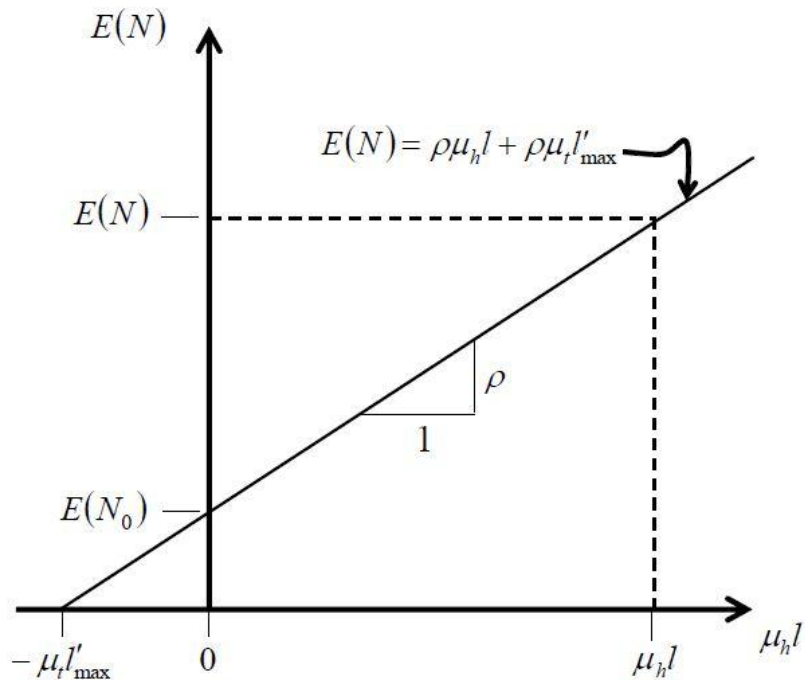
$F(t)$: توزیع تجمعی طول اثر ناپیوستگی‌ها

μ_t : میانگین طول اثر ناپیوستگی‌ها است.

از انتگرال‌گیری ریمان^۱ در معادله‌ی بالا جهت پوشش توزیع‌های پیوسته و ناپیوسته یا ترکیبی از هر دو استفاده می‌شود (Decker, 2007).

نتایج مورد انتظار برای تعداد برخورد ناپیوستگی‌ها با ناحیه‌ی مورد بررسی به صورت شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

^۱ Riemann



شکل ۲-۴: نمایش تعداد برخوردهای مورد انتظار در پنجره‌ی برداشت (Decker, 2007).

$E(N)$ ، به‌عنوان تعداد برخورد ناپیوستگی‌ها با یک پنجره‌ی نمونه‌برداری با طول l'_{\max} است. برای نمونه‌های پنجره‌ای مشابه می‌توان چگالی ناپیوستگی‌ها را به‌صورت زیر محاسبه کرد (Decker, 2007).

$$\rho = \frac{E(N) - E(N_0)}{\mu_h l} \quad (7-2)$$

در این معادله $E(N_0)$ به‌عنوان تعداد برخورد ناپیوستگی‌ها با پنجره‌ی نمونه‌برداری با کم‌ترین طول است. مجموع طول اثر ناپیوستگی‌ها در پنجره‌ی برداشت به‌صورت L' تعریف می‌شود، و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد.

$$L' = \mu'_t \tilde{N} \quad (8-2)$$

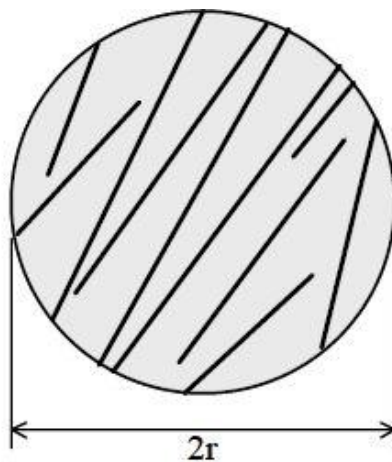
در این معادله عبارات μ'_t و \tilde{N} به ترتیب به معنی میانگین طول اثر ناپیوستگی‌های درون پنجره‌ی برداشت استاندارد (پنجره‌ی برداشت مرکزی) و تعداد ناپیوستگی‌های برخوردی با پنجره‌ی برداشت هستند. مجموع طول اثر ناپیوستگی‌ها و شدت دوبعدی به‌صورت رابطه‌ی ۲-۹ با یکدیگر ارتباط دارند.

$$P_{21} = \frac{L'}{A} = \frac{\mu'_t \tilde{N}}{A} = \left(\frac{\tilde{N}}{A}\right) \mu'_t = \rho' \mu'_t \quad (9-2)$$

در این معادله ρ' ، نسبت تعداد ناپیوستگی‌ها بر مساحت ناحیه برداشت است.

ج - برداشت پنجره‌ی دایره‌ای

پنجره‌ی برداشت دایره‌ای از این جهت که به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بستگی ندارد بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد (شکل ۲-۵). در حقیقت با این نوع برداشت می‌توان جهت‌داری ناپیوستگی‌ها را از فرایند نمونه برداری بی‌تأثیر کرد.



شکل ۲-۵: برداشت پنجره‌ی دایره‌ای (Decker, 2007).

برای تخمین طول اثر و چگالی ناپیوستگی‌ها در پنجره‌ی برداشت، می‌توان با استفاده از برداشت پنجره‌ی دایره‌ای اثر جهت‌داری را از بین برد. بنابراین معادلات به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Decker, 2007):

$$\mu'_h = \frac{A}{l'_{max}} = \frac{\pi r^2}{2r} = \frac{\pi r}{2} \quad (10-2)$$

$$\tilde{\mu}_t = \left[\frac{1}{\mu'_t} - \frac{2}{\pi r} \right]^{-1} \quad (11-2)$$

$$\tilde{\rho} = \mu'_t \rho' \left[\frac{1}{\mu'_t} - \frac{2}{\pi r} \right] \quad (12-2)$$

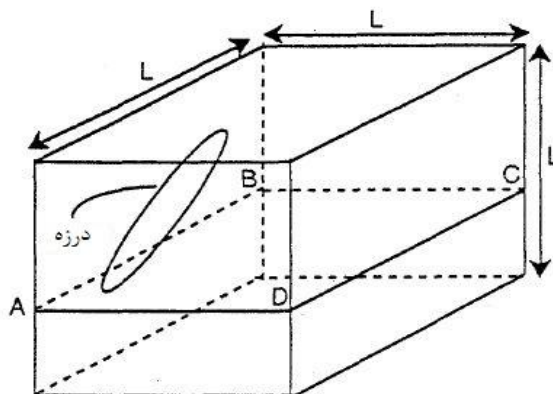
در این معادلات $\bar{\mu}_t$ و $\bar{\rho}$ به ترتیب میانگین طول اثر و تعداد ناپیوستگی‌ها بر مساحت ناحیه‌ی برداشت دایره‌ای و r شعاع پنجره‌ی دایره‌ای برداشت است (Decker, 2007).

۲-۴- روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها

برای تحلیل برداشت‌های حاصل از گمانه‌ها، یافتن روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها ضروری است. این روابط برای مدل‌سازی سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها در بررسی‌های عمقی (گمانه) به دلیل در دسترس نبودن برخی از پارامترهای هندسی بسیار مفید هستند. در ادامه برخی از این روابط ارائه شده است.

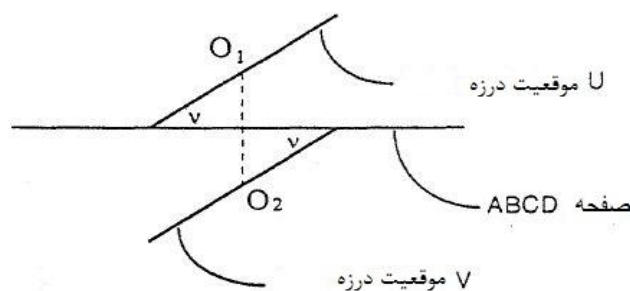
۲-۴-۱- رابطه‌ی میان چگالی سطحی و حجمی

پینادووا^۱ و کولاتیلاک (۱۹۹۳) برای محاسبه‌ی چگالی سطحی و حجمی ناپیوستگی‌ها مدلی را با ابعاد $L \times L \times L$ در نظر گرفتند. در این مدل مکعبی، ناپیوستگی‌ها صفحه‌ی ABCD را قطع می‌کنند و باید بین دو موقعیت U و V قرار بگیرند (شکل ۲-۶). به دلیل مکان‌یابی تصادفی مراکز ناپیوستگی‌ها، احتمال اینکه آن‌ها بین دو خط O_1 و O_2 قرار بگیرند P است. مقدار P به صورت معادله‌ی (۲-۱۳) محاسبه می‌شود (Pinnaduwa et al, 1993).



الف: موقعیت صفحه‌ی ABCD و ناپیوستگی

^۱ Pinnaduwa



ب: قرارگیری ناپیوستگی بین دو خط O_1 و O_2

شکل ۲-۶: (الف) حجم بلوک (ب) موقعیت درزه‌های U و V (Pinnaduwa et al, 1993).

$$P = \frac{O_1 O_2}{L} \quad (13-2)$$

بنابراین می‌توان رابطه‌ی (۲-۱۳) را به صورت زیر بیان کرد:

$$P = \frac{D |\sin \nu|}{L} \quad (14-2)$$

که در آن، ν زاویه‌ی بین صفحه‌ی ناپیوستگی و صفحه‌ی نمونه و D قطر ناپیوستگی است. برای محاسبه‌ی رابطه‌ی میان چگالی سطحی و حجمی نیاز به تعریف پارامترهای تعداد ناپیوستگی‌ها در سطح و حجم است. بنابراین n_v ، تعداد مراکز دسته‌درزه‌ها در حجم و n_a ، تعداد درزه‌های متقاطع با صفحه‌ی نمونه در نظر گرفته شده است.

با توجه به پارامترهای جدید تعریف شده می‌توان معادله‌ی (۲-۱۴) را به شکل دیگری بیان کرد:

$$n_a = P n_v \quad (15-2)$$

اگر هر دو طرف معادله‌ی بالا بر عبارت L^2 تقسیم شود، در این صورت رابطه‌ی چگالی‌های سطحی و حجمی درزه‌ها به شکل زیر تشکیل خواهد شد (Pinnaduwa et al, 1993).

$$\frac{n_a}{L^2} = D |\sin \nu| \frac{n_v}{L^3} \quad (16-2)$$

$$p_{20} = D |\sin \nu| p_{30} \quad (17-2)$$

۲-۴-۲- رابطه‌ی بین چگالی خطی و چگالی سطحی

پریست و سامانیگو^۱ (۱۹۸۳) با در نظر گرفتن دسته‌درزه‌های موازی با چگالی سطحی λ_a (تعداد مراکز ناپیوستگی بر واحد سطح توده سنگ) و میانگین طول اثر ناپیوستگی μ_L ، رابطه‌ای میان چگالی خطی و چگالی سطحی ارائه کردند. شکل (۷-۲) نمونه‌ای دوبعدی از ناپیوستگی‌ها با مختصات x و y است. با در نظر گرفتن خط برداشت در جهت محور y و تعداد برخورد ناپیوستگی‌ها با این خط برداشت، چگالی خط برداشت λ (تعداد تقاطع‌های ناپیوستگی‌ها در خط برداشت) با عرض x به صورت زیر محاسبه می‌گردد (Priest, 1993).

$$\lambda = \frac{\lambda_a xy \mu_L}{xy} = \lambda_a \mu_L \quad (18-2)$$

آندروود^۲ (۱۹۶۷) متوسط طول اثر کل بر واحد سطح را، در شرایطی که ناپیوستگی‌ها تصادفی هستند $\pi\lambda/2$ محاسبه کرد. در این شرایط با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۲، رابطه‌ی جدیدی به صورت زیر برای چگالی خطی ارائه داد (Priest, 1993).

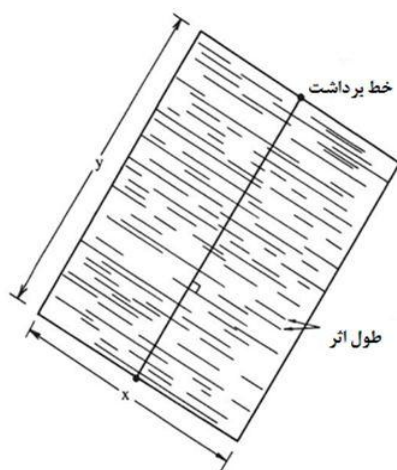
$$\lambda = \frac{2 \lambda_a \mu_L}{\pi} \quad (19-2)$$

بر اساس روابط ۱۸-۲ و ۱۹-۲ می‌توان گفت که مقدار λ در بازه‌ای به صورت رابطه‌ی ۲۰-۲ قرار می‌گیرد. در صورتی که ناپیوستگی‌ها به صورت موازی در نظر گرفته شوند دارای بیشترین مقدار چگالی هستند.

$$\frac{2 \lambda_a \mu_L}{\pi} \leq \lambda \leq \lambda_a \mu_L \quad (20-2)$$

^۱ Samaniego

^۲ underwood



شکل ۲-۷: دید کلی از فرکانس خطی، ناحیه‌ای و اندازه ناپیوستگی‌ها (Priest, 1993).

۲-۴-۳- روابط تبدیل شدت ناپیوستگی در ابعاد مختلف

اندازه‌های شدت مفاهیم اولیه‌ای بودند که توسط درشوایتز و هردا (۱۹۹۲)، واربرتون^۱ (۱۹۹۳)، پال^۲ (۱۹۸۶)، کولاتیلاکه (۱۹۹۸) و هو^۳ (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفتند (Mauldon, 1994).

شدت ناپیوستگی در یک بعد، با استفاده از خطوط برداشت و در دو بعد با استفاده از پنجره‌ی برداشت بر روی سطح قابل محاسبه است. شدت ناپیوستگی در سه بعد به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. بنابراین روابط معتبری برای رسیدن از شدت ناپیوستگی در یک یا دو بعد به شدت ناپیوستگی در سه بعد برای مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها نیاز است. این روابط توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی شرایط مورد نیاز ایجاد ارتباط بین شدت ناپیوستگی‌ها در ابعاد مختلف، دو نوع نمونه‌برداری ناحیه‌ای و خطی در نظر گرفته می‌شود که در ادامه، هرکدام مورد بررسی قرار گرفته است. پس از نمونه‌برداری‌های ناحیه‌ای و خطی، به ترتیب ناپیوستگی‌های موازی و ناپیوستگی‌های دارای توزیع یکنواخت جهت‌داری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

¹ Warburton

² Pahl

³ Wu

الف: نمونه برداری ناحیه‌ای

توده سنگ مورد بررسی به صورت مکعب شکل ۸-۲ در نظر گرفته می‌شود. در این مکعب راستای محور x با خط عمود بر ناپیوستگی‌ها زاویه‌ی α را می‌سازند. در راستای محور y المانی از توده سنگ به صورت dx در نظر گرفته می‌شود. مساحت این المان روی صفحه xz را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد (Mauldon, 1994).

$$dA = \frac{L(x)dx}{\sin\alpha} \quad (21-2)$$

با انتگرال گیری از معادله‌ی (۲۱-۲) می‌توان مساحت کل ناپیوستگی‌های بلوک را محاسبه کرد:

$$A = \int dA = \frac{1}{\sin\alpha} \int_0^x L(x)dx \quad (22-2)$$

برای حل انتگرال معادله‌ی (۲۲-۲)، میانگین طول اثر المان در نظر گرفته شده بر روی توده سنگ مورد نیاز است. محاسبه‌ی میانگین طول اثر با توجه به اندازه‌ی بلوک سنگی در جهت x ، به صورت معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{L} = \frac{1}{X} \int_0^x L(x)dx = \frac{1}{X} (A \sin\alpha) \quad (23-2)$$

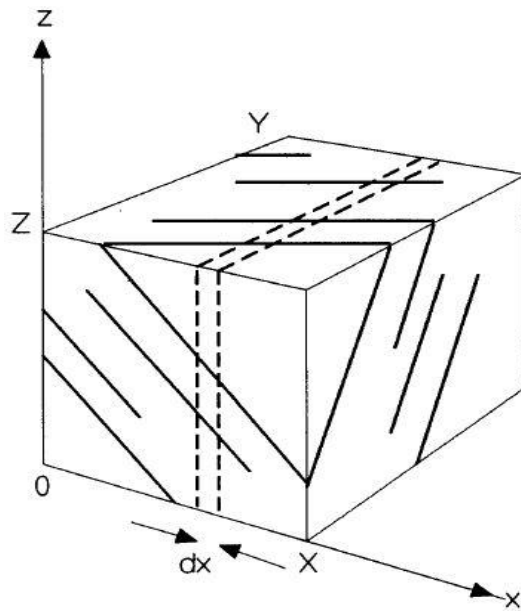
که در آن X طول منطقه مورد بررسی است.

با استفاده از میانگین طول اثر محاسبه‌شده، مساحت کلی ناپیوستگی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\bar{L}X}{\sin\alpha} \quad (24-2)$$

بنابراین شدت حجمی ناپیوستگی را که برابر نسبت مجموع مساحت سطوح ناپیوستگی بر حجم مورد نظر توده سنگ است به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{32} = \frac{A}{V} = \frac{\bar{L}X}{XYZ\sin\alpha} = \frac{\bar{L}}{YZ\sin\alpha} = \frac{P_{21}}{\sin\alpha} \quad (25-2)$$



شکل ۲-۸: نمونه برداری ناحیه‌ای درزه‌های ناپایا (Mauldon, 1994).

ب: نمونه برداری خطی

برای بررسی خطی ناپیوستگی‌ها، یک ستون فرضی حاصل برخورد مقاطع طولی و عرضی با مقطع عبوری $dx dy$ در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۹). مساحت ناپیوستگی‌ها در این ستون مربعی (خط برداشت) طبق معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود (Mauldon, 1994).

$$dA = \frac{N(x, y) dx dy}{\cos \beta} \quad (26-2)$$

در این معادله $N(x, y)$ تعداد درزه‌ها در راستای ستون $dx dy$ و β زاویه‌ی بین راستای خط برداشت (محور ستون) و خط عمود بر ناپیوستگی‌ها است. با انتگرال‌گیری از این معادله می‌توان مساحت ناپیوستگی‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$A = \iint dA = \frac{1}{\cos \beta} \int_0^x \int_0^y N(x, y) dx dy \quad (27-2)$$

که در آن، A مساحت ناپیوستگی و بقیه‌ی پارامترها قبلاً تعریف شده است. برای حل انتگرال معادله ۲۷-۲ نیاز است که ابتدا میانگین تعداد درزه‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

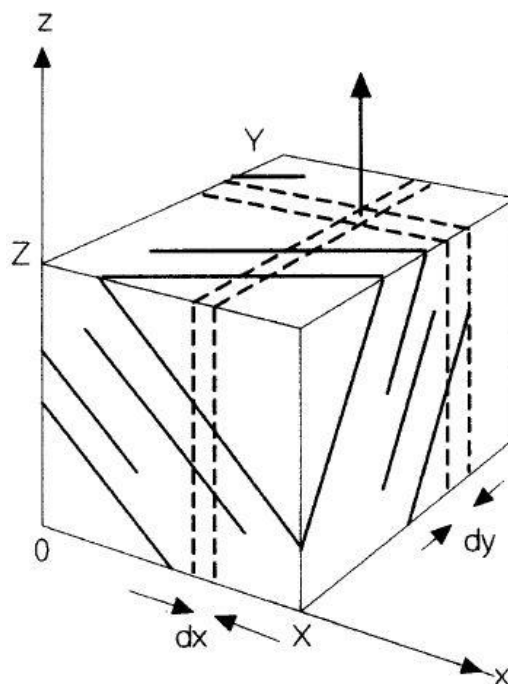
$$\bar{N} = \frac{1}{XY} \int_0^x \int_0^y N(x, y) dx dy = \frac{1}{XY} A \cos \beta \quad (28-2)$$

پس از محاسبه‌ی میانگین تعداد ناپیوستگی‌ها، مساحت کل ناپیوستگی‌ها توسط معادله‌ی ۲-۲۹ محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\bar{N}XY}{\cos \beta} \quad (29-2)$$

بنابراین شدت حجمی توده سنگ با استفاده از مساحت ناپیوستگی‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{32} = \frac{A}{V} = \frac{\bar{N}XY}{XYZ \cos \beta} = \frac{\bar{N}}{Z \cos \beta} = \frac{P_{10}}{\cos \beta} \quad (30-2)$$



شکل ۲-۹: نمونه برداری خطی ناپیوستگی‌های ناپایا (Mauldon, 1994).

با ترکیب معادله‌های (۲-۲۵) و (۲-۳۰) می‌توان رابطه‌ی میان شدت حجمی، سطحی و خطی ناپیوستگی‌ها را به صورت زیر بیان کرد:

$$P_{32} = \frac{P_{21}}{\sin \alpha} = \frac{P_{10}}{\cos \beta} \quad (31-2)$$

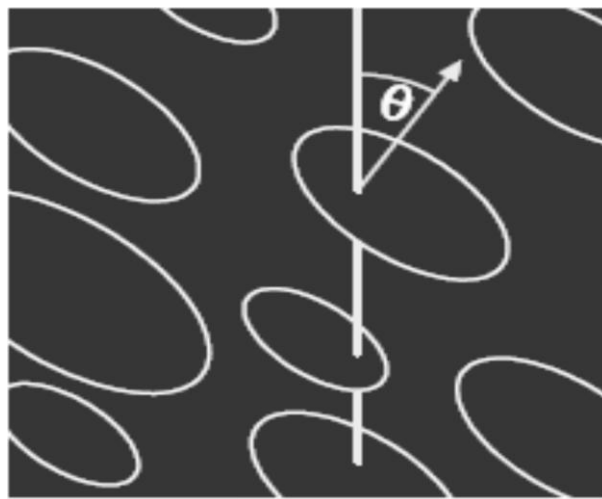
که در آن α زاویه‌ی بین جهت محور x و خط عمود بر ناپیوستگی‌ها و β زاویه‌ی بین راستای خط برداشت (محور ستون مربعی) و خط عمود بر ناپیوستگی‌ها است (Mauldon, 1994).
 با در نظر گرفتن فرضیات اولیه و ساده سازی روابط، همانند موازی در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها و یکسان بودن توزیع جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، روابط اولیه بین شدت ناپیوستگی‌ها در یک بعد و سه بعد حاصل می‌شود که به صورت جداگانه در ادامه بیان شده است.

ج: ناپیوستگی‌های موازی

ترزاقی در سال ۱۹۶۵ با استفاده از زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و راستای چال، رابطه‌ای میان شدت یک و سه بعدی ناپیوستگی‌ها ارائه کرد.

$$P_{32} = C \sec(\theta) P_{10} \quad (32-2)$$

که در آن θ زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و راستای چال، P_{10} چگالی خطی ناپیوستگی و P_{32} شدت ناپیوستگی در سه بعد است که در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است (Mauldon and Dershowitz, 2000).



شکل ۱۰-۲: زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و راستای چال (Mauldon and Dershowitz, 2000).

د: توزیع یکنواخت جهت‌داری ناپیوستگی‌ها

کار تحقیقاتی دیگری توسط وانگ^۱ و همکاران برای بررسی اثر ناپیوستگی‌ها بر روی دیواره‌ی چاه انجام شده است و در نتیجه رابطه‌ای بین شدت ناپیوستگی در یک و دو بعد با شدت ناپیوستگی در سه بعد حاصل گردیده است. تحلیل اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ضریب تبدیل شدت در سه بعد و اندازه‌ی شدت در دو بعد بر روی سطح دیواره‌ی چال، به‌اندازه‌ی ناپیوستگی وابسته نیست (Wang, 2005). آن‌ها ناپیوستگی‌ها را در تحلیل‌هایشان پایا در نظر گرفته‌اند.

$$P_{32} = 2 P_{10} \quad (۳۳-۲)$$

$$P_{32} = (4/\pi) P_{21} \quad (۳۴-۲)$$

که در آن P_{10} شدت یک بعدی ناپیوستگی، P_{21} شدت دو بعدی و P_{32} شدت سه بعدی ناپیوستگی است. روابط ۳۳-۲ و ۳۴-۲ به ترتیب از اندازه‌گیری‌های یک بعدی و دو بعدی حاصل شده‌اند. برای محاسبه‌ی روابط بین شدت ناپیوستگی در یک و سه بعد یا دو و سه بعد، نیاز به در نظر گرفتن جهت‌داری ناپیوستگی‌ها است. در نمونه‌برداری‌های سطحی و یا خطی با اندازه‌ی ناپیوستگی‌های ثابت و پایا، شدت‌های خطی و حجمی به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Wang, 2005).

$$P_{10} = P_{32} \int_0^{\pi} |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \quad (۳۵-۲)$$

$$P_{21} = P_{32} \int_0^{\pi} |\sin \beta| f_B(\beta) d\beta \quad (۳۶-۲)$$

که در آن، α زاویه‌ی بین خط نمونه‌برداری و خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی، β زاویه‌ی بین خط عمود بر سطح نمونه‌برداری و خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و $f_A(\alpha)$ و $f_B(\beta)$ توابع چگالی

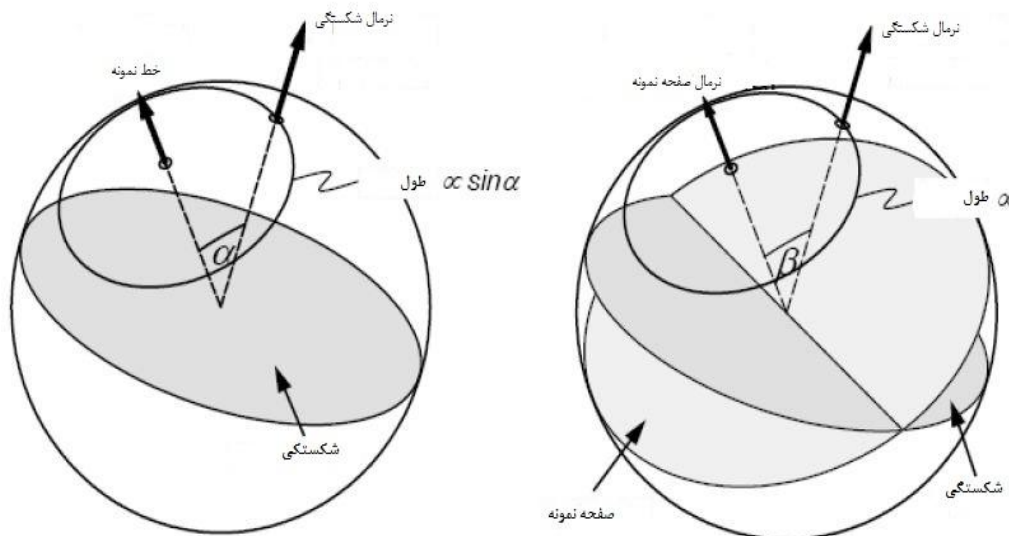
^۱ Wang

احتمال^۱ α و β هستند (شکل ۲-۱۱). برای محاسبه شدت ناپیوستگی، دامنه‌ی آماری به صورت همگن فرض شده است (Wang, 2005).

برای ساده‌سازی روابط (۲-۳۵) و (۲-۳۶) می‌توان ثابت‌های C_{13} و C_{23} را با انتگرال جایگزین کرد که به صورت زیر نشان داده شده است:

$$C_{13} = \left[\int_0^{\pi} |\cos \alpha| f_A(\alpha) d\alpha \right]^{-1} \quad (2-37)$$

$$C_{23} = \left[\int_0^{\pi} |\sin \beta| f_B(\beta) d\beta \right]^{-1} \quad (2-38)$$



شکل ۲-۱۱: نمایش زوایای α و β (Wang, 2005).

بنابراین با جایگذاری ثوابت تعریف شده ۲-۳۷ و ۲-۳۸ در معادلات ۲-۳۵ و ۲-۳۶ به روابط جدیدی می‌توان دست یافت.

$$P_{32} = C_{13} P_{10} \quad (2-39)$$

^۱ probability density functions (pdf)

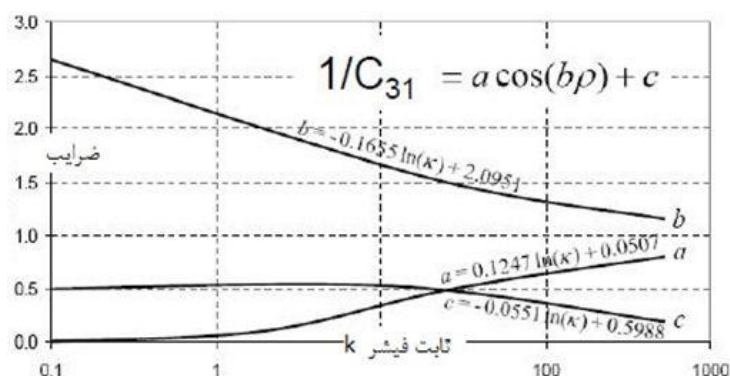
$$P_{32} = C_{23}P_{21}$$

در معادلات (۲-۳۵) و (۲-۳۶) جواب انتگرال بین صفر و یک است، در نتیجه مقدار ثابت‌های وانگ بین یک و بی‌نهایت است. برای محاسبه‌ی شدت سه بعدی ناپیوستگی‌ها از شدت یک‌بعدی به تابع چگالی احتمال نیاز است. تابع چگالی احتمال را بر اساس تابع توزیع جهت‌داری فیشر می‌توان محاسبه کرد (Wang, 2005).

بر اساس زاویه ρ (زاویه‌ی بین قطب ناپیوستگی و راستای خط نمونه‌برداری) و ثابت فیشر می‌توان ثابت‌های C_{31} و C_{32} (ضرایب وانگ) را با توجه به جداول ۲-۲ و ۲-۳ و شکل‌های ۲-۹ و ۲-۱۰ محاسبه کرد.

جدول ۲-۲: رابطه‌ی میان ثابت فیشر و زاویه‌ی ρ (Wang, 2005).

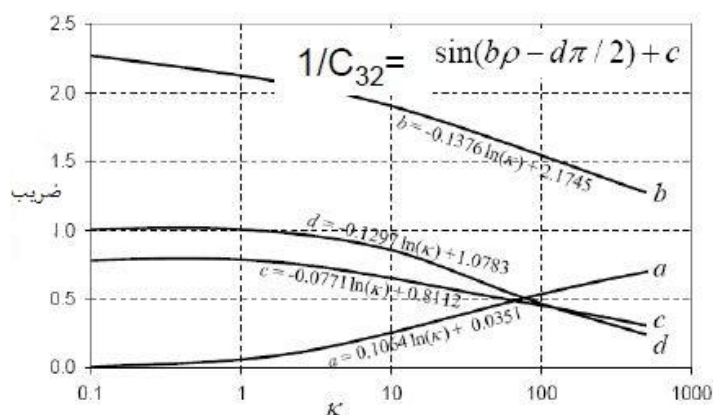
$\rho \backslash \kappa$	0.1	1	2	5	10	50	100	200	500	∞
0	0.50	0.53	0.62	0.79	0.90	0.98	0.99	0.99	1.00	Cos ρ
5	0.50	0.53	0.62	0.79	0.89	0.97	0.98	0.99	0.99	
10	0.50	0.53	0.61	0.78	0.88	0.96	0.97	0.98	0.98	
20	0.50	0.53	0.59	0.75	0.84	0.91	0.92	0.93	0.93	
30	0.50	0.52	0.56	0.68	0.77	0.84	0.85	0.85	0.85	
40	0.50	0.51	0.54	0.62	0.67	0.74	0.75	0.75	0.75	
50	0.50	0.51	0.51	0.54	0.57	0.62	0.62	0.63	0.63	
60	0.50	0.49	0.48	0.47	0.45	0.47	0.48	0.48	0.48	
70	0.50	0.48	0.45	0.39	0.34	0.32	0.32	0.32	0.32	
80	0.50	0.48	0.44	0.34	0.26	0.18	0.16	0.16	0.16	
90	0.50	0.48	0.44	0.33	0.24	0.11	0.08	0.06	0.04	



شکل ۲-۱۲: محاسبه ضریب یک‌بعدی وانگ (Wang, 2005).

جدول ۲-۳: رابطه‌ی میان ثابت فیشر و زاویه‌ی ρ (Wang, 2005).

$\rho \backslash \kappa$	0.1	1	2	5	10	50	100	200	500	∞
0	0.79	0.77	0.70	0.53	0.39	0.19	0.14	0.11	0.07	Sin ρ
5	0.79	0.77	0.70	0.54	0.40	0.21	0.17	0.14	0.12	
10	0.79	0.77	0.70	0.54	0.43	0.25	0.22	0.20	0.20	
20	0.79	0.77	0.72	0.58	0.49	0.38	0.37	0.36	0.36	
30	0.79	0.78	0.74	0.64	0.58	0.53	0.52	0.52	0.52	
40	0.79	0.78	0.76	0.71	0.68	0.66	0.66	0.66	0.66	
50	0.79	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.78	0.78	
60	0.79	0.79	0.79	0.82	0.85	0.87	0.87	0.87	0.87	
70	0.79	0.80	0.82	0.87	0.90	0.94	0.94	0.94	0.94	
80	0.79	0.80	0.83	0.90	0.94	0.98	0.98	0.99	0.99	
90	0.79	0.80	0.83	0.91	0.95	0.99	0.99	1.00	1.00	



شکل ۲-۱۳: محاسبه‌ی ضریب دوبعدی وانگ (Wang, 2005).

رابطه‌ی میان شدت ناپیوستگی در یک بعد و سه بعد توسط بارتلمی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به صورت رابطه‌ی ۲-۴۱ توسعه داده شد (Von, 2013).

$$P_{10} = P_{32} \times e[\cos(\theta)] \quad (۴۱-۲)$$

^۱ Barthelemy

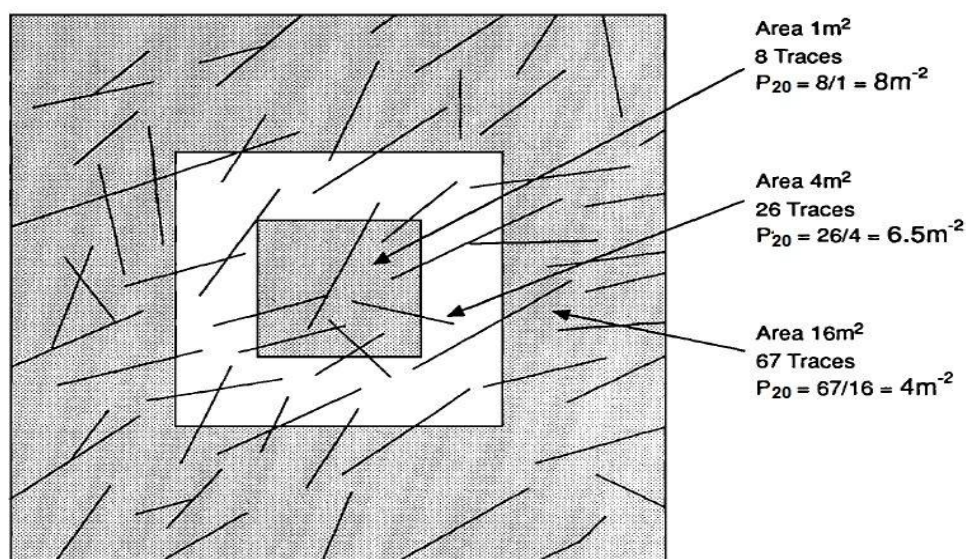
که در این رابطه θ زاویه‌ی بین خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی و خط برداشت و $e[\cos(\theta)]$ میانگین کسینوس مورد انتظار زاویه‌ی θ برای یک دسته‌درزه است. در صورتی که خط برداشت موازی با خط عمود بر صفحه‌ی شکستگی باشد، مقدار $e[\cos(\theta)]$ برابر یک و در نتیجه P_{10} و P_{32} مساوی خواهند شد (Von, 2013). دقت شود این رابطه در صورتی صحت دارد که ناپیوستگی پایا در نظر گرفته شود.

می‌توان گفت که چگالی سطحی (P_{20}) به اندازه ناحیه برداشت وابسته است. شکل (۲-۱۴) نشان‌دهنده‌ی افزایش شدت P_{20} با افزایش ابعاد ناحیه‌ی مورد بررسی است. از طرفی مقدار شدت سطحی P_{21} به مقیاس بستگی ندارد ولی با اندازه ناپیوستگی مرتبط است:

$$P_{21} = \frac{\int L f_L(L) dL}{A} \quad (۲-۴۲)$$

که در آن L میانگین طول خط اثر ناپیوستگی‌ها، $f_L(L)$ تابع چگالی احتمال طول خط اثر ناپیوستگی‌ها و A مساحت ناحیه‌ی نمونه برداری است.

چگالی دوبعدی ناپیوستگی‌ها (P_{20}) می‌تواند به صورت معادله‌ی (۲-۴۳) با شدت سطحی P_{21} در ارتباط باشد (Dershowitz and Herda, 1992).

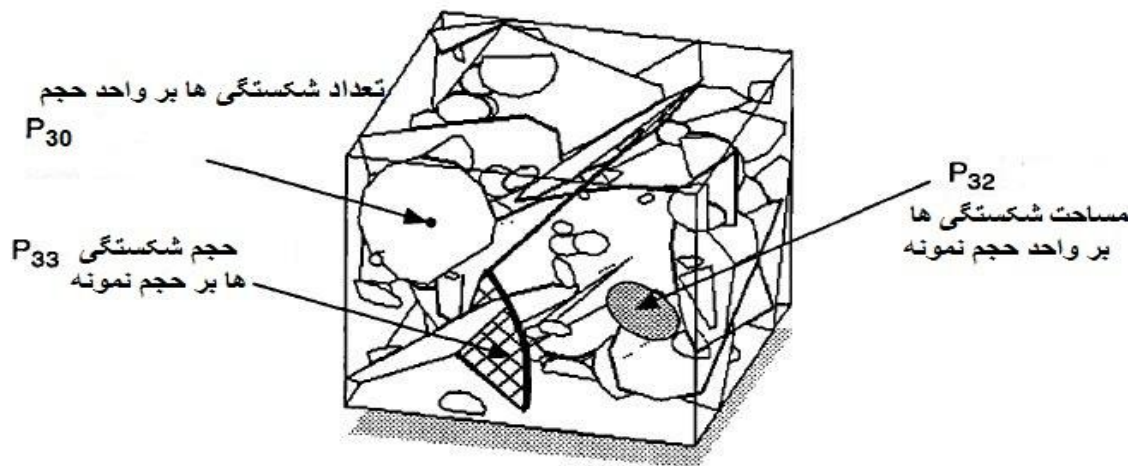


شکل ۲-۱۴: وابستگی اندازه چگالی سطحی به ابعاد ناحیه‌ی مورد بررسی (Dershowitz and Herda, 1992).

$$P_{21} = P_{20} \int_0^{\infty} L f_L(L) dL \quad (43-2)$$

$$P_{21} = P_{20} L \quad (44-2)$$

در تحلیل سه بعدی، چگالی ناپیوستگی به صورت تعداد مراکز ناپیوستگی بر حجم توده سنگ تعریف می‌گردد و به صورت P_{30} تعریف می‌شود. این اندازه‌گیری در جاهایی که ناپیوستگی‌ها بسیار کوچک‌تر از ناحیه‌ی مورد بررسی هستند مفید است. بعلاوه P_{30} از میان توزیع‌های اندازه و جهت‌داری تنها با فاصله‌داری در ارتباط است. مقدار P_{30} به مقیاس و اندازه‌ی نمونه وابسته است اما P_{32} و P_{33} به مقیاس وابسته نیستند. مقادیر P_{30} ، P_{32} و P_{33} در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است (Dershowitz and Herda, 1992).



شکل ۱۵-۲: اندازه شدت ناپیوستگی در سه بعد (Dershowitz and Herda, 1992).

$$P_{32} = \frac{\int_V A f_A(A) dA}{V} \quad (45-2)$$

$$P_{33} = \frac{\int_V A t f_A(A) f_t(t) dA dt}{V} \quad (46-2)$$

که در این روابط، A مساحت ناپیوستگی‌ها، $f_A(A)$ تابع چگالی احتمال مساحت ناپیوستگی‌ها، t اندازه‌ی بازشدگی و $f_t(t)$ تابع چگالی احتمال بازشدگی ناپیوستگی‌ها است.

اندازه‌ی چگالی حجمی P_{30} می‌تواند با P_{32} بر اساس توزیع اندازه ناپیوستگی به صورت زیر رابطه داشته باشد:

$$P_{32} = P_{30} \int_0^{\infty} A f_A(A) dA \quad (47-2)$$

$$P_{32} = P_{30} \bar{A} \quad (48-2)$$

در معادلات بالا، \bar{A} میانگین مساحت ناپیوستگی‌ها است. مقدار P_{33} بیانگر تخلخل توده سنگ است و جهت محاسبه، نیازمند اطلاعات بازشدگی ناپیوستگی است. P_{33} همانند P_{32} وابسته به مقیاس نیست و می‌تواند بدون توجه به جهت‌داری محاسبه گردد و نیازمند افزودن اطلاعاتی درباره‌ی ضخامت ناپیوستگی است. بنابراین بر اساس مقدار بازشدگی و تابع چگالی احتمال آن، تخلخل حجمی می‌تواند به صورت رابطه‌ی زیر با شدت سه‌بعدی ناپیوستگی در ارتباط باشد (Dershowitz and Herda, 1992).

$$P_{33} = P_{32} \frac{\int_0^{\infty} A t f_A(A) f_t(t) dA dt}{\bar{A}} \quad (49-2)$$

۲-۴-۴- رابطه‌ی میان فراوانی (شدت یک بعدی) و جهت‌داری ناپیوستگی

ترزاقی^۱ در سال ۱۹۶۵ اولین مقاله‌ی خود را در رابطه با برداشت ناپیوستگی از درون چال منتشر کرد. بر طبق نظر ترزاقی، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در طول یک چال به جهت‌داری وابسته است (Terzaghi, 1965).

برای مجموعه‌ی ناپیوستگی‌ها با فاصله‌داری یکسان (d)، تعداد ناپیوستگی‌ها (N) در یک چال با طول L به صورت زیر محاسبه می‌گردد (Martel, 1999).

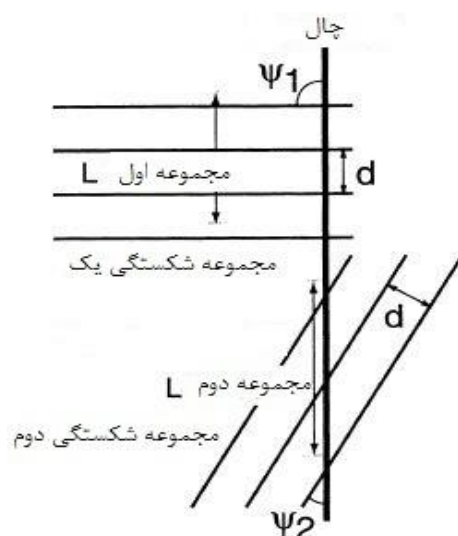
^۱ Terzaghi

$$N = (L \sin(\psi)) / d \quad (50-2)$$

در این معادله ψ زاویه‌ی حاده‌ی بین امتداد ناپیوستگی و محور چال است (شکل ۲-۱۶). معادله‌ی (۲-۵۰) در صورت داشتن شرایط زیر قابل استفاده است:

- ۱- نقاط انتهایی ناپیوستگی‌ها چال را قطع نکرده باشند.
- ۲- نقاط ابتدا و انتها ناپیوستگی با ناپیوستگی بعدی باید فاصله‌ی یکسانی داشته باشند یا به عبارت دیگر L باید مضربی از $d / \sin \psi$ باشد.

اگر شرط اول برقرار نباشد، باید از آن ناپیوستگی در محاسبات چشم پوشی کرد و به جای N در معادله $N-1$ قرار داد (Martel, 1999).



شکل ۲-۱۶: برخورد چال و ناپیوستگی‌ها (Martel, 1999).

۲-۴-۵- رابطه‌ی پایایی و طول اثر ناپیوستگی روی دیواره چال

تخمین پایایی ناپیوستگی در محاسبات نفوذپذیری آب بسیار اهمیت دارد. هدایت هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها از میان چگالی، پایایی و جهت‌داری ناپیوستگی، بیشتر بستگی به پایایی دارد و یکی از راه‌های تخمین آن استفاده از روش‌های آماری است (Ozkaya, 2003).

رارباق^۱، دان^۲ و مولدون^۳ (۲۰۰۲) بر مبنای پنجره‌های برداشت دایره‌ای، تنها در سطح ناپیوستگی‌ها را بررسی کردند. با این وجود اوزکایا^۴ و متنر^۵ (۲۰۰۳) یک روش آماری برای تخمین پایایی و هدایت هیدرولیکی با استفاده از تصاویر چال بنیان‌گذاری کردند. در این روش پایایی ناپیوستگی از فراوانی، با در نظر گرفتن خط برداشت ۳۶۰ درجه‌ای روی دیواره‌ی چال تخمین زده می‌شود (Ozkaya, 2003).

۲-۴-۵-۱- شرایط برخورد چال و صفحه‌ی ناپیوستگی

یک ناپیوستگی ممکن است چال را به صورت کامل و یا بخشی از آن را قطع کند (شکل ۲-۱۷). برداشت تصاویر چال بر اساس مقاومت یا امیدانس صوتی سنگ‌ها در اطراف چال صورت می‌گیرد. تصاویر چال، برش داده می‌شود و از حالت استوانه‌ای به صورت یک صفحه‌ی چهارگوش نمایش داده می‌شود (شکل ۲-۱۸). در این حالت اثر ناپیوستگی‌ها روی دیواره‌ی چال به صورت سینوسی نمایان می‌گردد. شیب و آزمون ناپیوستگی‌ها بر اساس معادلات سینوسی محاسبه می‌شوند. طول اثر، بازشدگی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به دلیل نیاز به نمودار کامل سینوسی، از برخورد کامل ناپیوستگی با چال محاسبه می‌گردد (Ozkaya, 2003).

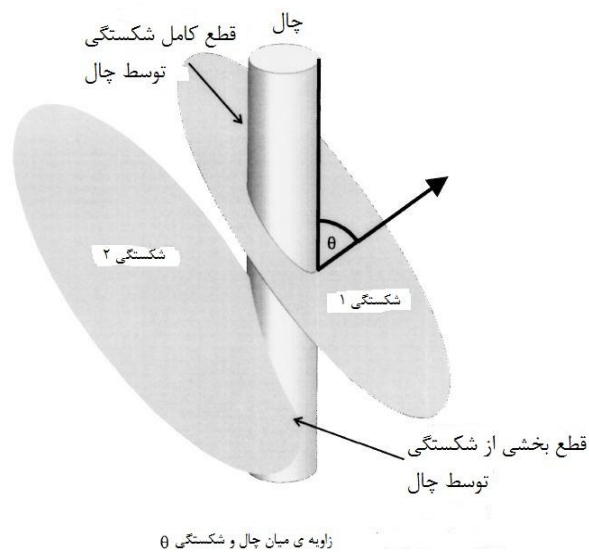
^۱ Rohrbaugh

^۲ Duun

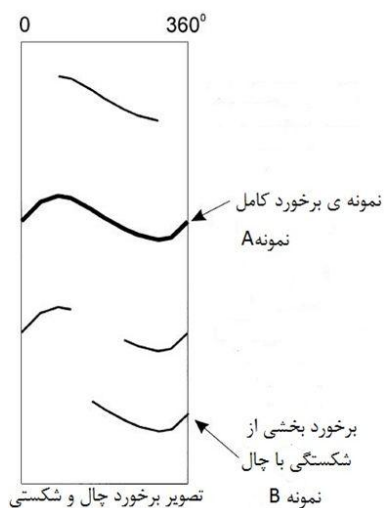
^۳ Mauldon

^۴ Ozkaya

^۵ Mattner



شکل ۲-۱۷: برخورد کامل و ناقص ناپیوستگی با چال (Ozkaya, 2003).



شکل ۲-۱۸: نمونه ی بازشده ی چال و اثر برخوردهای کامل و ناقص سینوسی ناپیوستگی (Ozkaya, 2003).

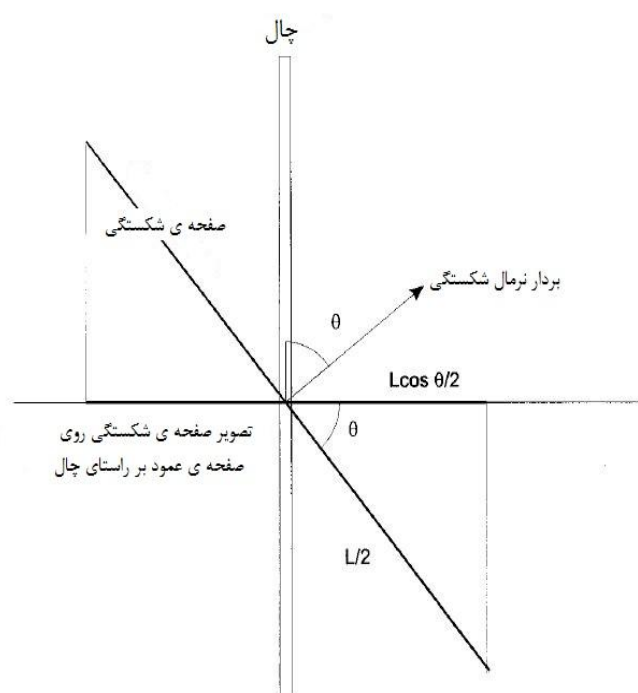
ناپیوستگی‌ها در این روش به صورت دیسک‌هایی با قطر L و چال با قطر D در نظر گرفته می‌شود. خط عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی زاویه‌ی θ را با راستای چال می‌سازد. تصویر ناپیوستگی روی صفحه‌ی افق به صورت بیضی و قطر بزرگ این بیضی برابر با حاصل ضرب طول شکستگی (L) در کسینوس زاویه‌ی θ است (شکل ۲-۱۹). بنابراین مساحت تصویر صفحه ناپیوستگی (A) بر روی صفحه‌ی افق به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$A = \pi L^2 \cos(\theta) / 4 \quad (51-2)$$

که در آن، پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

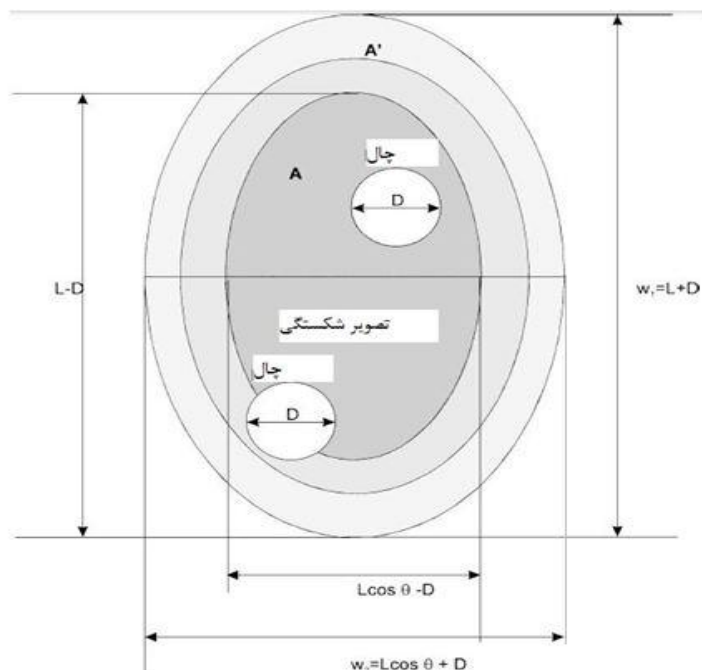
با فرض یک دایره داخلی با قطر $L-D$ ، تصویر این ناحیه روی صفحه‌ی افق به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$A = \pi(L \cos \theta - D)(L - D) / 4 \quad (52-2)$$



شکل ۲-۱۹: تصویر ناپیوستگی بر روی صفحه‌ی افق (Ozkaya, 2003).

شکل (۲-۲۰) نشان دهنده‌ی برخورد کامل و ناقص چال حفاری با قطر D و تصویر صفحه‌ی ناپیوستگی است (Ozkaya, 2003).



شکل ۲-۲۰: برخورد ناپیوستگی و چال بر روی صفحه‌ی افق (Ozkaya, 2003).

بیضی دیگری با قطر بزرگ w_1 ، قطر کوچک w_2 و مساحت A' برای پوشش دیگر چال‌ها ترسیم می‌شود.

قطر بزرگ، قطر کوچک و مساحت این بیضی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$W_1=L+D \quad (۵۳-۲)$$

$$W_2=L\cos\theta+D \quad (۵۴-۲)$$

$$A' = \pi(L + D)(L\cos\theta + D)/4 \quad (۵۵-۲)$$

در این معادلات پارامترها قبلاً تعریف شده است. با استفاده از تصویر صفحه‌ی ناپیوستگی و بیضی

جدید ترسیم شده، می‌توان مساله را در دو حالت طول ثابت و متغیر ناپیوستگی حل کرد. در ادامه

هرکدام از این حالت‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Ozkaya, 2003).

الف- با فرض ثابت بودن طول ناپیوستگی

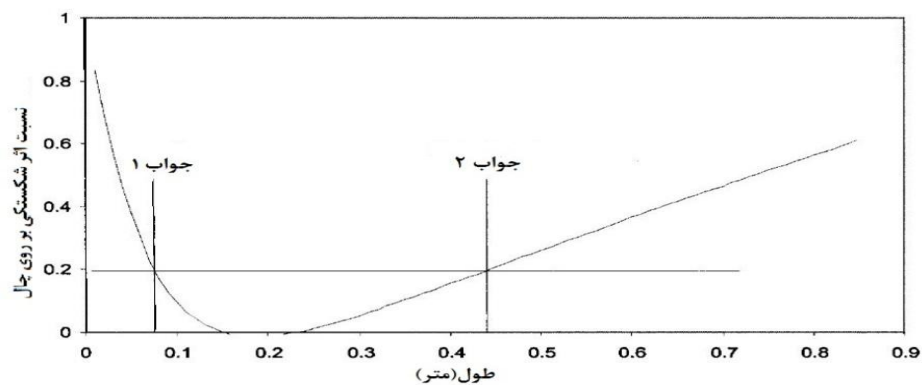
در صورتی که تمام ناپیوستگی‌ها دارای طول ثابت L باشند، نسبت برخورد کامل چال با صفحه‌ی ناپیوستگی با چال یا به عبارت دیگر نسبت طول اثر ناپیوستگی بر روی دیواره چال به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$r = A / A' \quad (۵۶-۲)$$

که در آن r ، نماینده‌ی نسبت برخورد صفحه‌ی ناپیوستگی با چال است. اگر ناپیوستگی‌ها حالت‌های مختلفی داشته باشند، هر کدام زاویه‌ی جداگانه‌ای با چال می‌سازند. در برخی از موارد ضروری است که هر مجموعه ناپیوستگی (k) را با شیب، آزیموت و طول ثابت (L_k) در نظر گرفت. بنابراین نسبت برخورد کامل صفحه‌ی ناپیوستگی با چال (r_k)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$r_k = (L_k - D)(L_k \cos \theta_k - D) / (L_k + D)(L_k \cos \theta_k + D) \quad (۵۷-۲)$$

در این معادله D قطر چال و θ_k زاویه‌ی بین چال و بردار عمود بر صفحه‌ی ناپیوستگی است. این معادله می‌تواند جهت تخمین طول دسته ناپیوستگی k که به صورت L_k نمایش داده می‌شود، استفاده گردد. معادله‌ی درجه دوم (۵۷-۲) دارای دو جواب است. یکی از جواب‌ها به دلیل کوچک‌تر بودن از قطر حذف می‌گردد، در نتیجه جواب دوم میزان طول مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل (۲۱-۲) نشان‌دهنده‌ی میزان طول اثر ناشی از اندازه‌های مختلف قطر چال است (Ozkaya, 2003).



شکل ۲-۲۱: جواب معادله‌ی اندازه ناپیوستگی (Ozkaya, 2003).

ب- با فرض متغیر بودن طول ناپیوستگی

اگر طول ناپیوستگی ثابت نباشد، در این حالت از یک تابع چگالی احتمال پیروی می‌کند و به صورت $f(L_k)$ بیان می‌شود. در این صورت احتمال برخورد ناپیوستگی با چال به صورت زیر محاسبه می‌گردد (Ozkaya, 2003).

$$R_k = \int_{\psi} r_k f(L_k) dL_k \quad (58-2)$$

در این معادله ناپیوستگی k با طول L_k ، به صورت متغیر و در بازه ψ قرار دارد و دارای احتمال برخورد R_k با چال است. در صورتی که احتمال برخورد به صورت گسسته مورد بررسی قرار گیرد معادله ۵۸-۲ به صورت زیر نوشته می‌شود (Ozkaya, 2003).

$$R_k = \sum_{L_{kmin}}^{L_{kmax}} f(L_{ki}) r_{ki} \quad (59-2)$$

تابع چگالی احتمال $f(L_{ki})$ پارامتر نامعلوم مساله است. تابع چگالی احتمال مشابه و رابطه‌ی خطی بین مقادیر تصادفی طول ناپیوستگی، از جمله راه‌های پیدا کردن مقادیر تصادفی است. بنابراین با داشتن تابع چگالی احتمال $g(a)$ و مقادیر تصادفی a می‌توان تابع چگالی احتمال طول $f(L)$ را به صورت زیر به دست آورد:

$$f(L) = g(a) \left| \frac{da}{dL} \right| \quad (60-2)$$

۲-۴-۶- رابطه‌ی میان چگالی (J_v) و RQD

پالمستروم (۱۹۷۴) مقدار J_v (تعداد درزه‌ها در حجم یک مترمکعب از سنگ) را با هدف افزودن پارامتر جدیدی به محاسبات درزه‌های تصادفی به صورت زیر ارائه نمود (Tollenaar, 2008).

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} + \frac{Nr}{5\sqrt{A}} \quad (۶۱-۲)$$

در این معادله S_1, S_2, S_3 و S_n میانگین فاصله‌داری برای دسته درزه‌های ۱، ۲، ۳ و n ، تعداد درزه‌ها در شرایط واقعی و A مساحت پنجره‌ی برداشت برحسب مترمربع است. پالمستروم J_v را مرتبط با مقدار RQD در نظر گرفت و بین این دو پارامتر معادله‌ی (۲-۳۹) را برقرار کرد (Tollenaar, 2008).

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (۶۲-۲)$$

پس از بررسی‌های انجام‌شده توسط پالمستروم، هادسون^۱ و پریست (۱۹۷۹)، مقدار RQD با استفاده از فراوانی ناپیوستگی‌ها در طول یک خط برداشت، به صورت زیر ارائه شد (Palmstorm, 2005).

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(1 + 0.1\lambda) \quad (۶۳-۲)$$

که در آن λ فراوانی ناپیوستگی‌ها است.

۲-۴-۷- رابطه‌ی شدت حجمی و فاصله‌داری

طبق نظر برخی از محققین (درشوایتز (۱۹۸۴)، درشوایتز و هردا (۱۹۹۲)) شدت حجمی مطابق با معادله‌ی (۲-۶۴) با فاصله‌داری رابطه‌ی عکس دارد.

$$P_{32} = \frac{C}{S} \quad (۶۴-۲)$$

در این معادله C پارامتر ثابت و S فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است. پارامتر ثابت C ، به توزیع جهت‌داری بستگی دارد. درشوایتز و هردا (۱۹۹۲) برای توزیع‌های یکنواخت مقدار C را ۲ و برای شرایط غیریکنواخت از معادله‌ی زیر جهت محاسبه C استفاده کردند (Meyer and Einstein, 2002).

^۱ Hudson

$$C = \frac{1}{\sum_i \left[\frac{P_{32,i}}{P_{32}} \sin \theta_i \right]} \quad (65-2)$$

$P_{32,i}$ بخشی از شدت حجمی کل (P_{32}) مربوط به دسته‌درزه‌ی i و θ_i زاویه‌ی بین امتداد ناپیوستگی‌های دسته‌درزه i و امتداد خط برداشت است (Meyer and Einshtein, 2002).

۲-۴-۸- ارتباط بین بازشدگی و طول اثر

شولز و کاوی، داورس و همکاران (۱۹۹۳)، پیروی رابطه‌ی بین بازشدگی و طول از یک تابع خطی را بررسی کردند. با توجه به مکانیک الاستیک خطی ناپیوستگی‌ها که توسط پولارد و آیدین^۱ (۱۹۸۸) ارائه شد، یک رابطه‌ی خطی بین بازشدگی و طول برقرار است. رنشاو و پارک^۲ (۱۹۹۷) اظهار کردند که بازشدگی یک ناپیوستگی نشان‌دهنده‌ی انرژی موجود برای رشد ناپیوستگی است. بنابراین رابطه بین بازشدگی و طول اثر ناپیوستگی می‌تواند برای استنباط عوامل مؤثر بر ایجاد ناپیوستگی در مقیاس‌های طولی مختلف استفاده شود (chen and Tonon, 2012).

برخی محققان بر اساس مشاهده ویژگی‌های ناپیوستگی از نتایج برداشت‌های میدانی رابطه‌ی بین طول اثر ناپیوستگی و بازشدگی را توسعه داده‌اند (استون^۳ (۱۹۸۴)، ورمیلی و شولز (۱۹۹۵)، هاتون و همکاران^۴ (۱۹۹۴)، رنشاو و پارک (۱۹۹۷)). پیشنهاد شده است که بازشدگی می‌تواند با یک تابع توانی با طول ناپیوستگی به صورت زیر ارتباط داده شود (Baghbanan and Jing, 2007).

$$h = a l^\beta \quad (66-2)$$

در این رابطه h بازشدگی، l طول اثر و β بین ۰/۵ تا ۲ متغیر است. مشاهدات قطعات رگه‌ای با طول محدود و ایزوله نشان می‌دهد که عرض رگه با طول، نسبتی خطی دارد. در حقیقت روابط خطی بین

^۱ Pollard & Aydin

^۲ Renshaw & Park

^۳ Stone

^۴ Hatton et al

بازشدگی و طول همان تابع توانی است با این تفاوت که در آن توان برابر ۱ است. مطالعه‌ی الگوی ناپیوستگی گسلی در قطعات رسی با تغییر شکل‌های کششی، وجود یک نسبت مقیاسی جدید برای طول 1 یک ناپیوستگی به‌عنوان تابعی از سطح آن را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی این رابطه این بوده که عرض (بازشدگی) ناپیوستگی با طول آن به‌صورت زیر ارتباط دارد.

$$W \approx 1^{(1-\beta)/\beta} \quad (۶۷-۲)$$

رابطه‌ی بین بازشدگی یا عرض ناپیوستگی با طول گسل‌ها یا رگه‌ها، ممکن است که یک واحد توانی یکسان برای تمامی ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها و رگه‌ها نداشته باشد (Baghbanan and Jing, 2007). مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها دلیل محکمی بر نبود رابطه و یا قانون معتبر عمومی بین طول شکستگی و بازشدگی است. از سوی دیگر، مطالعات اخیر صورت گرفته نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که بازشدگی و طول اثر به هم مرتبط هستند (Baghbanan and Jing, 2007).

این مطالعات و رابطه‌های پیشنهادشده بر اساس مشاهده اندازه ناپیوستگی‌ها در محدوده سانتی‌متر تا متر، در مناطق مختلف انجام شده است. در مدل‌های پیچیده هندسی مانند مدل‌های شبکه ناپیوستگی‌های مجزا، تعداد زیادی شکستگی کوچک با بازشدگی هیدرولیکی کوچک و تعداد خیلی کمی شکستگی بزرگ با بازشدگی بالا مشاهده می‌شود. در کل در طبیعت بازشدگی شکستگی به صورت همبسته با طول اثر ظاهر می‌شوند. برای بررسی تاثیر همبستگی بازشدگی- طول اثر روی نفوذپذیری سنگ‌های شکسته، یک معادله همبستگی بر اساس توزیع لاگ نرمال کوتاه شده^۱ (TCDF) بازشدگی و توابع توان طول شکستگی توسعه داده شده است. کلید این همبستگی، تابع‌های توزیع ترکیبی است که می‌تواند به‌صورت تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در محدوده صفر تا ۱ ایجاد شود. تابع توزیع ترکیبی برای طول شکستگی‌ها به‌صورت زیر است (Baghbanan and Jing, 2007).

¹ Truncated Cumulative Density Function

$$TCDF = FLNTR(l) \quad (۶۸-۲)$$

$$FLNTR(l) = F \quad (۶۹-۲)$$

$$F = \frac{l^{-D} - l_{min}^{-D}}{l_{max}^{-D} - l_{min}^{-D}} \quad (۷۰-۲)$$

در این روابط l_{max} بیشترین مقدار طول اثر، l_{min} کمترین مقدار طول اثر، D بعد فراکتال و F اعداد تصادفی تولید شده با استفاده از توزیع یکنواخت هستند که در بازه‌ی بین صفر و یک قرار می‌گیرند (Baghbanan and Jing, 2007).

با بررسی معادله‌ی (۷۰-۲) برای توزیع لاگ نرمال کوتاه شده بازشدگی، رابطه‌ی همبستگی زیر به دست خواهد آمد:

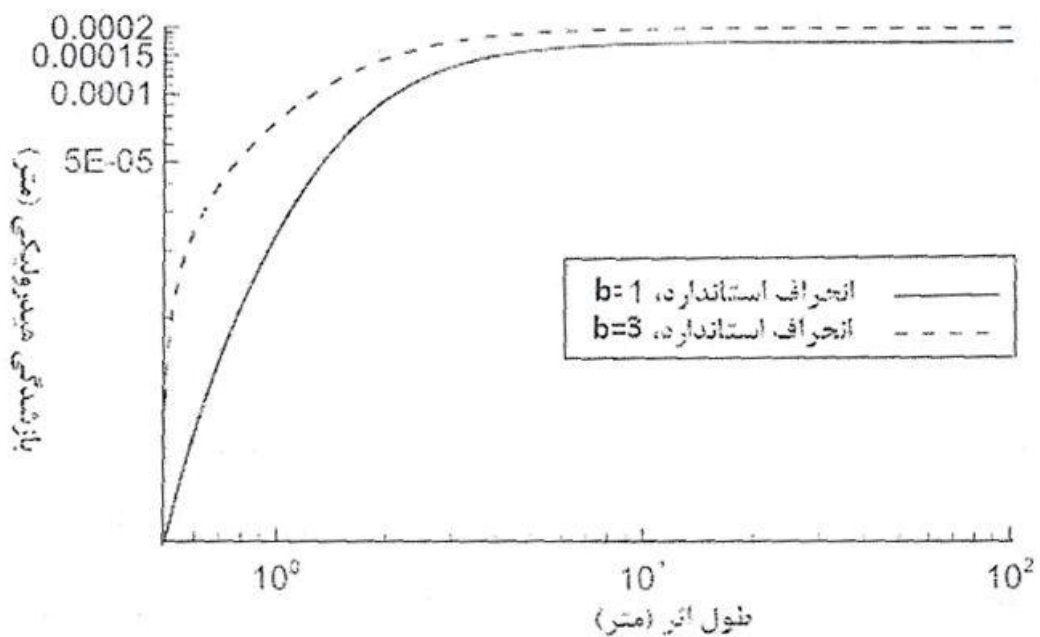
$$\frac{l^{-D} - l_{min}^{-D}}{l_{max}^{-D} - l_{min}^{-D}} = \frac{g(h) - g(h_a)}{g(h_b) - g(h_a)} \quad (۷۱-۲)$$

که در آن h_a و h_b به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بازشدگی و $g(h)$ میزان بازشدگی در نقطه‌ی مورد بررسی است.

در نهایت می‌توان به رابطه‌ی زیر رسید:

$$l = \{l_{min}^{-D} + \left(\frac{g(h) - g(h_a)}{g(h_b) - g(h_a)}\right)(l_{max}^{-D} - l_{min}^{-D})\}^{-\frac{1}{D}} \quad (۷۲-۲)$$

شکل ۲-۲۲ نشان‌دهنده رابطه بین بازشدگی و طول اثر برای مقادیر مختلف انحراف استاندارد b است که به وسیله معادله ۷۲-۲ تعریف شده است.



شکل ۲-۲۲: نسبت بازشدگی به طول اثر در مقادیر مختلف ممان دوم (Baghbanan and Jing, 2007).

خط چین و خط ممتد به تغییرات بازشدگی با افزایش طول اثر برای مواردی که b برابر با ۱ و ۳ است، مربوط می‌شود. شکل (۲-۲۲) نشان می‌دهد که احتمال داشتن یک بازشدگی بزرگ با افزایش b افزایش می‌یابد (Baghbanan and Jing, 2007).

۲-۴-۹- رابطه‌ی بین امتداد، زاویه میل، شیب و جهت شیب

امتداد و زاویه میل جزو عناصر خطی و شیب و جهت شیب جزو عناصر صفحه‌ای هستند. عناصر صفحه‌ای شامل سطح لایه‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌ها است. وضعیت فضایی عناصر صفحه‌ای به وسیله‌ی امتداد و شیب آن‌ها تعیین می‌شود.

امتداد یک صفحه، فصل مشترک سطح آن صفحه با سطح افق است که معمولاً آن را نسبت به یک جهت معین بر حسب زاویه‌ی آزیموت می‌سنجند (Priest, 1993).

شیب حقیقی یک صفحه، زاویه‌ی بین آن صفحه و سطح افق است. شیب حقیقی در یک سطح قائم و عمود بر امتداد صفحه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار آن از صفر تا ۹۰ درجه در تغییر است. در صورتی که

زاویه فوق در جهت غیر عمود بر امتداد اندازه‌گیری شود، شیب به‌دست‌آمده را شیب ظاهری می‌نامند. اندازه‌ی شیب ظاهری همواره از شیب حقیقی کمتر است.

عناصر خطی مانند محور چین، با امتداد و زاویه میل تعریف می‌شوند. جهت‌یابی یک خط در صفحه‌ی افقی را نسبت به شمال، امتداد می‌نامند.

زاویه‌ی میان خط و افق بر روی یک سطح قائم، زاویه‌ی میل نامیده می‌شود. زاویه میل (پلانژ) در واقع زاویه‌ای بین 90° و 90° درجه خواهد داشت (Priest, 1993).

در صورت داشتن زاویه‌ی شیب و جهت شیب می‌توان امتداد (ترند) و زاویه میل را با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

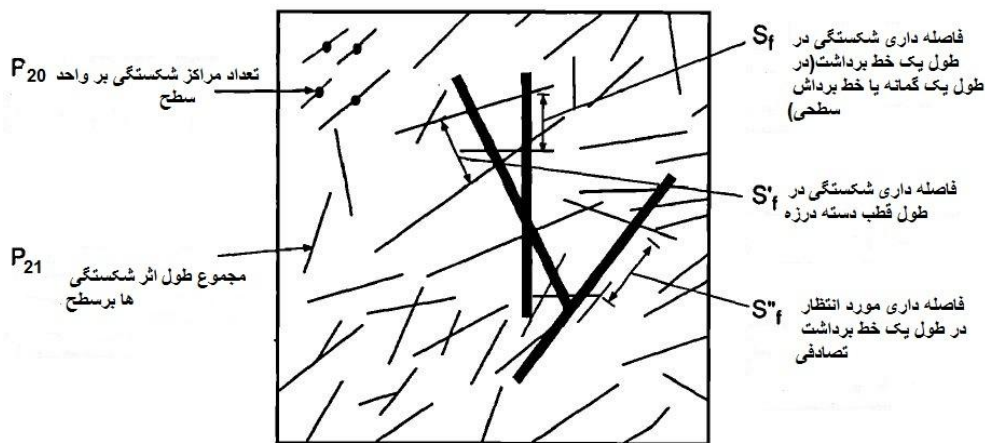
$$\alpha_n = \alpha_d \pm 180^\circ \quad 0 \leq \alpha_n \leq 360 \quad (73-2)$$

$$\beta_n = 90^\circ - \beta_d \quad 0 \leq \beta_d \leq 90 \quad (74-2)$$

در این معادلات α_n امتداد، β_n زاویه میل، α_d و β_d به ترتیب جهت شیب و شیب هستند (Priest, 1993).

۲-۴-۱۱- رابطه‌ی چگالی خطی و فاصله‌داری

شدت ناپیوستگی معمولاً با فاصله‌داری S_f (فاصله‌ی بین دو شکستگی نزدیک به یکدیگر در طول یک خط برداشت) در ارتباط است. در شکل (۲-۲۳) انواع فاصله‌داری‌ها، چگالی و شدت ناپیوستگی‌ها به‌صورت جداگانه تعریف شده‌اند. فاصله‌داری اصلی بین ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری تصادفی که بر مبنای تابع توزیع فیشر با توجه به جهت‌داری ناپیوستگی تعریف‌شده و فاصله‌داری قطب دسته‌درزه‌ها در این شکل موردتوجه قرار گرفته است و از آن‌ها برای ایجاد ارتباط میان فاصله‌داری و چگالی خطی ناپیوستگی استفاده‌شده است (Dershowitz and Herda, 1992).



شکل ۲-۲۳: اندازه‌ی یک و دوبعدی شدت ناپیوستگی (Dershowitz and Herda, 1992).

اندازه‌گیری فاصله‌داری واقعی در طول یک خط برداشت با استفاده از ضرب فاصله‌داری در کسینوس زاویه‌ی بین بردار عمود بر ناپیوستگی‌ها و راستای خط برداشت (θ) امکان‌پذیر است.

$$S'_f = S_f \cos \theta \quad (۷۵-۲)$$

که در این معادله پارامترها در شکل ۲-۲۳ تعریف شده است. در نتیجه چگالی خطی اندازه‌گیری (P_{10}) با معکوس فاصله‌داری واقعی ناپیوستگی طبق رابطه‌ی زیر در ارتباط است.

$$P_{10} = \frac{1}{S'_f} \quad (۷۶-۲)$$

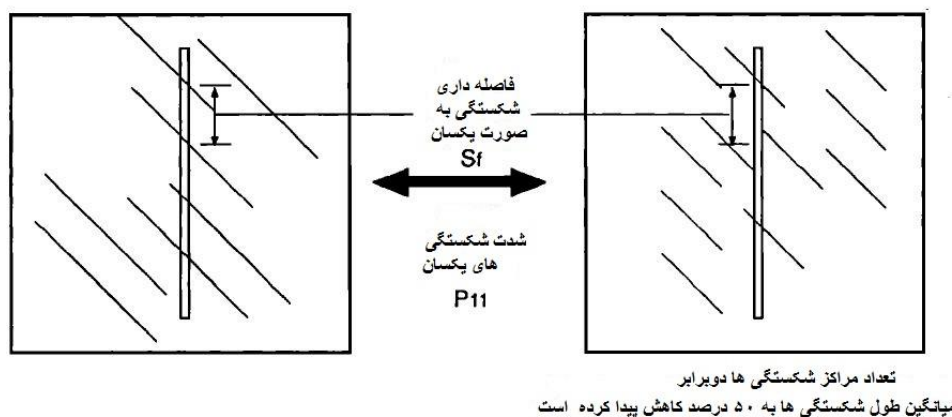
همانند S'_f ، P_{10} مستقیماً به جهت‌داری ناپیوستگی و جهت خط برداشت بستگی دارد، برای عدم وابستگی فاصله‌داری به جهت‌داری فرضی به صورت S''_f در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از معادله‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$S''_f = S_f \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f_{\theta}(\theta) \cos \theta d\theta \quad (۷۷-۲)$$

در این معادله $f_{\theta}(\theta)$ تابع توزیع فیشر برای جهت‌داری ناپیوستگی است. بنابراین می‌توان معادله‌ی بالا را به صورت معادله ۲-۷۸ بازنویسی کرد.

$$S''_f = S_f \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{k \cos(\theta - \bar{\theta})} \sin(\theta - \bar{\theta}) \cos \theta d\theta \quad (78-2)$$

که در آن، $\bar{\theta}$ میانگین زاویه‌ی بین بردار عمود بر ناپیوستگی و امتداد خط برداشت است. به منظور عدم وابستگی به جهت‌داری، اندازه‌ی P_{10} باید بر اساس جهت‌داری تصادفی خط برداشت تعیین گردد. قابل ذکر است P_{10} و S_f به اندازه‌ی ناپیوستگی بستگی ندارند (شکل ۲-۲۴). برای یک دسته درزه با جهت‌داری یکسان، اگر تعداد ناپیوستگی دو برابر و از وسط نصف شوند مقادیر S_f و P_{10} تغییری نمی‌کند (Dershowitz and Herda, 1992).



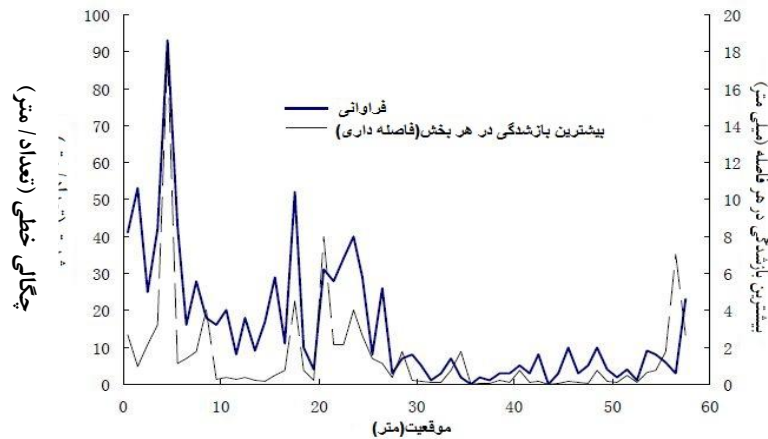
شکل ۲-۲۴: عدم وابستگی S_f و P_{10} به اندازه ناپیوستگی (Dershowitz and Herda, 1992).

۲-۴-۱۲- رابطه‌ی بین بازشدگی و چگالی خطی ناپیوستگی

مارت^۱ و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که ناپیوستگی‌ها با بازشدگی بزرگتر، با شدت و تراکم بیشتری در شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها بوجود می‌آیند (شکل ۲-۲۵). گومز^۲ و مارت مجموعه داده‌های خط برداشت مربوط به رگه‌های پرشده با کلسیت در مرمراه‌های موجود در سنگ‌آهک ایالت پارک تگزاس را بررسی کرده‌اند. این داده‌ها شامل ۹۱۶ ناپیوستگی در طول ۵۹ متر از یک رخمون با لایه‌های موازی است. خط برداشت به فاصله‌های یک متر تقسیم شده است (Chen and Tonon, 2012).

^۱Mart

^۲Gomez



شکل ۲-۲۵: رابطه‌ی بازشدگی و شدت (Chen and Tonon, 2012).

در هر بخش، چگالی خطی (تعداد ناپیوستگی‌ها بر طول هر بخش) و بیشترین بازشدگی ناپیوستگی‌ها برداشت شده است که نشان‌دهنده‌ی رابطه بین فراوانی و بیشترین بازشدگی محلی است. از شکل ۲-۲۵ می‌توان دریافت که ناپیوستگی‌ها با بازشدگی بیشتر در نواحی‌ای که ناپیوستگی‌ها فراوانی بالاتری دارند، وجود دارند (Chen and Tonon, 2012).

۲-۵- جمع‌بندی

مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده سنگ، مبنای مطالعات بسیاری در مهندسی سنگ است. در فصلی که گذشت پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ توضیح داده شد و روش‌های برداشت این پارامترها به صورت خطی و پنجره‌ای (چهارضلعی و دایره‌ای) بررسی شد. سپس روابط مهم آرایه شده توسط پژوهشگران، میان پارامترهای هندسی توده سنگ، بیان گردید. استفاده از این روابط جهت مدل‌سازی و ارائه روابط جدید، در فصل‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل سوم

بررسی توابع آماری منطبق بر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها

نحوه توزیع و اندازه‌ی بلوک‌های سنگی اطراف یک فضای زیرزمینی را می‌توان به دو صورت پیش‌بینی کرد:

۱- تحلیل بلوک‌های واقعی با استفاده از نقشه واقعی ناپیوستگی‌های ساختگاه و جانمایی دقیق تمامی آن‌ها.

۲- تحلیل بلوک‌های تصادفی حاصل از شبیه‌سازی توده سنگ به وسیله‌ی مدل‌سازی آماری ناپیوستگی‌ها.

مدل‌سازی آماری ناپیوستگی‌های توده سنگ در سه بعد بر اساس پارامترهای هندسی درزه‌ها از جمله موقعیت، اندازه (پایایی)، فاصله‌داری، جهت‌داری و چگالی در واحد حجم توده سنگ صورت می‌گیرد. مدل‌سازی آماری شبکه ناپیوستگی‌ها به دلیل تشخیص اصول طبیعت آماری بسیاری از پارامترهای ناپیوستگی‌ها، شرایطی مشابه با آنچه در واقعیت وجود دارد را مدل خواهد کرد، بنابراین از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

پارامترهای آماری هندسه ناپیوستگی‌ها همچون موقعیت، اندازه (پایایی)، و چگالی در واحد حجم توده سنگ، باید به‌طور دقیق تعیین شوند تا در نتیجه آن شبکه ناپیوستگی‌های تصادفی از درجه اعتماد بالایی برخوردار باشند. از میان این پارامترها، تعیین اندازه و چگالی در واحد حجم توده سنگ کاری دشوار است، زیرا این پارامترها را نمی‌توان مستقیماً مشاهده و اندازه‌گیری کرد. بنابراین باید با استفاده از روابط آماری، ویژگی‌هایی که برای توده‌سنگ در دو بعد اندازه‌گیری می‌شود، به سه بعد تعمیم داده شود. شبیه‌سازی تصادفی ناپیوستگی‌های توده سنگ، امروزه به ابزار قوی و رایج در بررسی مشخصات توده سنگ در ارتباط با شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها بدل شده است. روش‌های زمین‌آماري نیز وجود دارند، اما آن‌ها در شبیه‌سازی یواسون که البته فقط در بخش کوچکی از فرایند شبیه‌سازی تصادفی نقش دارد، بکار برده شده است. یکی از مراحل مهم و تعیین‌کننده در شبیه‌سازی تصادفی توده سنگ درزه‌دار، تحلیل آماری و تعیین توابع توزیع احتمال پارامترهای مهمی چون طول خط اثر، فاصله‌داری،

جهت‌داری و بازشدگی دسته‌درزه‌های منطقه است. درواقع با تعیین این توابع توزیع احتمال و در اختیار داشتن پارامترهای مربوطه می‌توان به تولید ناپیوستگی‌هایی با خواص آماری یکسان با داده‌های حاصل از برداشت‌های زمین‌شناسی پرداخت. برای تولید این ناپیوستگی‌ها از نرم‌افزارهایی که اساس محاسبات آن‌ها الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو است استفاده می‌شود.

شکل ناپیوستگی اساساً نامعلوم است و معمولاً به شکل دایره‌ای، مستطیلی و یا چند ضلعی محدب فرض می‌شود. معمولاً اندازه ناپیوستگی با فرض کردن شکل خاصی برای ناپیوستگی و با استفاده از تابع توزیع طول خط اثر تخمین زده می‌شود.

موقعیت مرکز هندسی ناپیوستگی‌ها به جز تعداد کمی که در برداشت پنجره‌ای و یا در پیمایش گمانه‌ها ظاهر می‌شوند تا حد زیادی مجهول بوده و مستقیماً از برداشت سطحی و یا مغزه‌های حفاری نمی‌توان آن را تعیین کرد. معمولاً از توزیع پواسون برای جانمایی مرکز درزه‌ها در فضای سه بعدی استفاده می‌شود. جهت‌داری ناپیوستگی با شیب و جهت شیب مشخص می‌شود و برای تعیین تعداد دسته‌درزه‌های مختلف از تصاویر استریوگراف استفاده می‌شود.

۳-۲- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌ها

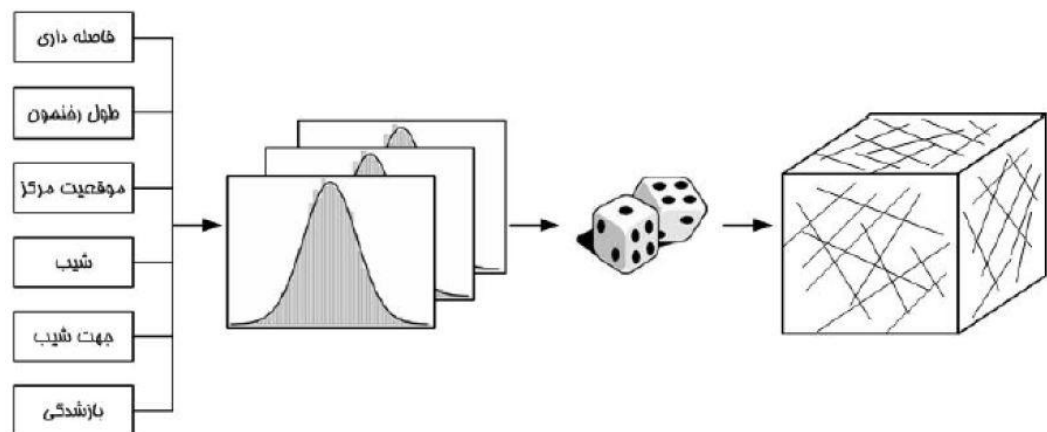
پردازش داده‌ها شامل تعیین پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها بر مبنای توزیع دسته‌درزه‌ها و به صورت آماری است. از نظر تئوری، تفاوت موجود در توابع توزیع، ناشی از تفاوت در فرآیندهای مکانیکی مختلفی است که درزه‌ها را ایجاد می‌کنند. برای مثال، توزیع یکنواخت تنش باعث به وجود آمدن توزیع‌های نمایی (برای نشان دادن طول خط اثر و فاصله‌داری) و فرآیندهای پیچیده اعمال تنش باعث ایجاد توزیع‌های لاگ نرمال (برای نشان دادن بازشدگی و طول خط اثر) می‌شود (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۲-۱- شبیه‌سازی مونت کارلو

برای شبیه‌سازی تصادفی سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ از روش مونت کارلو بر پایه شبکه ناپیوستگی‌های مجزا استفاده می‌شود. شبیه‌سازی مونت کارلو یک فرآیند تصادفی است که شبکه ناپیوستگی‌ها را با نمایش خواص ناپیوستگی نظیر موقعیت، اندازه، فاصله‌داری، جهت‌داری و بازشدگی به صورت متغیرهای تصادفی که از توابع چگالی احتمال مخصوص به خود تبعیت می‌کنند، بیان می‌کند.

شبیه‌سازی مونت کارلو برای کاهش عدم قطعیتی که به واسطه ناشناخته بودن هندسه سیستم ناپیوستگی‌ها ایجاد می‌شود، یک ابزار کارآمد است و کمی‌سازی تغییرات پارامترها را ممکن می‌سازد. این ابزار مخصوصاً برای مهندسی فضاهای زیرزمینی در توده سنگ‌های درزه‌دار مفید است (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳).

فلوچارت شبیه‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده سنگ درزه‌دار برای یک برنامه‌ی کامپیوتری در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: شبیه‌سازی تصادفی سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ با روش مونت کارلو (Priest, 1993).

۳-۲-۲- توزیع جهت یافتگی

جهت یافتگی درزه‌ها دارای دو مولفه جهت شیب و زاویه شیب است. این دو مولفه به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود تولید می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که جهت شیب از توزیع

یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند. ثابت فیشر برای هر دسته‌درزه با استفاده از نرم‌افزار Dips حاصل می‌شود. معادله‌ی تابع توزیع فیشر و یکنواخت به ترتیب به صورت زیر نشان داده می‌شوند.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{K \cos \theta}}{e^k - e^{-k}} \quad 0 < \theta < \pi/2 \quad (1-3)$$

$$f(\theta) = 1/a \quad 0 \leq \theta \leq a \quad (2-3)$$

در این معادله‌ها K ثابت فیشر، a پارامتر ثابت و θ اندازه شیب و جهت شیب است که با استفاده از نرم‌افزار Dips حاصل می‌شود (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۲-۳- چگالی حجمی درزه

ژانگ و انیشتین در سال ۲۰۰۰ رابطه‌ای را برای محاسبه P_{32} پیشنهاد نمودند (نوروزی و همکاران ۱۳۹۴):

$$p_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (3-3)$$

در این رابطه $E(A)$ مساحت متوسط ناپیوستگی است و با فرض دایره‌ای بودن ناپیوستگی محاسبه می‌شود. جهت محاسبه‌ی مساحت متوسط ناپیوستگی نیاز به متوسط قطر ناپیوستگی است که مطابق معادله‌ی ۴-۳ قابل محاسبه است:

$$E(D) = \frac{128 \mu^3}{3 \pi^3 (\mu^2 + \delta^2)} \quad (4-3)$$

در این معادله:

μ و δ به ترتیب میانگین و انحراف معیار طول ناپیوستگی‌ها در دو بعد هستند. بر این اساس می‌توان شدت ناپیوستگی‌ها در یک و دو بعد را از روابط زیر محاسبه کرد:

$$P_{10} = \frac{N}{L} \quad (5-3)$$

$$P_{21} = \mu \times p_{10} \quad (6-3)$$

در این روابط: N تعداد ناپیوستگی‌ها در طول خط برداشت، L طول خط برداشت، μ میانگین طول اثر، P_{10} شدت خطی و P_{21} شدت سطحی ناپیوستگی‌ها است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

۳-۲-۴- توزیع فاصله‌داری

فاصله‌داری به فاصله دو ناپیوستگی مجاور در امتداد خط برداشت گفته می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، توزیع فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها برای انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی می‌تواند با تابع توزیع چگالی احتمال نمایی منفی مدل شود. در صورتی که موقعیت‌های ناپیوستگی تصادفی باشند آنگاه تابع توزیع چگالی احتمال فاصله‌داری درزه، نمایی منفی خواهد بود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

تابع توزیع نمایی منفی در زیر ارائه شده است:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x < \infty \quad (8-3)$$

در این رابطه λ فراوانی ناپیوستگی‌ها است. مقدار میانگین و انحراف معیار برای این توزیع $\frac{1}{\lambda}$ است.

۳-۲-۵- توزیع طول (پایایی)

طول اثر ناپیوستگی ناشی از برخورد ناپیوستگی با سطح رخنمون، بیانگر گسترش صفحه ناپیوستگی است و اندازه بلوک‌های سنگی را تعیین می‌کند. به دلیل اینکه برداشت مستقیم ناپیوستگی‌ها در داخل توده سنگ غیرممکن است، مطالعات بسیار اندکی در خصوص پیمایش‌های سه‌بعدی ناپیوستگی وجود

دارد. بنابراین در عمل، فرض می‌شود اندازه‌های سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج به‌دست‌آمده از پیمایش‌های دوبعدی هستند. به‌طورمعمول برای توزیع طول اثر واقعی ناپیوستگی، سه تابع نمایی منفی، گاما و لاگ نرمال برای اطلاعات حاصل از پیمایش دوبعدی ناپیوستگی‌ها بکار برده می‌شوند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴). در ادامه توابع توزیع لاگ نرمال و گاما موردبررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۵-۱- توزیع لاگ نرمال

اگر x متغیری با توزیع نرمال باشد، آنگاه $y = \text{Exp}(x)$ دارای توزیع لاگ نرمال است (نعمت الهی، ۱۳۹۶).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5(x-\mu/\sigma)^2} \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (۸-۳)$$

و در نتیجه تابع لاگ نرمال به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right]^2\right] \quad (۹-۳)$$

در این روابط μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار هستند (نعمت الهی، ۱۳۹۶).

۳-۲-۵-۲- توزیع گاما

این توزیع یکی از توابع توزیع احتمالی گسسته و دارای دو پارامتر مقیاس θ و پارامتر شکل k است. اگر k عددی طبیعی باشد، آنگاه توزیع گاما معادل با مجموع k متغیر تصادفی توزیع نمایی با پارامتر $\frac{1}{\theta}$ است. در صورتی که پارامترهای x ، Γ و θ بزرگ‌تر از صفر باشند، توزیع گاما به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Gamma(x) = x^{k-1} \frac{e^{\left(\frac{-x}{\theta}\right)}}{\theta^k \Gamma(k)} \quad (10-3)$$

هرگاه مقدار k برابر یک شود، حالت خاصی از توزیع گاما به وجود می‌آید که توزیع نمایی نامیده می‌شود (نعمت الهی، ۱۳۹۶).

۳-۲-۶- توزیع بازشدگی ناپیوستگی‌ها

با مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تعیین توابع توزیع احتمال بازشدگی تا به امروز مشخص شده است که این پارامتر از دو تابع توزیع احتمال لاگ نرمال و توان پیروی می‌کند. این توابع توزیع در مطالعات گیل ۱۹۷۹، بارتن و حکمی ۱۹۹۰، پیراک و نولته ۱۹۹۷، مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر موارد اشاره شده، در مطالعات حکمی و لارسون ۱۹۹۶، اورون و برکویتز ۲۰۰۱ و شریفزاده و همکاران در سال ۲۰۰۳، از تابع توزیع نرمال برای نشان دادن بازشدگی درزه‌ها استفاده شد (Ozkaya, 2003). همچنین برازش تابع توزیع احتمال توان روی بازشدگی ناپیوستگی‌ها در مطالعات انجام شده توسط دروزی^۱ و همکاران ۲۰۰۱، مورزنکو^۲ و همکاران ۲۰۰۲ نیز دیده می‌شود (Ozkaya, 2003).

۳-۲-۷- موقعیت مکانی ناپیوستگی‌ها

برای تعیین محل ناپیوستگی‌ها، رویکرد معمول استفاده از یک نقطه‌ی تکی (اغلب مرکز درزه) برای نشان دادن محل ناپیوستگی است. در اکثر موارد برای مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا فرض می‌شود که موقعیت ناپیوستگی‌ها از یک مدل پردازش پواسون تبعیت می‌کند. در مدل پواسون بر اساس یک الگوریتم بازگشتی خاص، محل مرکز ناپیوستگی‌ها از طریق تولید اعداد تصادفی بر اساس الگوریتم بازگشتی تولید می‌شوند. این الگوریتم قسمت اعشاری اعداد محاسبه شده را با استفاده از رابطه‌ی بازگشتی زیر اتخاذ می‌کند (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳):

^۱Drowsy

^۲ Morzenigo

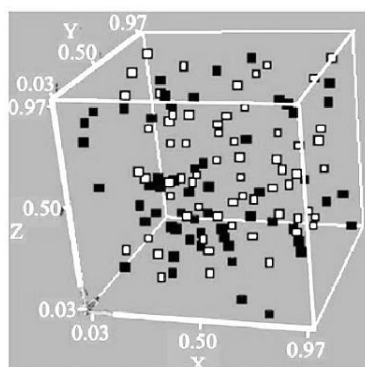
$$R_{i+1} = 27R_i - \text{int}(27R_i) \quad (11-3)$$

در این رابطه R_i یک عدد تصادفی در بازه‌ی صفر و یک است و $\text{int}(x)$ قسمت صحیح عدد x است و R_0 یک مقدار اولیه است که از الگوریتم تناسب ضربی^۱ تولید می‌شود. اگر فاصله تولید شده به صورت دو بازه در امتداد محورهای دستگاه مختصات محلی تعریف شود می‌توان گفت مختصات نقطه‌ی میانی (x_i, y_i, z_i) را برای تمامی درزه‌ها با استفاده از معادلات زیر می‌توان تولید کرد (شکل ۳-۲) (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳):

$$x_i = x_{g1} + R_i(x_{g2} - x_{g1}) \quad (12-3)$$

$$y_i = y_{g1} + R_i(y_{g2} - y_{g1}) \quad (13-3)$$

$$z_i = z_{g1} + R_i(z_{g2} - z_{g1}) \quad (14-3)$$



شکل ۳-۲: موقعیت مرکز درزه‌ها در یک مدل سه‌بعدی (ابولقاسم اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۳- آزمون‌های بهترین برازش

این آزمون‌ها برای آزمودن این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت‌شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال پیروی می‌کنند یا خیر، طراحی شده‌اند و از جمله‌ی این آزمون‌ها می‌توان به آزمون‌های بهترین

^۱ Multiplicative congruencies algorithm

برازش کولموگروف-اسمیرنوف^۱، آندرسون-دارلینگ^۲ و کای-سکویر^۳ اشاره کرد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای تشخیص فرضیه توزیع پیوسته بکار برده می‌شود. این آزمون بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی بنا نهاده شده است. نمونه‌های تصادفی x_1 تا x_n دارای توزیعی با تابع توزیع تجمعی $f(x)$ در نظر گرفته می‌شود. تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$f_n(x) = \frac{1}{n} [\text{تعداد مشاهدات} \leq x] \quad (۱۵-۳)$$

آماره کولموگروف-اسمیرنوف (D) بر اساس بزرگ‌ترین اختلاف بین تابع توزیع تجمعی تئوری و تجربی به دست می‌آید.

$$D = \max \left[f(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right] \quad (۱۶-۳)$$

آزمون آندرسون-دارلینگ برازش تابع توزیع تجمعی مشاهده‌شده را با تابع توزیع تجمعی موردنظر مقایسه می‌کند. این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف-اسمیرنوف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می‌دهد. آماره آندرسون-دارلینگ A^2 به صورت زیر تعریف شده است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (۱۷-۳)$$

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

^۱Kilmogorov-Smirnov

^۲ Anderson-Darling

^۳ Chi-Squared

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (18-3)$$

در این رابطه O_i فراوانی مشاهده شده‌ی دسته‌ی i و E_i فراوانی مورد انتظار است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_i = F(x_2) - F(x_1) \quad (19-3)$$

که در آن $F(x)$ تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال دقت آزمون و x_1 و x_2 کران‌های دسته هستند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

۳-۵- جمع بندی

در فصلی که گذشت توابع آماری نشان دهنده‌ی مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین کاربرد توابع آماری در مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها به صورت سه‌بعدی تا حدودی مورد بررسی قرار گرفتند. طبق بررسی‌های صورت گرفته طول خط اثر از توابع لاگ نرمال، نمایی منفی و گاما، بازشدگی از توزیع لاگ نرمال و توان، فاصله‌داری از توزیع نمایی منفی و شیب و جهت شیب به ترتیب از توابع فیشر و یکنواخت پیروی می‌کنند. سیر طبیعی این توزیع‌های آماری در طبیعت نیز مشاهده می‌گردد. بنابراین می‌توان با لحاظ کردن این توابع در شبیه‌سازی‌های عددی و کاربرد روش مونت کارلو، مدلی واقعی از توده سنگ از لحاظ آماری بدست آورد.

موارد مطالعاتی

۴-۱- مقدمه

در فصل‌های پیشین مفاهیم مربوط به ناپیوستگی‌ها، روابط میان پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها و توابع توزیع مربوط به آن‌ها در توده سنگ مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل با تمرکز بر ساختگاه سد مخزنی پارسیان، سد کارون ۴ و سد آزاد، ابتدا تمامی موارد مطالعاتی از لحاظ موقعیت جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس برای هر منطقه، توابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها با استفاده از نرم افزارهای Dips و Easy-fit استخراج شده است. از میان توابع توزیع برازش شده بر روی داده‌های مناطق مورد مطالعه، بر اساس آزمون بهترین برازش مناسب‌ترین تابع انتخاب می‌گردد. این توابع توزیع، در فصل پنجم برای مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزای توده سنگ مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۴-۲- معرفی پروژه‌های مورد بررسی

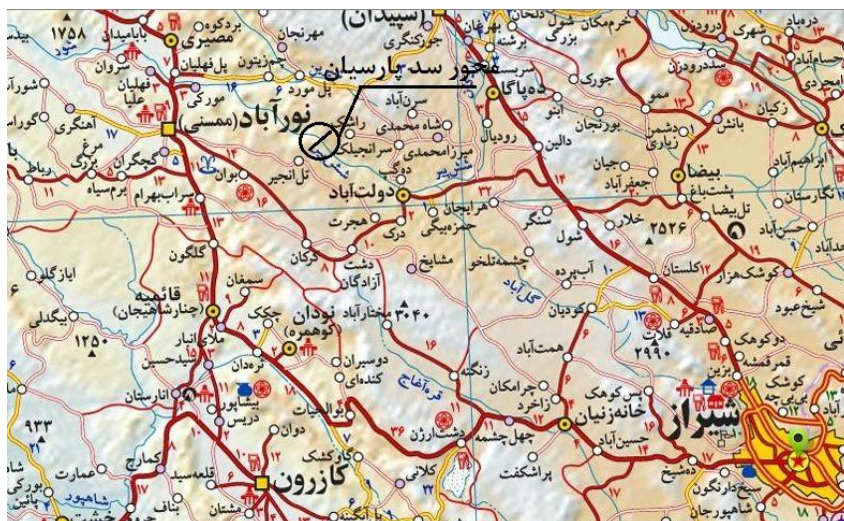
در این پژوهش از داده‌های سد مخزنی پارسیان، سد کارون ۴ و سد آزاد به عنوان موارد مطالعاتی استفاده شده است که در ادامه به طور مختصر هر کدام شرح داده می‌شود.

۴-۲-۱- ساختگاه سد مخزنی پارسیان

در این بخش سد مخزنی پارسیان از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲-۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

گستره‌ی مورد مطالعه در استان فارس و در حدود ۱۳۵ کیلومتری شمال غربی شهر شیراز و در ۵۴ کیلومتری شرق شهرستان نورآباد ممسنی واقع است (شکل ۴-۱). مختصات سد مخزنی پارسیان در طول "۲۰/۰۷' ۴۸° ۵۱" شرقی و عرض "۳۵/۶۱' ۴۸° ۵۱" شمالی واقع شده است (شرکت مهندسی مشاور لار، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی ساختگاه سد پارسیان (شرکت مهندسی مشاور لار، ۱۳۸۸).

۴-۲-۱-۲- خلاصه‌ای از زمین‌شناسی عمومی و مهندسی

توده سنگ در بر گیرنده‌ی سد در تقسیم‌بندی ساختاری- رسوبی ایران زمین در ناحیه‌ی زاگرس چین‌خورده قرار دارد. در حوضه‌ی آبریز رودخانه شور که ساختگاه سد پارسیان بر روی آن قرار دارد، سنگ‌های گوناگون متعلق به سازندهای مختلف از دوران میانه زیستی تا زمان حاضر رخنمون دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌های شناخته‌شده در گستره طرح، آهک و آهک‌های دولومیتی هستند که با سنی معادل ژوراسیک فوقانی در قسمت شمال شرقی حوضه آبریز به صورت محدود، رخنمون دارند. جوان‌ترین سازندها متعلق به نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر است که در بستر رودخانه در حال تشکیل هستند. در این ناحیه راستای چین‌خوردگی‌ها در جهت شمال غربی- جنوب شرقی است و صفحه‌های محوری آن‌ها به صورت مارپیچ مانند و تاب‌خورده است. در این ناحیه، طاقدیس‌ها، بلندی‌ها را تشکیل می‌دهند و ناودیس‌ها، فرورفتگی‌های پهنه زاگرس را می‌سازند (شرکت مهندسی مشاور لار، ۱۳۸۸).

۴-۲-۱-۳- واحدهای چینه‌شناسی

کهن‌ترین سنگ‌هایی که در گستره‌ی حوضه آبریز برون‌زد دارد، گروهی از سنگ‌های آهکی هستند که تحت عنوان گروه خامی تقسیم‌بندی شده‌اند. این گروه از سنگ‌ها به زمان ژوراسیک بالایی تا کرتاسه پایینی نسبت داده می‌شوند.

واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون یافته در موقعیت ساختگاه سد پارسیان از قدیم به جدید شامل سازندهای آسماری، گچساران، بختیاری و همچنین نهشته‌های کواترنر است (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۸۸).

قدیمی‌ترین واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون یافته در موقعیت ساختگاه سد پارسیان متعلق به سازند آسماری است. سازند آسماری در طول محور طاق‌دیس پارسیان (گورک) با زاویه میل حدود ۵ درجه به طرف شرق، از موقعیت دهانه ورودی به دره گورک موجب رخنمون شدن واحدهای سنگ چینه‌ای این سازند شده است. واحدهای سنگ چینه‌ای تشکیل‌دهنده سازند آسماری در محدوده ساختگاه به سه بخش فوقانی، میانی و تحتانی قابل تفکیک است (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۸۸).

۴-۱-۲-۴- مطالعات میدانی

داده‌های مربوط به برداشت خطی توسط شرکت مهندسين مشاور لار انجام شده است. در برداشت خطی معمولاً از یک نوار یا متر استفاده می‌شود که بر روی یک رخنمون صاف از سنگ قرار داده می‌شود. تمامی درزه‌هایی که با نوار برخورد می‌کنند در نظر گرفته شده و مشخصات آن‌ها از قبیل شیب، امتداد شیب، طول خط اثر، فاصله‌داری، مقدار بازشدگی و پرشدگی ثبت می‌گردد. امتداد نوار باید به منظور تصحیح شیب و امتداد درزه‌های برداشت شده، ثبت شود.

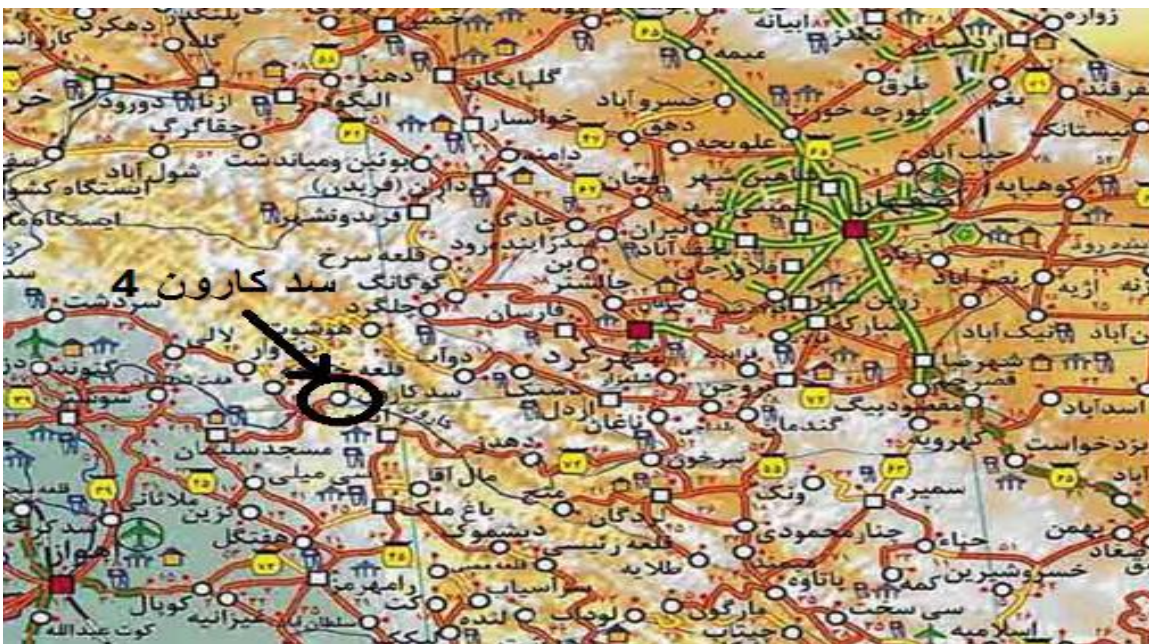
اصول برداشت پنجره‌ای نیز مشابه برداشت خطی است، با این تفاوت که در این روش تمامی ناپیوستگی‌هایی که تمام یا بخشی از آن‌ها در پنجره‌ی برداشت قرار گرفته باشند، در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از این روش باعث ایجاد خطای کمتری در تعیین سیستم درزه‌ی منطقه می‌گردد. یکی از مزایای دیگر این روش، قابلیت تعیین بعد فراکتالی ناپیوستگی‌ها است که به وسیله‌ی آن می‌توان توزیع طول ناپیوستگی‌های موجود در منطقه را مشخص نمود.

۴-۲-۲- ساختگاه سد کارون ۴

در این قسمت سد کارون ۴ از نظر موقعیت جغرافیایی، واحدهای چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۲-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

ساختگاه سد کارون ۴ در استان چهارمحال بختیاری و در فاصله‌ی ۱۸۵ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد و در ۳۴ کیلومتری جنوب غرب لردگان و در مختصات جغرافیایی به طول $50^{\circ} 24' 5''$ و عرض $31^{\circ} 35' 53''$ است (شکل ۴-۲). مناسب‌ترین راه دسترسی به محل سد، جاده آسفالتی ایذه-شهرکرد است. سازندهای زمین‌شناسی اصلی در ساختگاه سد کارون ۴ شامل آسماری و پابده بوده که متشکل از آهک، آهک متخلخل، آهک مارنی، مارن آهکی و همچنین مارن می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۲).



شکل ۴-۲: موقعیت جغرافیایی سد کارون ۴ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۲).

۴-۲-۲-۴- واحدهای چینه‌شناسی

توده‌سنگ‌های ساختگاه سد از واحدهای سازند آسماری تشکیل شده‌اند. بر مبنای شرایط زمین‌شناسی، سازند آسماری در محل سد کارون ۴ به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌گردد. با توجه به تفاوت خصوصیات زمین‌شناسی، بخش تحتانی به سه زیر بخش تقسیم می‌شود (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۲).

۴-۲-۲-۴- زمین‌شناسی ساختمانی سد کارون ۴

محل سد بر روی یال جنوب غربی تاقدیس کوه سفید واقع شده است. این تاقدیس نامتقارن بوده و یال جنوب غربی آن پرشیب‌تر از یال شمال شرقی است. در این یال شیب لایه‌بندی حدود ۶۵-۷۰ درجه جنوب غربی و امتداد آن ۴۰-۵۰ درجه به سمت شمال غربی است. سنگ‌ها عموماً درزه‌دار بوده و میزان بازشدگی با افزایش عمق کاهش می‌یابد. پرشدگی کلسیتی و رسی نیز در درزه‌ها دیده می‌شود (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۲).

۴-۲-۲-۴- مطالعات میدانی

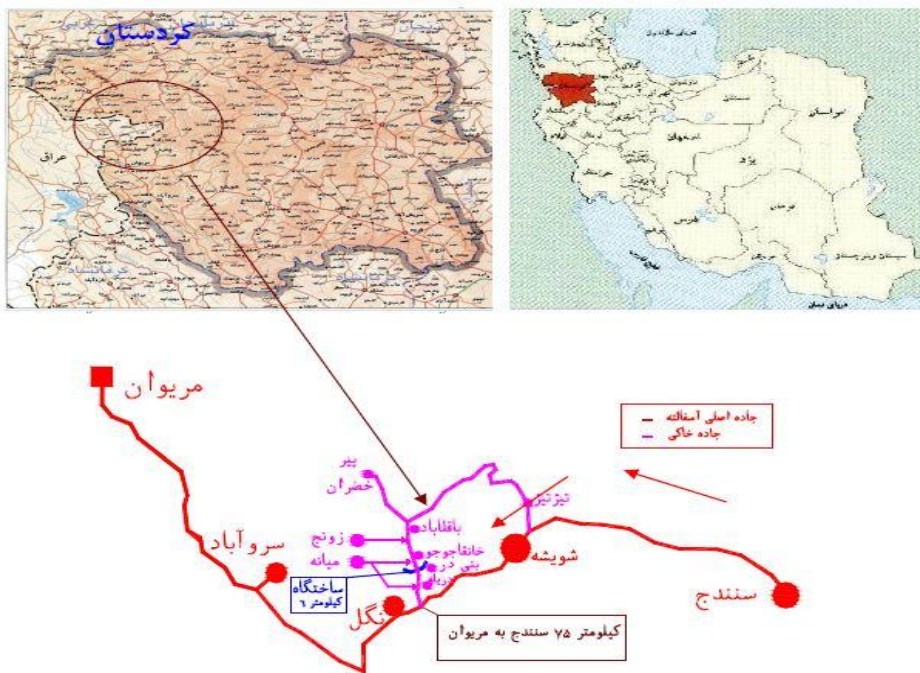
در این مطالعه برداشت سطحی درزه‌ها به روش خطی صورت گرفته است. برای استخراج پارامترهای هندسی مورد نیاز جهت تهیه مدل شبکه شکستگی مجزا بر اساس برداشت‌های صحرائی از ساختگاه سد کارون ۴، در مجموع ۲ برداشت خطی عمود بر هم صورت گرفته است. خط برداشت با طول کلی ۴۸۰ متر، که در کل تعداد ۵۵۷ درزه برداشت شده است و در این میان تعداد ۴۴۴ درزه درون ۳ دسته درزه‌ی اصلی قرار گرفته‌اند. سپس خصوصیات درزه‌های برداشت شده در قالب دسته درزه‌های اصلی تفکیک و ویژگی‌های مورد نیاز برای هر دسته درزه تعیین می‌شود. خصوصیات مورد نیاز برای هر دسته درزه شامل: تعداد دسته درزه‌های اصلی، تعداد درزه‌ی هر دسته درزه، تابع توزیع طول خط اثر، تابع توزیع بازشدگی، جهت‌داری، فاصله‌داری، ثوابت فیشر، فراوانی طولی و شدت حجمی می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۲).

۳-۲-۴- ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

در این بخش توده سنگ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳-۲-۴- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد در استان کردستان و در مجاورت رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان در نزدیکی روستای بنیدر در حال احداث می‌باشد. دسترسی به سد از طریق جاده اصلی سنندج به مریوان (۷۵ کیلومتری از سنندج) و پس از آن ۶ کیلومتر جاده اختصاصی روستای بنیدر صورت می‌گیرد. شکل ۳-۴ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محل نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد را نشان می‌دهد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).



شکل ۳-۴: موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به محدوده سد آزاد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آن (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).

۲-۳-۲-۴- زمین‌شناسی عمومی

موقعیت سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد به لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران، در محدوده زون سنندج- سیرجان (در بخش شمال غربی آن) قرار دارد. از نظر ریخت‌شناسی در گستره‌ی منطقه

رشته کوه‌های با بلندی حدود ۲۵۰۰ متر قرار دارند که روند عمومی آن‌ها عموماً شمال غربی - جنوب شرقی است. ارتفاعات منطقه ترکیبی از ماسه‌سنگ‌های کمی دگرگون شده به همراه لایه‌های شیست و فیلیت است که به دلیل تفاوت مقاومتی این دو نوع لیتولوژی، ماسه سنگ‌های کمی دگرگون شده عمدتاً به صورت برجا و برجسته درحالی که شیست و فیلیت موجود در سطح خردشده و دارای شیستوزیته بالا می‌باشند (شکل ۴-۴). لازم به ذکر است که عدسی‌های آهکی نیز به صورت برجستگی در برخی از ارتفاعات منطقه (شمال - شمال شرق) به چشم می‌خورد.

آبراهه‌ها عمدتاً به شکل شاخه درختی و لیتولوژی و تکتونیک منطقه به خوبی کنترل کننده این عوارض ریخت‌شناسی می‌باشد. شیب دره‌ها و دامنه‌ها نسبتاً تند است و شیب توپوگرافی در محدوده‌ی مخزن بالادست در حدود ۴۰-۵۰ درجه است. آبراهه‌ها در حالت جوان تا بالغ می‌باشند. طرح آبراهه‌ها عموماً منطبق بر توزیع سیستم گسلش منطقه است و دره‌ها عموماً ۷ شکل‌اند که در مناطق پست عریض‌تر می‌شوند (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).



شکل ۴-۴: نمایی از عوارض ریخت‌شناختی و آبراهه‌های موجود در ساختگاه سد آزاد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).

۴-۲-۳-۳- زمین شناسی ساختمانی

در گستره‌ی مورد مطالعه ارتباط بیشتر واحدهای دگرگون شده با یکدیگر از طریق گسل است ولی دگرشیبی‌ها را نیز به خوبی می‌توان مشاهده کرد. دگر شکلی در سنگ‌های دگرگون شده به خوبی قابل مشاهده است و خرده چین‌های تک شیب، پخ شده، برگشته و گسیخته در گستره‌ی طرح به وفور دیده می‌شوند. در بیشتر سنگ‌های دگرگون شده، به خوبی می‌توان شیستوزیته را اندازه‌گیری نمود. لازم به ذکر است که شیستوزیته در اکثر مواقع موازی لایه‌بندی است. به کمک این اندازه‌گیری‌ها روشن شده که فشار وارد بر این زون در دوره تریاس پسین دارای راستای شمالی-جنوبی بوده است. در محدوده ساختگاه جهت شیب عمومی لایه‌ها به سمت شمال شرق بوده که با افزایش عمق دارای تغییراتی می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).

۴-۲-۳-۴- مطالعات میدانی

مرحله اول مطالعات با هدف تعیین موقعیت گمانه‌های اکتشافی محدوده بالادست مخزن نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای آزاد، در تابستان ۱۳۸۷ توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس و با هماهنگی شرکت مهندسی مشاور کاوشگران (مشاور پیمانکار طرح سد آزاد) آغاز گردید. موقعیت گمانه‌ها بر اساس نقشه‌های پایه موجود در زمان شروع پروژه (نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۵۰۰۰) تعیین و جهت انجام حفاری‌های اکتشافی به طرح اعلام گردید. این حفاری‌ها شامل ۵۲۷ متر حفاری در محدوده مخزن و ۵۸۰ متر حفاری در مسیر سازه و تونل آب‌بر نیروگاه بود که نتایج آن‌ها در مطالعات مرحله اول مورد استفاده قرار گرفته است. در طی مرحله‌ی دوم، ۴ حلقه گمانه اکتشافی عمیق در محل سازه‌های زیرزمینی، ۴۴ گمانه‌ی کوتاه در مسیر تونل‌های دسترسی و ۸ گمانه در محل مخزن بالادست به تراژ کلی ۱۷۶۰ متر حفر گردیده است. هدف از حفر این گمانه‌های اکتشافی، مطالعه شرایط زمین‌شناسی زیر سطحی، ارزیابی کیفیت توده سنگ در برگیرنده‌ی سازه‌ها، تهیه نمونه‌های

مناسب برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های درون گمانه‌ای مانند دیلاتومتر، شکست هیدرولیکی و تست فشار آب (لوژان) بوده است.

به منظور آگاهی از سیستم ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ‌های دربرگیرنده‌ی سازه‌های زیرزمینی و سطحی، ناپیوستگی‌های برداشت شده در گمانه‌های اکتشافی حفر شده و همچنین سازه‌های روباز و زیرزمینی حفر شده (نقشه‌های حین ساخت) ادغام شدند و خصوصیات هندسی و توصیفی این ناپیوستگی‌ها برای هر واحد استخراج گردیدند (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).

۴-۳- توابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها

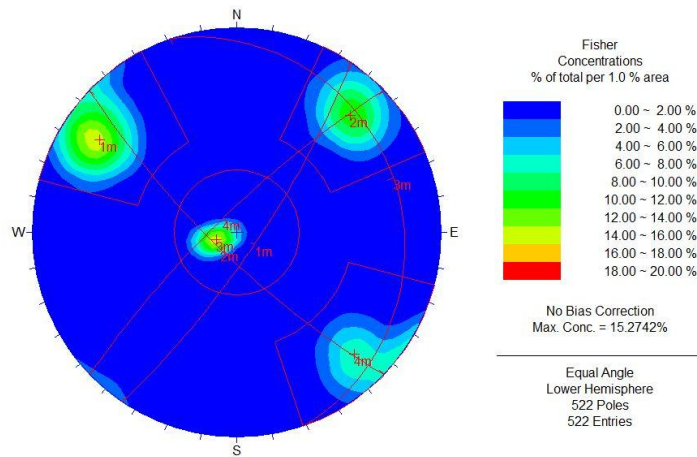
برای مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مناطق موردنظر، ابتدا با استفاده از اطلاعات بدست آمده از برداشت‌های خطی انجام شده شامل شیب، جهت شیب، طول اثر، بازشدگی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها اقدام به مطالعه‌ی آماری و بررسی توابع توزیع ویژگی‌های هندسی دسته ناپیوستگی‌ها می‌شود. در ادامه به طور جداگانه به بررسی ویژگی‌های آماری هر یک از موارد مطالعاتی پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱- ساختگاه سد مخزنی پارسیان

هر یک از پارامترهای هندسی از یک تابع توزیع آماری خاص پیروی می‌کند که در شرایط پروژه‌های مختلف با توجه به فراوانی و پراکندگی داده‌ها ممکن است تبعیت یک پارامتر از یک تابع تغییر کند. در این بخش به بررسی و تعیین توابع توزیع حاکم بر ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱-۱- توزیع جهت داری

به منظور تحلیل داده‌های درزه‌نگاری مبتنی بر شیب و امتداد شیب از نرم افزار Dips استفاده شده است. به این منظور بر اساس داده‌های برداشت شده و با استفاده از نرم افزار تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، شیب، جهت شیب و ثابت فیشر هر کدام از دسته ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: جدایش دسته ناپیوستگی‌ها در نرم افزار Dips

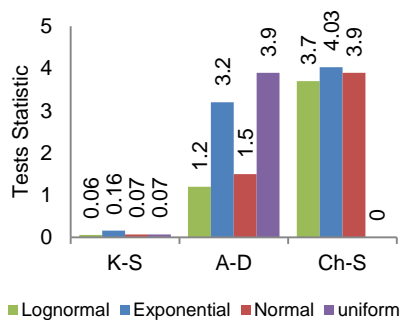
پس از تحلیل ناپیوستگی‌ها مشخص شد که ناپیوستگی‌های ساختگاه سد پارسیان را می‌توان در ۴ دسته ناپیوستگی تقسیم‌بندی کرد. مقادیر شیب، جهت شیب و ثابت فیشر مربوط به هر کدام از دسته ناپیوستگی‌ها در جدول (۴-۱) ارائه شده است. همان‌طور که ذکر شد، جهت یافتگی درزه‌ها دارای دو مولفه جهت شیب و زاویه شیب است. این دو مولفه به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود در مدل DFN تولید می‌شوند. بیشتر تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است نشان داده که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

جدول ۴-۱: پارامترهای هندسی دسته ناپیوستگی‌های برداشت‌شده

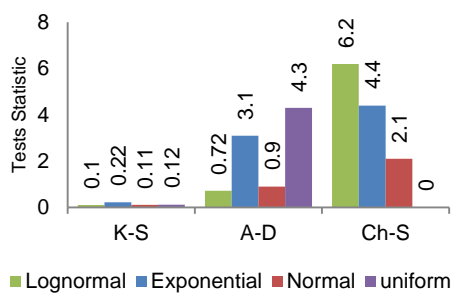
ثابت توزیع فیشر (K)	جهت‌داری دسته‌درزه‌ها		دسته‌درزه‌ها
	جهت شیب	شیب	
۳۱/۵	۱۲۲	۸۱	۱
۵۰/۵	۷۱	۱۱	۲
۹۶	۲۲۳	۸۰	۳
۳۴/۵	۳۱۵	۸۱	۴

۴-۳-۱-۲- توزیع طول خط اثر (پایایی) ناپیوستگی‌ها

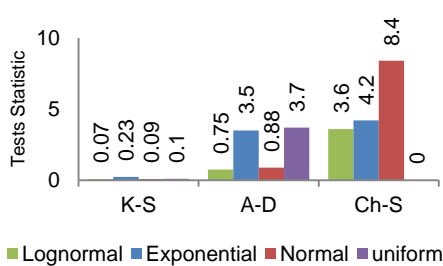
یکی دیگر از پارامترهای مهم در ساخت شبکه ناپیوستگی‌های مدل، طول خط اثر یا اندازه ناپیوستگی است. به طور کلی، تابع توزیع طول خط اثر درزه که در رخنمون قابل‌اندازه‌گیری است، به‌عنوان تابع توزیع قطر درزه دیسکی در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مربوط به پایایی هرکدام از دسته ناپیوستگی‌ها به‌صورت جداگانه توسط نرم‌افزار easy_fit تحلیل و مناسب‌ترین توابع توزیع مربوط به پایایی مشخص می‌شود. در این نرم‌افزار توابع توزیع زیادی تعریف شده است، اما با توجه به اینکه ممکن است پیروی داده از یک تابع توزیع در پروژه‌ای نسبت به پروژه‌ی دیگر متغیر باشد بر اساس تاریخچه، متداول‌ترین توابع توزیع پایایی انتخاب می‌شود. توابع توزیع نمایی، لاگ نرمال و یکنواخت به‌عنوان مناسب‌ترین تابع توزیع برای پایایی شناخته شده است. در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۰ توابع توزیع برازش شده بر هر یک از دسته درزه‌ها نشان داده شده است.



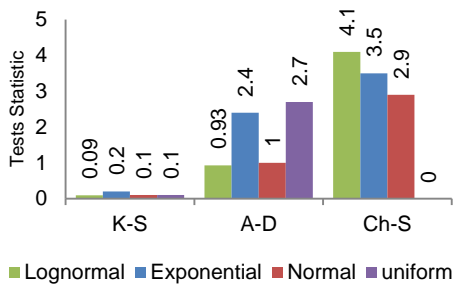
دسته درزه ۱



دسته درزه ۲

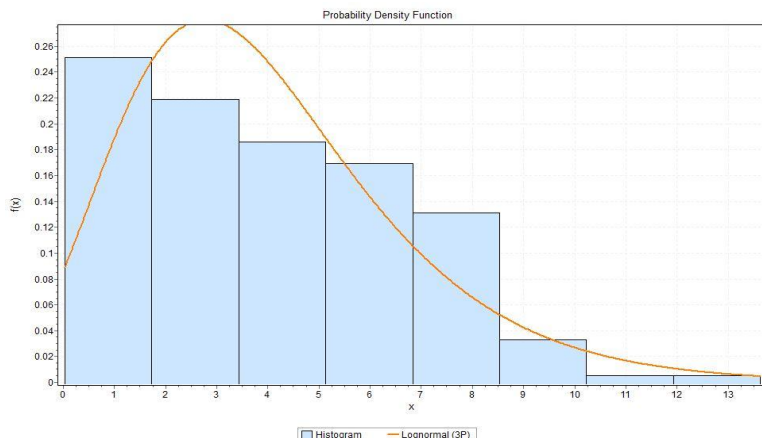


دسته درزه ۳

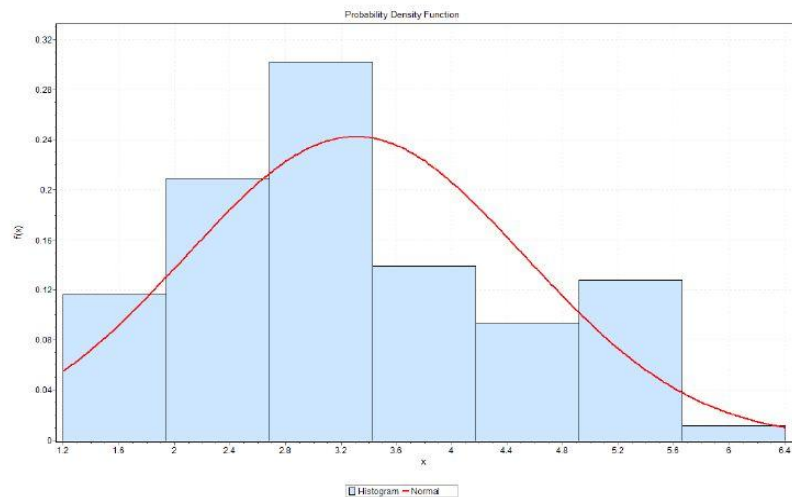


دسته درزه ۴

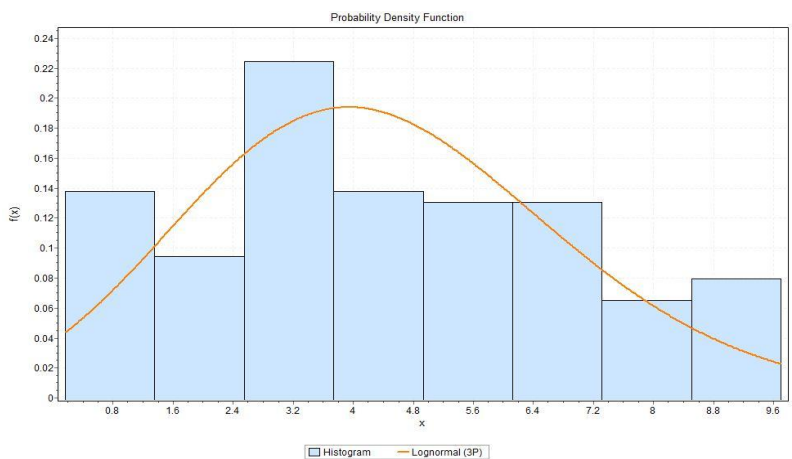
شکل ۴-۶: رتبه بندی مناسب ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی دسته ناپیوستگی ها



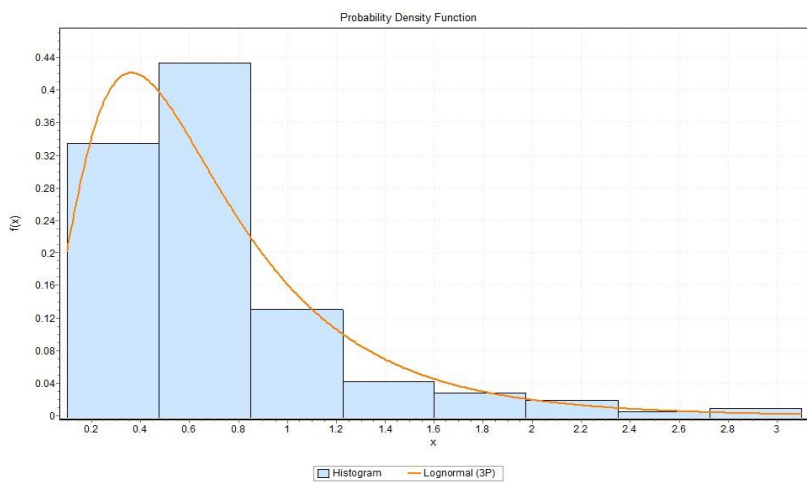
شکل ۴-۷: تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته درزه ۱ (سد مخزنی پارسیان)



شکل ۴-۸: تابع توزیع نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۲ (سد مخزنی پارسیان)



شکل ۴-۹: تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۳ (سد مخزنی پارسیان)



شکل ۴-۱۰: تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر پایایی دسته‌درزه ۴ (سد مخزنی پارسیان)

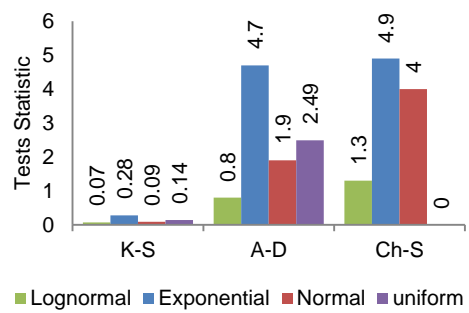
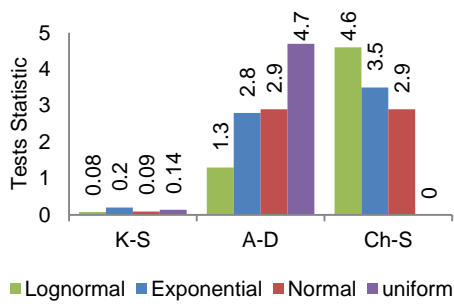
۳-۱-۳-۴- توزیع بازشدگی

همان‌طور که در جدول ۲-۴ آورده شده است، در مورد سد مخزنی پارسیان، مقادیر عددی بازشدگی‌های مربوط به برداشت خطی میدانی و همچنین بازشدگی‌های مربوط به مغزه‌های حفاری در دسترس است. با توجه به مقادیر حاصل از هر یک از روش‌های اندازه‌گیری بازشدگی ناپیوستگی‌ها، مشخص می‌شود که این مقادیر اختلاف چندانی باهم ندارند. همان‌طور که از جدول ۲-۴ پیداست، میزان بازشدگی در گمانه‌ها کمتر از بازشدگی‌های اندازه‌گیری شده بر روی سطح زمین است که این موضوع می‌تواند به دلیل فشار روباره باشد. در این پژوهش از بازشدگی مغزه‌های حفاری استفاده شده است. بنابراین داده‌های مربوط به بازشدگی مغزه‌های گمانه‌های حفاری انتخاب شده و در نرم‌افزار آماری easy-fit تحلیل شده و در نهایت در مدل‌های DFN استفاده خواهد شد.

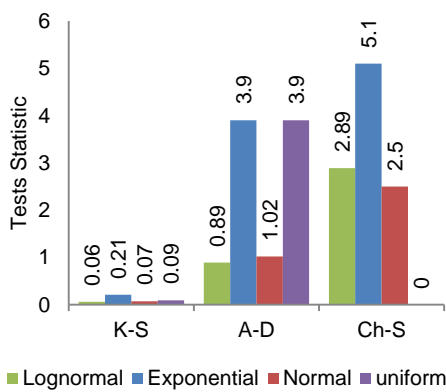
در شکل ۴-۱۱ نتایج بهترین برازش توابع توزیع مناسب بر بازشدگی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، بهترین تابع توزیع، تابع لاگ نرمال است. همچنین در شکل ۴-۱۲ تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی ناپیوستگی‌های مربوط به دسته ناپیوستگی ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۲-۴: مقادیر مربوط به بازشدگی حاصل از برداشت‌های میدانی و گمانه‌ها

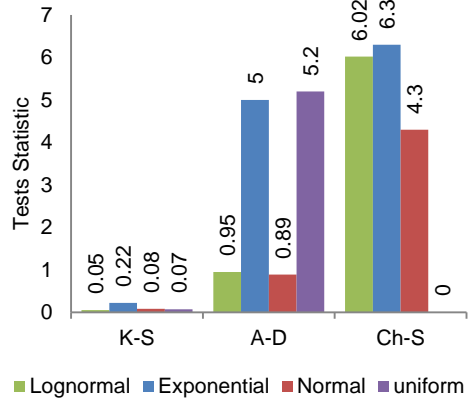
متوسط بازشدگی (میلی‌متر)		دسته ناپیوستگی‌ها
گمانه‌ها	برداشت خطی	
۲/۱	۲/۹	۱
۱/۹	۳/۶	۲
۲/۳	۲/۵	۳
۲/۷	۳/۵	۴



دسته ناپیوستگی ۱



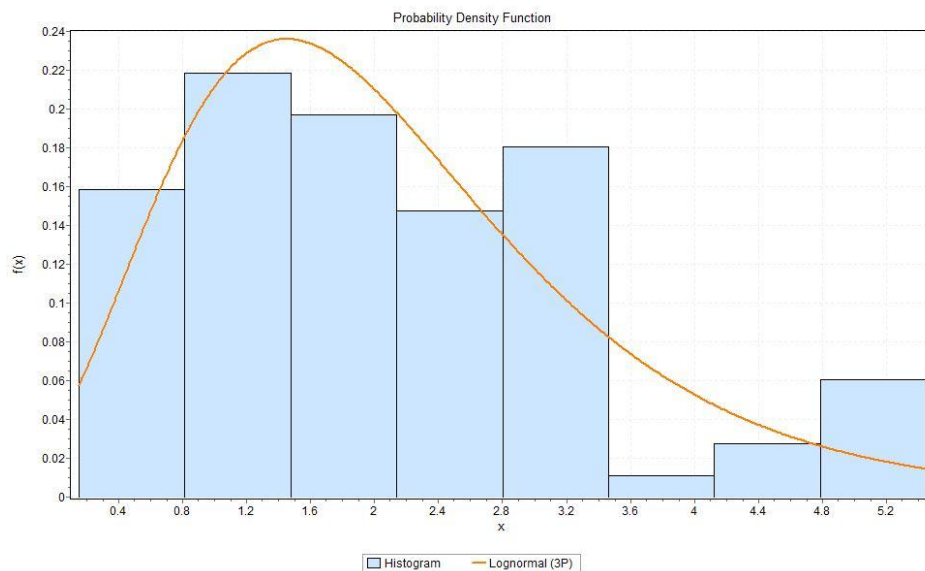
دسته ناپیوستگی ۲



دسته ناپیوستگی ۳

دسته ناپیوستگی ۴

شکل ۴-۱۱: نتایج بهترین برازش بازشدگی دسته ناپیوستگی‌ها سد مخزنی پارسیان



شکل ۴-۱۲: تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پارسیان (دسته ناپیوستگی ۱)

۴-۳-۱-۴- شدت خطی ناپیوستگی‌ها (P₁₀)

چگالی و شدت می‌توانند تعاریف متفاوتی بر اساس بعد اندازه‌گیری و بعد مورد بررسی داشته باشند. در ساخت DFN در نرم افزار 3DEC امکان تعریف چگالی و شدت برای تعیین پارامتر تراکم ناپیوستگی‌ها وجود دارد. در مدل DFN چگالی و شدت ناپیوستگی‌ها، اصولاً جایگزینی برای پارامتر فاصله‌داری که تنها محدود به یک بعد (برداشت خطی و گمانه) است، در نظر گرفته می‌شود. در روش‌های مدل‌سازی مقادیر پارامتر P₁₀ که معرف چگالی خطی ناپیوستگی‌ها است از طریق برداشت داده‌های خطی و مغزه‌های گمانه‌های حفاری، محاسبه می‌شود. بر اساس برداشت‌های صورت گرفته در منطقه چگالی خطی ناپیوستگی‌ها به صورت جدول زیر محاسبه شده است.

جدول ۴-۳: چگالی خطی ناپیوستگی‌ها برای سد مخزنی پاریسیان

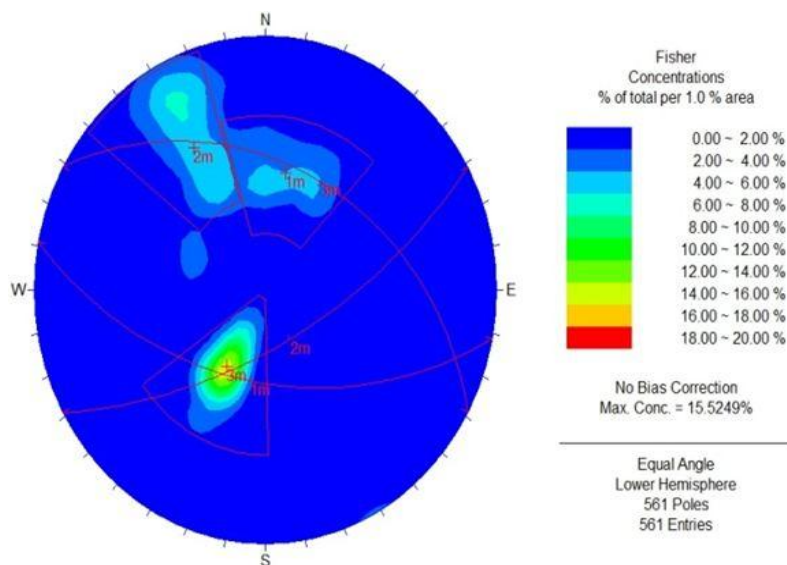
دسته درزه	۱	۲	۳	۴	مجموع
چگالی خطی (P ₁₀)	۰/۴۶	۰/۲۵	۱/۰۴	۰/۳۹	۲/۱۴

۴-۳-۲- سد کارون ۴

در این بخش به بررسی و تعیین توابع توزیع حاکم بر ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌های توده سنگ دربرگیرنده سد کارون ۴ پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱- توزیع جهت‌داری

در این مرحله ابتدا ناپیوستگی‌ها به دسته ناپیوستگی‌های مختلف تقسیم می‌شوند (شکل ۴-۱۳) و پارامترهای جهت‌داری و ثابت فیشر آن‌ها با استفاده از نرم افزار Dips محاسبه می‌شود (جدول ۴-۸).



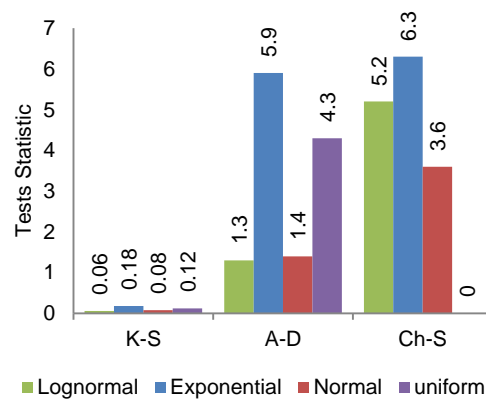
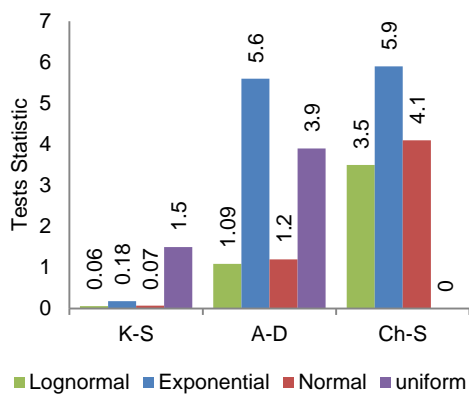
شکل ۴-۱۳: تعداد دسته‌درزه‌های ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار دیپس

جدول ۴-۴: مشخصات دسته ناپیوستگی‌های سد کارون ۴ (میانگین شیب، جهت شیب و ثابت فیشر)

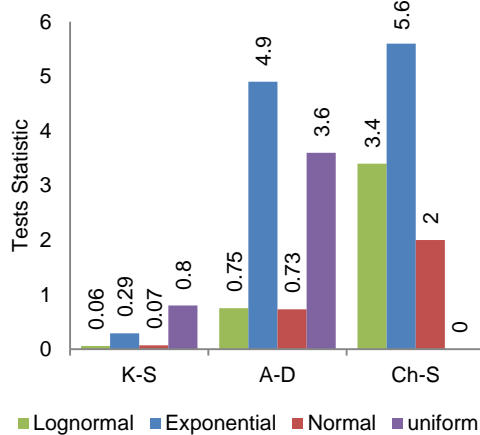
ثابت توزیع فیشر (K)	جهت‌داری دسته‌درزه		دسته‌درزه‌ها
	جهت شیب	شیب	
۳۲/۴	۱۹۱/۴	۵۰/۱	۱
۲۷	۱۵۰/۶	۶۵	۲
۴۵	۲۸/۹	۳۷/۵	۳

۴-۳-۲-۲- توابع توزیع آماری طول خط اثر ناپیوستگی‌ها

بر اساس داده‌های برداشت‌شده از منطقه، توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر ناپیوستگی‌های سد کارون ۴ به صورت شکل (۴-۱۴) قابل دسته‌بندی هستند. همان‌طور که از شکل پیداست بهترین تابع توزیع آماری منطبق بر طول خط اثر ناپیوستگی‌ها، تابع توزیع لاگ نرمال است. در شکل‌های ۴-۱۵ تا ۴-۱۷ توابع توزیع برازش شده بر طول خط اثر دسته ناپیوستگی‌های مختلف نشان داده شده است.



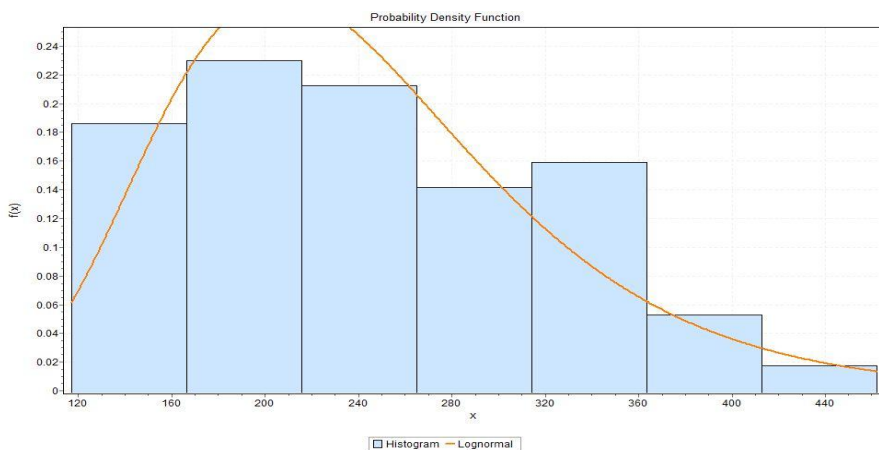
دسته ناپیوستگی ۱



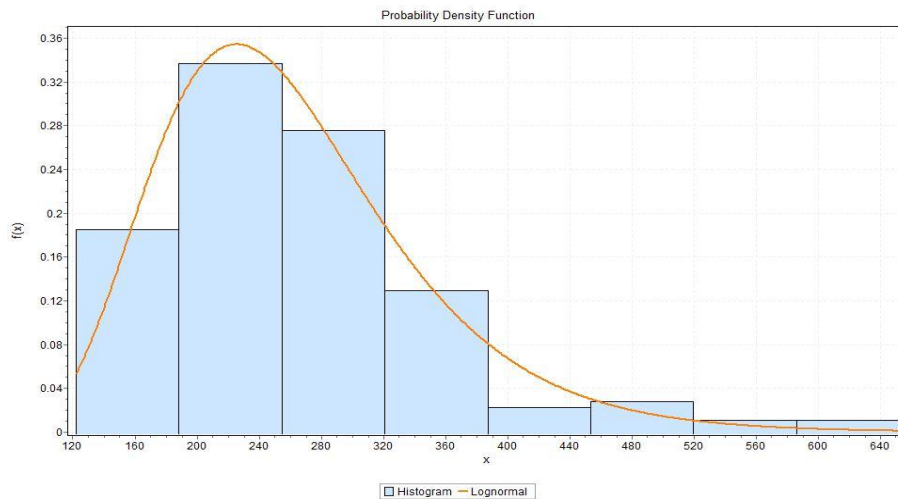
دسته ناپیوستگی ۲

دسته ناپیوستگی ۳

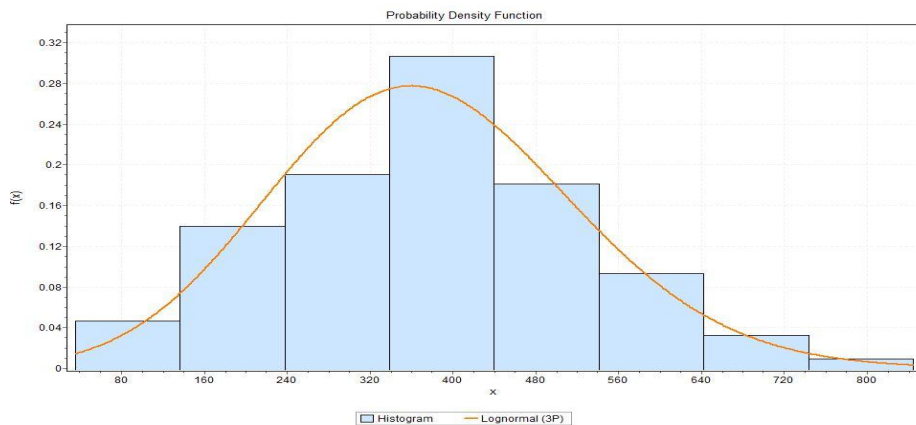
شکل ۴-۱۴: اولویت‌بندی توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته ناپیوستگی‌های سد کارون



شکل ۴-۱۵: توابع توزیع برازش شده بر طول خط اثر دسته ناپیوستگی‌ها (کارون ۴)



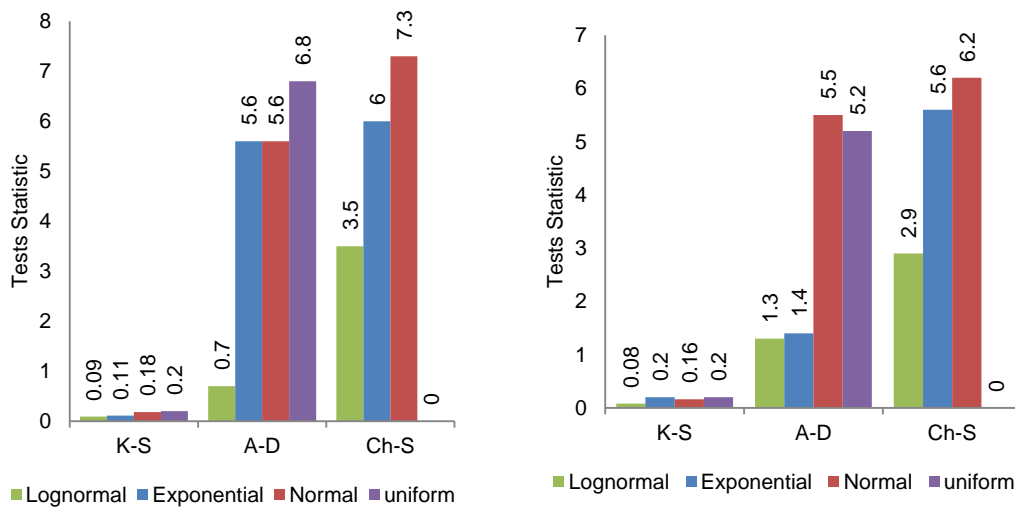
شکل ۴-۱۶: تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۲ (کارون ۴)



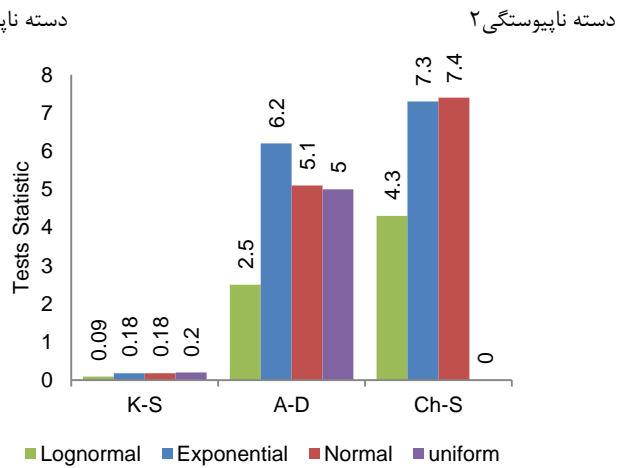
شکل ۴-۱۷: تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۳ (کارون ۴)

۴-۳-۲-۳-۴- توزیع بازشدگی

پس از برازش توابع توزیع مختلف بازشدگی برای هر دسته ناپیوستگی، نتایج به صورت خلاصه در شکل (۴-۱۸) آورده شده است. همان طور که از شکل پیداست، بهترین تابع توزیع حاکم بر بازشدگی دسته ناپیوستگی‌های مختلف، تابع توزیع لاگ نرمال است.



دسته ناپیوستگی ۱

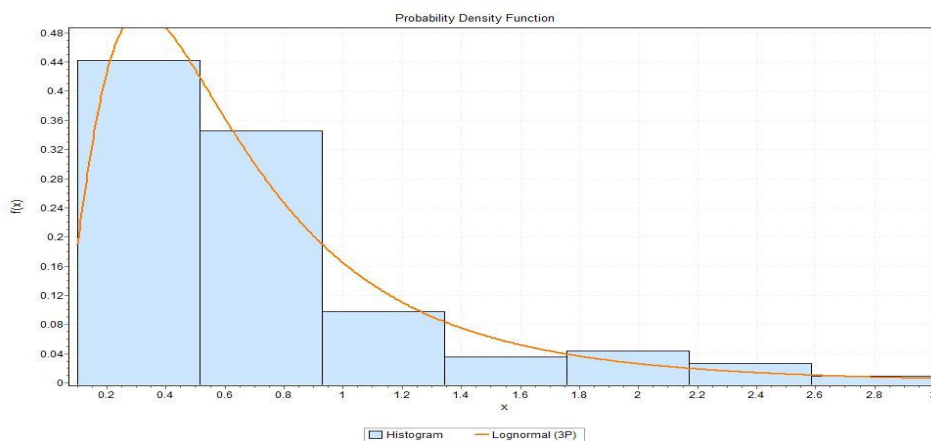


دسته ناپیوستگی ۲

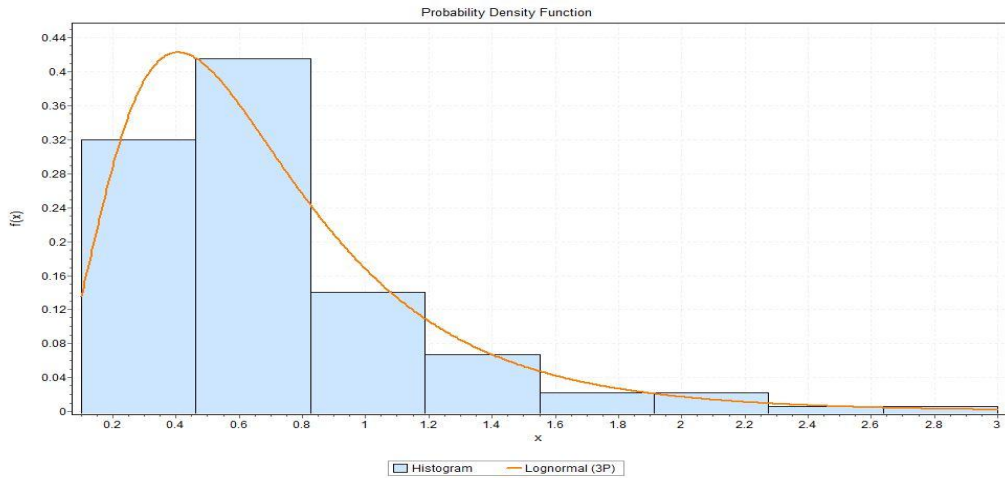
دسته ناپیوستگی ۳

شکل ۴-۱۸: اولویت بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی ناپیوستگی های سد کارون ۴

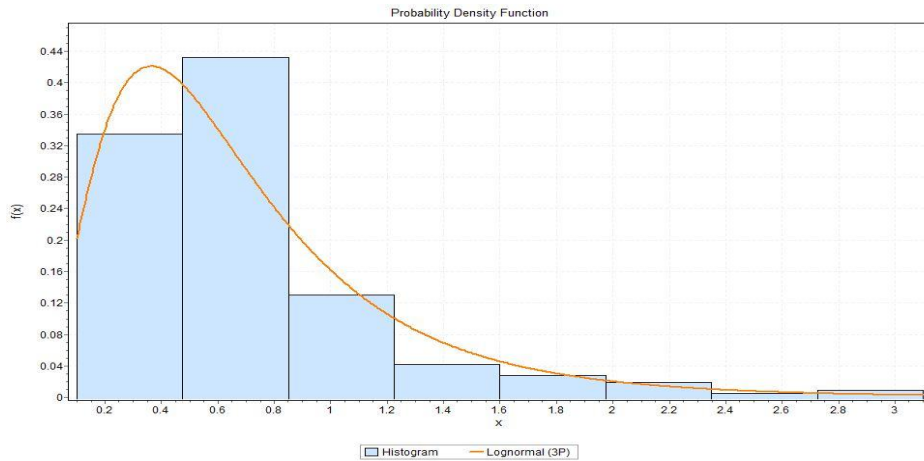
شکل های ۴-۱۹ تا ۴-۲۱ توابع توزیع مناسب برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ها را نشان می دهند. بر اساس این شکل ها تابع توزیع مناسب برای بازشدگی ناپیوستگی ها، لاگ نرمال است.



شکل ۴-۱۹: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۱ (سد کارون ۴)



شکل ۴-۲۰: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۲ (سد کارون ۴)



شکل ۴-۲۱: تابع توزیع برآزش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۳ (سد کارون ۴)

۴-۳-۲-۴- شدت خطی ناپیوستگی ها (P_{10})

بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در منطقه سد کارون ۴، تعداد ناپیوستگی‌ها بر طول خط برداشت محاسبه شده است. این مقادیر برای هر دسته ناپیوستگی به صورت جداگانه محاسبه شده‌اند. شدت خطی دسته ناپیوستگی‌ها به صورت کلی در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵: شدت خطی دسته ناپیوستگی‌ها (سد کارون ۴)

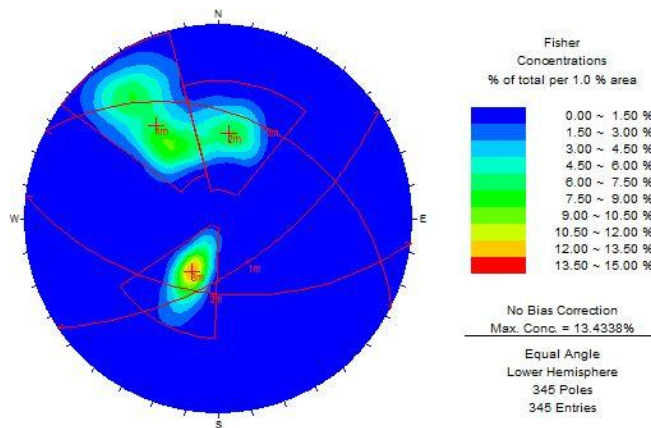
دسته ناپیوستگی	۱	۲	۳	مجموع
شدت خطی (P_{10})	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۳۹	۱/۷

۴-۳-۳- سد آزاد

در این بخش به بررسی و تعیین توابع توزیع حاکم بر ویژگی‌های هندسی شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد پرداخته می‌شود.

۴-۳-۳-۱- توزیع جهت داری

ناپیوستگی‌های برداشت شده از توده‌سنگ اطراف سد آزاد با استفاده از نرم افزار Dips به دسته ناپیوستگی‌های مختلف تقسیم می‌شوند (شکل ۴-۲۲). سپس پارامترهای جهت‌داری و ثابت فیشر هر دسته ناپیوستگی محاسبه می‌شود (جدول ۴-۱۰).



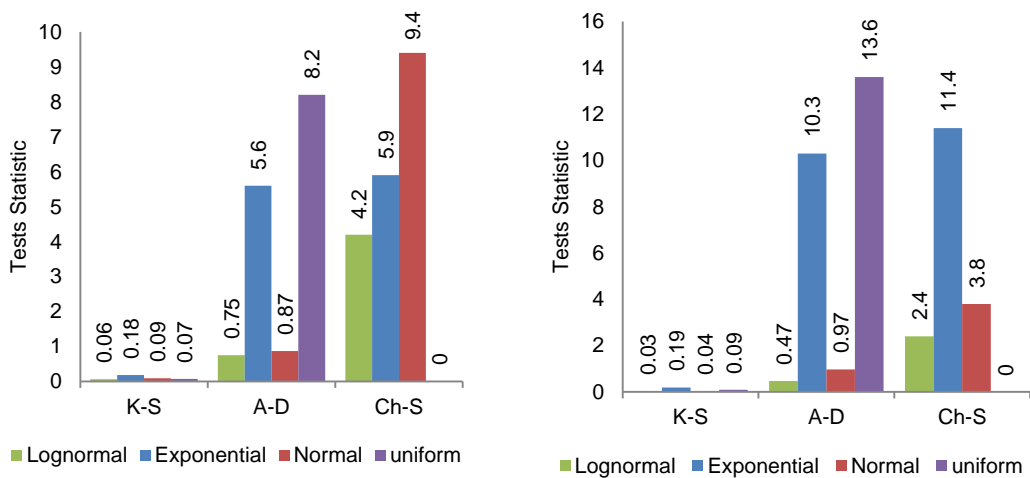
شکل ۴-۲۲: جدایش دسته ناپیوستگی‌ها بر روی شبکه‌ی استریونت (سد آزاد)

جدول ۴-۶: مشخصات جهت‌داری دسته ناپیوستگی‌های سد آزاد

ثابت توزیع فیشر (K)	جهت‌داری دسته‌درزه		دسته‌درزه‌ها
	جهت شیب	شیب	
۲۴/۵	۱۴۵	۶۰	۱
۴۷/۴	۱۸۶/۷	۴۸/۲۷	۲
۴۵/۸	۲۷/۱	۳۴/۴	۳

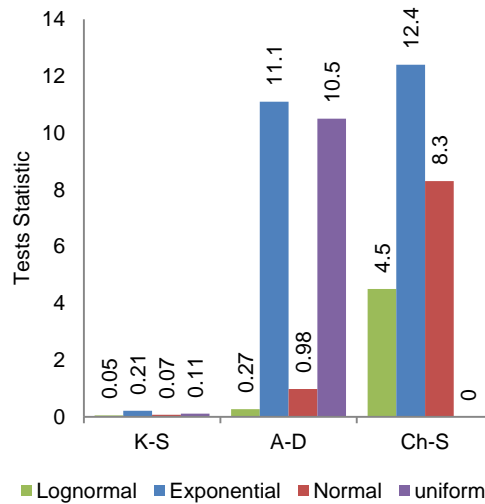
۴-۳-۲- توزیع طول خط اثر

پس از اندازه‌گیری طول خط اثر ناپیوستگی‌ها بر اساس خط برداشت در نظر گرفته شده بر روی سطوح نمایان سنگی در محل سد، بهترین تابع توزیع هر دسته ناپیوستگی تعیین شده است (شکل ۴-۲۳).



دسته ناپیوستگی ۱

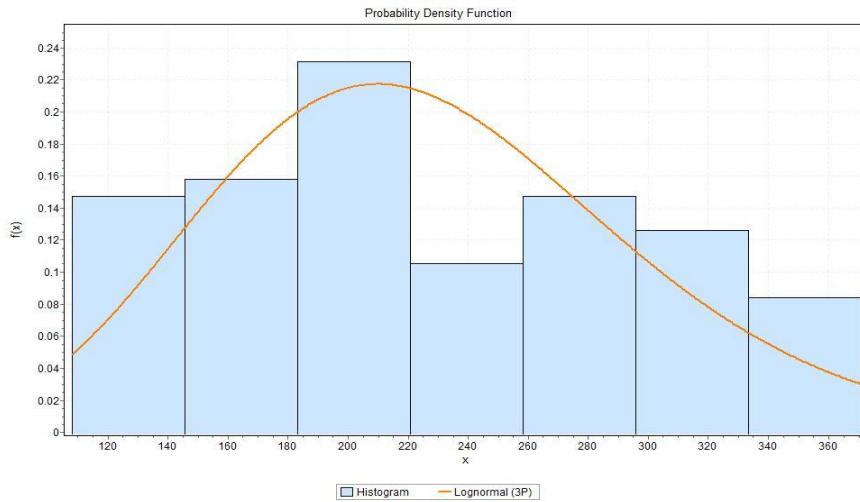
دسته ناپیوستگی ۲



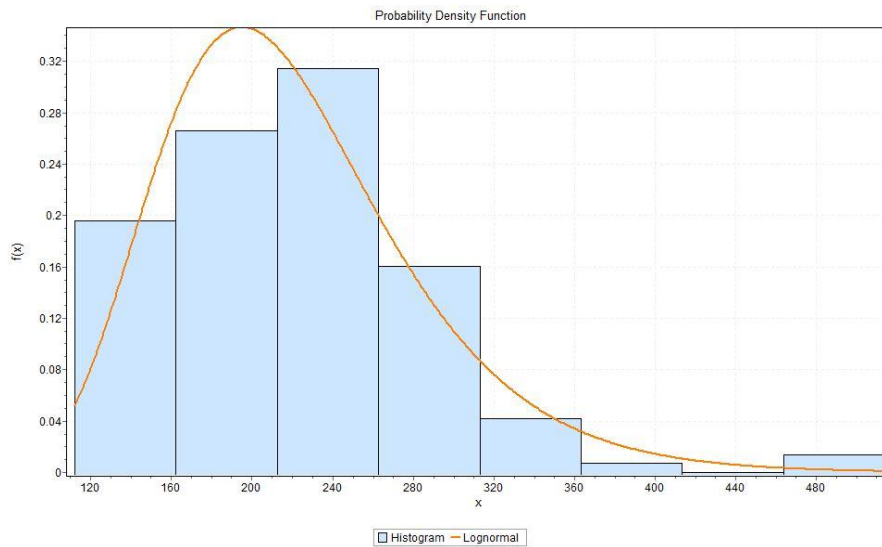
دسته ناپیوستگی ۳

شکل ۴-۲۳: نمودار بهترین تابع توزیع طول اثر دسته ناپیوستگی‌ها (سد آزاد)

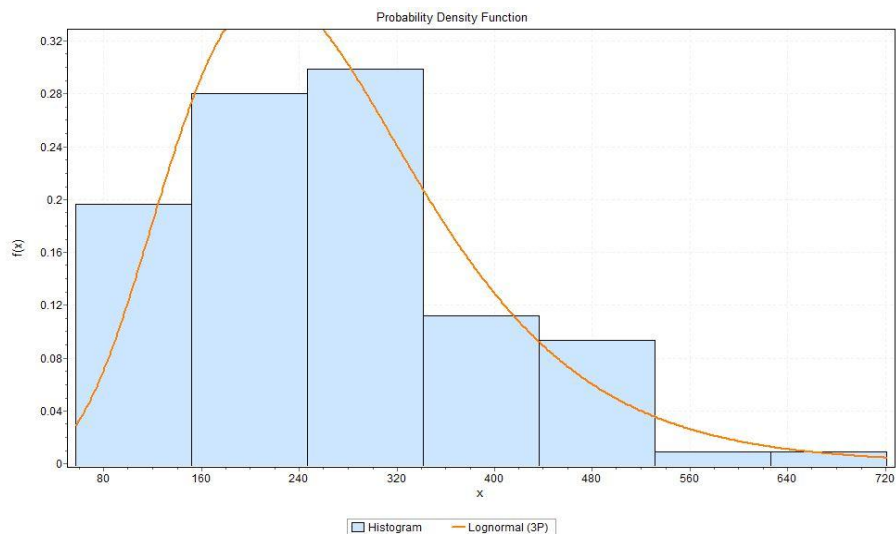
بر اساس شکل ۴-۲۳ بهترین تابع توزیع نشان دهنده طول اثر ناپیوستگی‌ها تابع لاگ نرمال است. شکل‌های ۴-۲۴ تا ۴-۲۶ نشان دهنده نمودارهای بهترین تابع توزیع برازش شده بر داده‌های طول اثر دسته ناپیوستگی سد آزاد است.



شکل ۴-۲۴: تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۱ (سد آزاد)



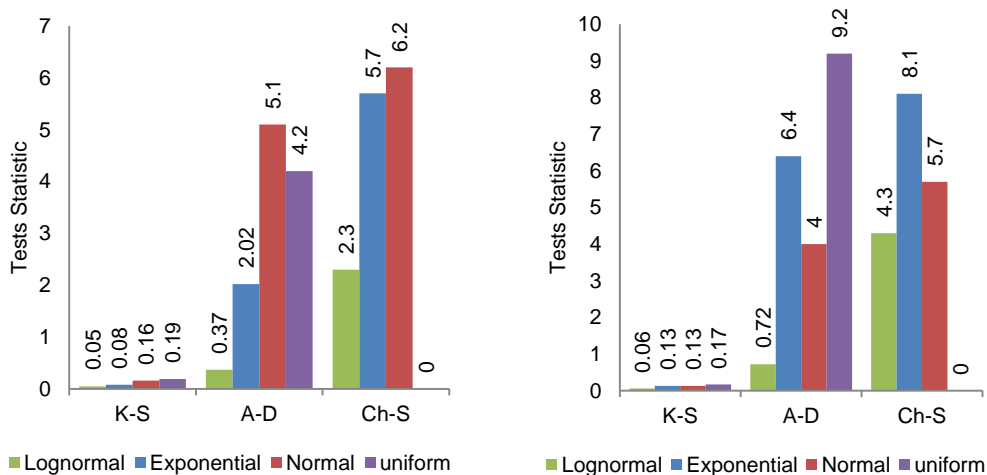
شکل ۴-۲۵: تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۲ (سد آزاد)



شکل ۴-۲۶: تابع توزیع برازش شده بر طول اثر دسته ناپیوستگی ۳ (سد آزاد)

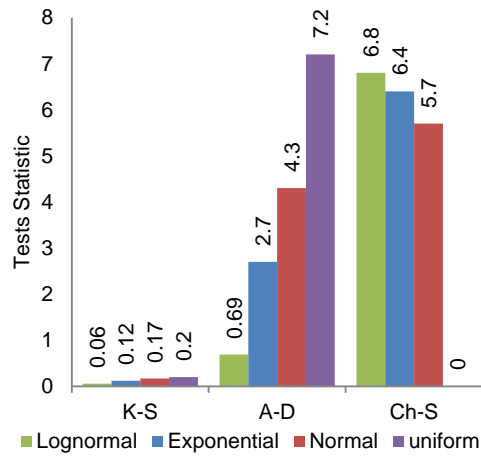
۴-۳-۳-۳- توزیع بازشدگی

با استفاده از نرم افزار easy-fit توابع توزیع بازشدگی ناپیوستگی‌های محدوده سد آزاد محاسبه گردید. بر اساس این توابع توزیع، مناسب‌ترین تابع توزیع برازش شده بر داده‌های توده سنگ سد آزاد، توزیع لاگ نرمال است (شکل ۴-۲۷). با استفاده از میانگین و انحراف معیار محاسبه شده برای بازشدگی می‌توان توزیع بازشدگی در مدل ناپیوستگی‌های مجزا را پیاده‌سازی کرد. توابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی‌های سد آزاد در شکل‌های ۴-۲۸ تا ۴-۳۰ نشان داده شده‌اند.



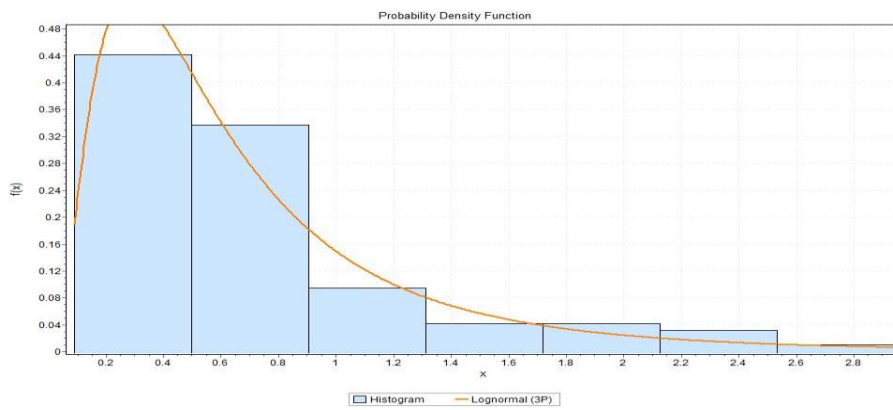
دسته ناپیوستگی ۱

دسته ناپیوستگی ۲

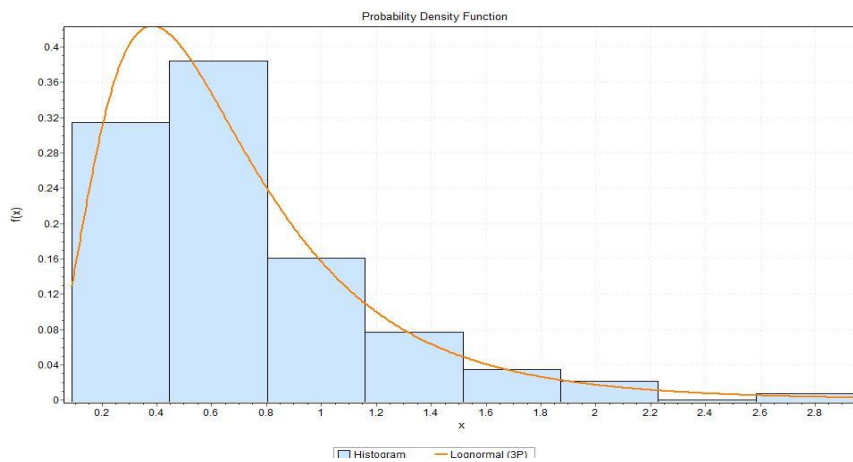


دسته ناپیوستگی ۳

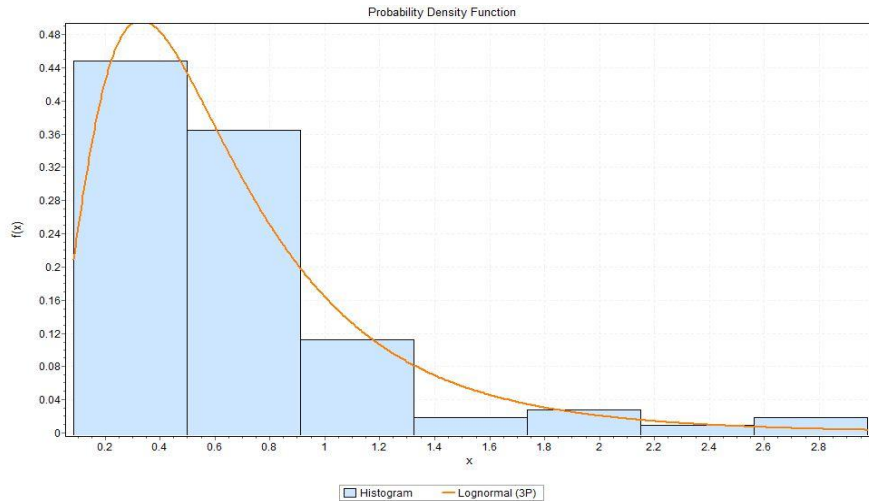
شکل ۴-۲۷: توابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ها (سد آزاد)



شکل ۴-۲۸: تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۱ (سد آزاد)



شکل ۴-۲۹: تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۲ (سد آزاد)



شکل ۴-۳۰: تابع توزیع برازش شده بر بازشدگی دسته ناپیوستگی ۳ (سد آزاد)

۴-۳-۳-۴ - شدت خطی ناپیوستگی (P_{10})

بر اساس خطوط برداشت بر مغزه‌های حفاری، شدت خطی ناپیوستگی‌ها (فرکانس ناپیوستگی‌ها) برای دسته ناپیوستگی‌های مختلف محاسبه گردید (جدول ۴-۷).

جدول ۴-۷: شدت‌های خطی دسته ناپیوستگی‌ها (سد آزاد)

دسته درزه	۱	۲	۳	مجموع
شدت خطی (P_{10})	۰/۳۲	۰/۶۲	۰/۲۶	۱/۲

۴-۴ - جمع‌بندی

در ابتدای این فصل، موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد مخزنی پاریسیان، سد کارون ۴ و سد آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. پس از شرح توابع توزیع آماری مورد استفاده برای ناپیوستگی‌ها در فصل سوم، در این فصل برای هر یک از موارد مطالعاتی بهترین برازش توابع توزیع آماری ناپیوستگی‌ها توسط نرم‌افزارهای Easy fit و Dips محاسبه شده است. مشخصات این توابع توزیع در فصل بعدی برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها استفاده خواهد شد.

مدل سازی هندسی

در فصل قبل، توابع توزیع آماری پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها بر اساس بهترین برازش توابع آماری بر روی داده‌های منطقه انتخاب شد. در این فصل بر اساس این توابع توزیع، ابتدا مدل‌های سه‌بعدی از شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها با استفاده از نرم افزار 3DEC ساخته می‌شود. این مدل‌ها به‌عنوان مدل مبنا برای اعتبارسنجی مدل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس در حجم معرف نمونه‌ها، با در نظر گرفتن گمانه‌های فرضی مختلف و محاسبه‌ی چگالی خطی در هر گمانه، مدل دیگری تنها بر اساس چگالی خطی هر گمانه ساخته می‌شود. بنابراین با محاسبه‌ی شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی شده، می‌توان رابطه‌ای میان چگالی خطی و شدت حجمی بدست آورد. مدل‌سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های منطقه، در پنج مرحله انجام می‌شود. در هر مرحله به ترتیب اطلاعات هندسی ناپیوستگی‌ها تکمیل می‌شود. مرحله اول تنها بر اساس چگالی خطی کلی خط برداشت گمانه، سپس به ترتیب با اضافه کردن چگالی خطی هر دسته درزه، بازشدگی، جهت‌داری و امکان برداشت سطحی صورت می‌گیرد. روند تغییرات شدت خطی و حجمی در پنج مرحله، به‌صورت نموداری برای مقایسه با یکدیگر نشان داده می‌شود.

۵-۲- روش مدل‌سازی

تولید ناپیوستگی‌ها در داخل مدل سه بعدی در نرم افزار 3DEC تا زمانی که تعداد ناپیوستگی‌های متقاطع با چال یا سطح برداشت توسط مدل بازتولید شود، ادامه می‌یابد. کنترل چگالی ناپیوستگی در مدل از طریق مقایسه مستقیم ناپیوستگی‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده صورت می‌گیرد. دسته‌درزه‌ها توسط پنج پارامتر زیر توصیف می‌شوند:

۱- موقعیت مراکز درزه‌ها

۲- تغییرات جهت صفحات درزه

۳- تابع چگالی احتمال شامل یکنواخت، یکنواخت جزئی و فیشر

۴- جهت متوسط دسته‌درزه

۵- چگالی حجمی درزه‌داری

ناپیوستگی‌ها، صفحه‌ای چندضلعی محدب هستند که به‌طور تصادفی در فضای سه‌بعدی جهت یافته‌اند. یک دسته‌درزه با کاربرد متوالی چهار فرآیند تصادفی در فضای مدل‌سازی، تولید می‌شود. در ادامه این چهار مرحله توضیح داده شده است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

الف- شبکه پواسونی همگن صفحه‌ها

ب- تقسیم هر صفحه به ناحیه درزه‌دار و ناحیه سنگ سالم مکمل آن توسط شبکه خطی همگن پواسونی

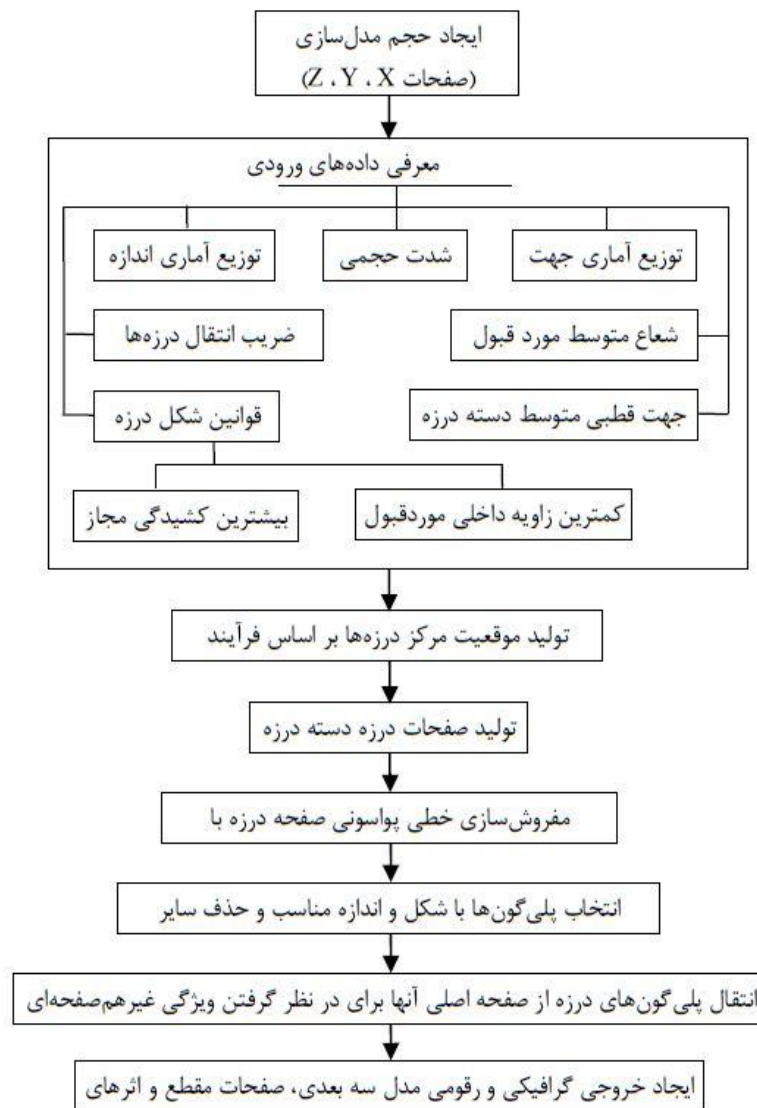
پ- علامت‌گذاری غیر همگن پلی‌گون‌های تشکیل‌شده در مرحله قبل بر اساس اندازه و شکل ناپیوستگی

ت- انتقال تصادفی پلی‌گون‌ها (یا بخشی از پلی‌گون‌ها) که به‌عنوان درزه‌دار در نزدیکی موقعیت اصلی‌شان علامت‌گذاری شده‌اند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

سیستم درزه، متشکل از دسته‌درزه‌ها، با تکرار فرآیندهای ارائه شده، ایجاد می‌شود. دو فرآیند اول لزوماً مدل احتمالاتی پیشنهاد شده توسط ونزیانو (۱۹۷۸) را تشکیل می‌دهند. فرآیند سوم، فرآیند علامت‌گذاری پلی‌گون به نواحی درزه و ناحیه سنگ سالم مکمل آن، غیر همگن است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

با کاربرد فرآیند چهارم می‌توان ویژگی غیر هم صفحه‌ای درزه‌ها را در نظر گرفت.

شکل ۵-۱ شامل یک نمودار درختی است که ارتباط بین هر مرحله با مرحله بعدی و سرشاخه و زیرشاخه هرکدام را نشان می‌دهد. روند تقریباً در اکثر نرم‌افزارهای موجود و قابل‌استفاده به همین صورت پیش خواهد رفت (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۵-۱: روند ساخت مدل (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

هدف از انجام مدل‌سازی در این پژوهش، بررسی میزان اعتبار مدل‌سازی با داشتن اطلاعات محدود برداشت ناپیوستگی است. مدل‌سازی بر روی داده‌های برداشت‌شده از مناطق سد مخزنی پارسیان، کارون ۴ و سد آزاد کردستان انجام شده است. با داشتن شیب، جهت شیب، طول اثر، فاصله‌داری و بازشدگی مدل‌سازی به صورت کامل صورت می‌گیرد. در صورتی که هر کدام از این اطلاعات به دلایل مختلف در دسترس نباشند روند مدل‌سازی دچار مشکل می‌شود. بنابراین برای اعتبار مدل‌سازی در شرایط محدود بودن اطلاعات ناپیوستگی‌ها، روند مدل‌سازی در پنج مرحله انجام شده است. در ابتدا

با داشتن تنها فراوانی کلی ناپیوستگی‌ها، سپس با افزودن فراوانی هر دسته درزه، بازشدگی، شیب و جهت شیب و امکان برداشت سطحی اقدام به مدل سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها شده است. در ادامه هر کدام از این مراحل توضیح داده شده است.

الف- مدل سازی مبتنی بر P_{10} کلی در امتداد خط برداشت

پس از حفر گمانه و خروج مغزه‌های حفاری، ابتدا فرض می‌شود که تنها اطلاعات موجود از این حفاری، تعداد نقاط برخورد ناپیوستگی‌ها با خط برداشت مفروض در راستای مغزه‌های حفاری است. در این حالت می‌توان گفت که شدت یک‌بعدی دسته‌دروزه‌ها به‌صورت کلی بدون تفکیک ناپیوستگی‌ها حاصل می‌شود (شکل ۵-۲). با در اختیار داشتن شدت یا چگالی یک‌بعدی کل ناپیوستگی‌های منطقه، بدون اندازه‌گیری سایر پارامترهای هندسی، مدل سازی انجام می‌شود و سپس شدت ناپیوستگی‌ها در این حالت با مدل مبنا مقایسه می‌شود و میزان اعتبار مدل سازی تعیین می‌گردد. در نرم افزار 3DEC با تعریف یک گمانه از سطح بلوک تا انتهای بلوک و وارد کردن شدت خطی ناپیوستگی‌ها در این راستا، نرم افزار بر اساس شدت خطی در راستای گمانه و حجم بلوک معادل در نظر گرفته شده، ناپیوستگی‌ها را به صورت کاملاً تصادفی، با شیب و جهت شیب مختلف و طول‌های اثر متناظر با اندازه‌ی بلوک و شدت تعریف شده در راستای گمانه، توزیع می‌کند.

	RUN	FROM	TO	%CR	%RGD	SIZE
SITE: RG6						
BH-NO: EP1	32	45.00	45.60	100	88	76
Box: 10	33	45.60	42.30	100	96	76
DEP-FROM: 45.00	34	47.30	48.37	100	95	76
TO: 50.00						
AS: 548	35	48.87	50.00	100	88	76
INC: 30						

شکل ۵-۲: نقاط برخورد ناپیوستگی‌ها با خط برداشت (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲).

ب- مدل سازی مبتنی بر P_{10} هر دسته درزه

در این حالت بدون داشتن اندازه‌ی شیب و جهت شیب و تنها با در نظر گرفتن موقعیت قرارگیری درزه‌ها نسبت به یکدیگر، آن‌ها به دسته‌درزه‌های مختلف تقسیم می‌شوند. سپس بر اساس تعداد ناپیوستگی‌های هر دسته درزه و برخورد آن‌ها با خط برداشت، میزان P_{10} هر دسته درزه محاسبه می‌شود. سپس، بر اساس چگالی هر دسته درزه اقدام به مدل سازی شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها می‌شود و اعتبار سنجی انجام می‌گیرد. در این مرحله با داشتن شدت‌های خطی هر دسته درزه، همانند مرحله‌ی اول کدنویسی انجام می‌گیرد، با این تفاوت که در راستای گمانه برای هر دسته درزه شدت‌های مختلفی برای نرم افزار تعریف می‌شود.

پ- مدل سازی مبتنی بر P_{10} و اندازه گیری بازشدگی بر روی مغزه‌ها

بر روی مغزه‌ی حفاری علاوه بر فراوانی می‌توان میزان بازشدگی ناپیوستگی‌ها را نیز محاسبه کرد. در این پژوهش از مقادیر بازشدگی برای محاسبه طول اثر ناپیوستگی (با استفاده از رابطه‌ی باغبانان (فصل دوم)) استفاده شده است. پس از محاسبه‌ی طول اثر ناپیوستگی از بازشدگی، با در دست داشتن شدت خطی ناپیوستگی‌ها و طول اثر مدل سازی انجام می‌گیرد. توابع توزیع مناسب برای طول اثر ناپیوستگی‌ها محاسبه می‌گردد و از آن‌ها در مدل سازی استفاده می‌شود.

ت- مدل سازی مبتنی بر P_{10} ، بازشدگی و جهت داری ناپیوستگی‌ها

در صورتی که حفاری به صورت ژئوتکنیکی انجام شده باشد، می‌توان بر اساس میزان چرخش راد حفاری و جهت چرخش سر مته میزان شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را برآورد کرد. در این مرحله علاوه بر قابلیت اندازه گیری فراوانی و بازشدگی ناپیوستگی‌ها می‌توان شیب و جهت شیب آن‌ها را نیز برآورد کرد.

ج- مدل سازی مبتنی بر اطلاعات مغزه حفاری و امکان برداشت سطحی

در مرحله ی نهایی مدل سازی ناپیوستگی ها، امکان برداشت سطحی بر روی رخنمون قابل دسترس در نظر گرفته می شود. در این مرحله از مدل سازی، تمامی اطلاعات مورد نیاز برای مدل سازی ناپیوستگی ها در دسترس است. علاوه بر برداشت در راستای مغزه ی حفاری که حاوی شیب و جهت شیب، فراوانی و بازشدگی و سپس تخمین طول اثر است، ناپیوستگی ها در این مرحله با سطح زمین برخورد داشته و امکان برداشت سطحی نیز فراهم است، بنابراین خط برداشتی بر روی سطح زمین در نظر گرفته می شود و پارامترهای هندسی ناپیوستگی ها در راستای خط برداشت اندازه گیری می شود.

۵-۲- تولید شبکه ناپیوستگی ها

شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی درزه ها و با کاربرد روش شبیه سازی مونت کارلو ایجاد می شود. در این روش برای هر دسته درزه، تعدادی درزه ی مجزا با استفاده از توابع توزیع مربوط به پارامترهای هندسی (شیب، جهت شیب، طول اثر، بازشدگی و شدت) ساخته می شود.

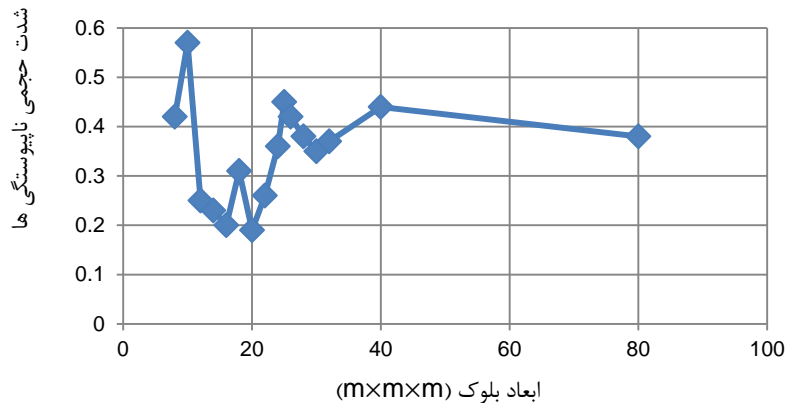
۵-۲-۱- اندازه حجم معرف^۱

ابعاد بلوک به اندازه ی کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا بتوان تاثیر طول ناپیوستگی بر نتایج را از بین برد. به همین منظور با توجه به توزیع طول ناپیوستگی ها در موارد مطالعاتی موجود اندازه مدل $25 \times 25 \times 25$ در نظر گرفته شده است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، در ابعاد $10 \times 10 \times 10$ بیشترین مقدار شدت حجمی ناپیوستگی ها حاصل شده است اما به دلیل عدم پوشش تمامی ناپیوستگی های موجود در منطقه، از ابعاد $25 \times 25 \times 25$ که در رتبه دوم قرار دارد و به اندازه ی کافی جهت پوشش ناپیوستگی ها و از بین بردن تاثیر طول اثر ناپیوستگی بزرگ است، استفاده می شود

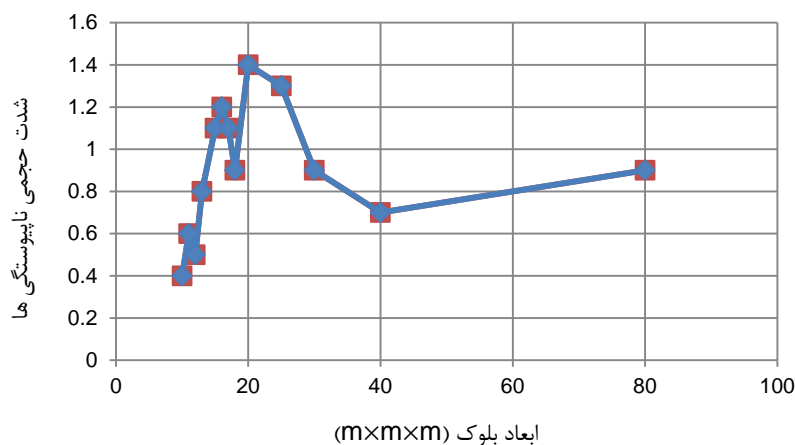
^۱ Representative Elementary Volume

(شکل ۴-۵). در شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ به ترتیب برای سدهای کارون ۴ و سد آزاد حجم معرف اولیه

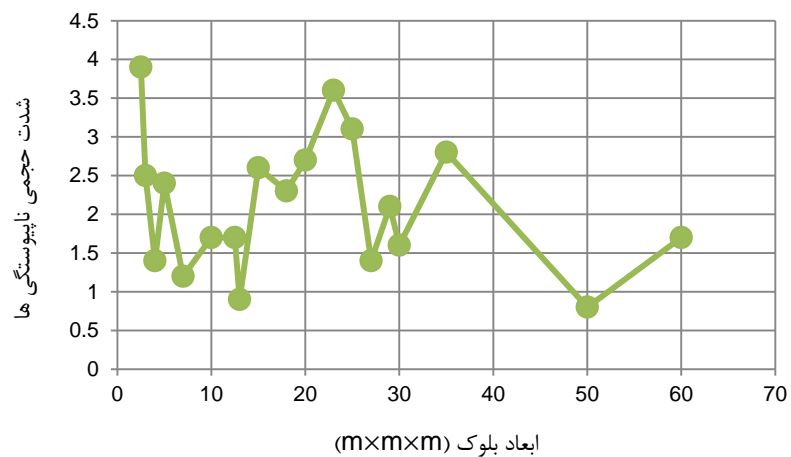
محاسبه شده است که برای هر کدام به ترتیب ابعاد ۲۰ و ۲۳ محاسبه شده است



شکل ۴-۵: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد پارسیان)



شکل ۵-۵: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد کارون ۴)



شکل ۶-۵: تحلیل حساسیت شدت حجمی ناپیوستگی‌ها بر اساس تغییر اندازه بلوک (سد آزاد)

۵-۲-۲- مدل سازی ناپیوستگی ها

همانطور که قبلا گفته شد، ابعاد مدل برای ساخت شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها معادل $25 \times 25 \times 25$ متر مکعب در نظر گرفته شده است. سپس بر اساس توابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها که از نرم افزار easy-fit محاسبه می‌شود، مدل سازی در نرم افزار 3DEC انجام می‌گیرد. در نرم افزار 3DEC برای اعمال توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها نیاز به میانگین و انحراف معیار هر پارامتر است. برخی از اطلاعات ناپیوستگی‌ها برای هر مورد مطالعاتی در جدول ۵-۱ اشاره شده است. قبل از بررسی ساخت شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها در پنج سطح، با داشتن کلیه‌ی اطلاعات منطقه اقدام به مدل سازی اولیه می‌شود. این مدل‌ها به عنوان مبنایی برای اعتبار سنجی مدل‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. مدل‌های شبکه ناپیوستگی‌ها، مربوط به سد مخزنی پارسیان، کارون ۴ و سد آزاد به ترتیب در شکل‌های ۵-۷ تا ۵-۹ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱: مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها برای هر سه مورد مطالعاتی

	P_{10}	ثابت توزیع فیشر (K)	جهت‌داری دسته‌درزه‌ها		دسته‌درزه‌ها
			جهت شیب	شیب	
سد پارسیان	۰/۴۶	۳۱/۵	۱۲۲	۸۱	۱
	۰/۲۵	۵۰/۵	۷۱	۱۱	۲
	۱/۰۴	۹۶	۲۲۳	۸۰	۳
	۰/۳۹	۳۴/۵	۳۱۵	۸۱	۴
سد کارون ۴	۰/۷۸	۳۲/۴	۱۹۱/۴	۵۰/۱	۱
	۰/۵۳	۲۷	۱۵۰/۶	۶۵	۲
	۰/۳۹	۴۵	۲۸/۹	۳۷/۵	۳
سد آزاد	۰/۳۲	۲۴/۵	۱۴۵	۶۰	۱
	۰/۶۲	۴۷/۴	۱۸۶/۷	۴۸/۲۷	۲
	۰/۲۶	۴۵/۸	۲۷/۱	۳۴/۴	۳

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

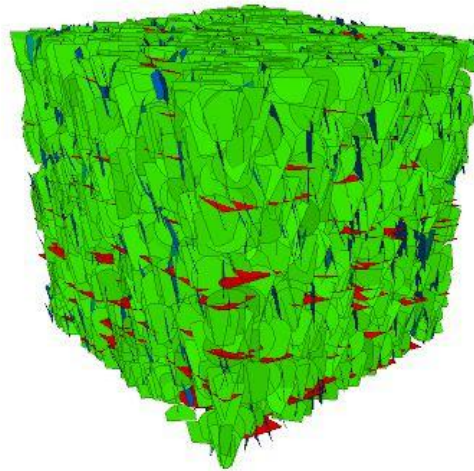
تاریخ: 08/25/2017 01:40:34

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (7660)

- dfn1
- dfn2
- dfn3
- dfn4



شکل ۵-۷: شبکه‌ی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پارسیان

مدل ساخته شده برای سد مخزنی پارسیان شامل ۴ دسته درزه است. این دسته درزه‌ها به صورت ۴ شبکه‌ی شکستگی مجزا با رنگ‌های مختلف در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. ناپیوستگی‌های درون مدل به صورت دیسکی، متناظر با طول اثر ناپیوستگی‌ها و سه جهت‌داری مربوط به دسته درزه‌ها است. پیاده‌سازی توزیع طول اثر ناپیوستگی‌ها در نرم افزار بر اساس میانگین و انحراف معیار ناپیوستگی‌های برداشت شده از منطقه صورت می‌گیرد.

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 07/06/2017 05:48:41

Geometry Test

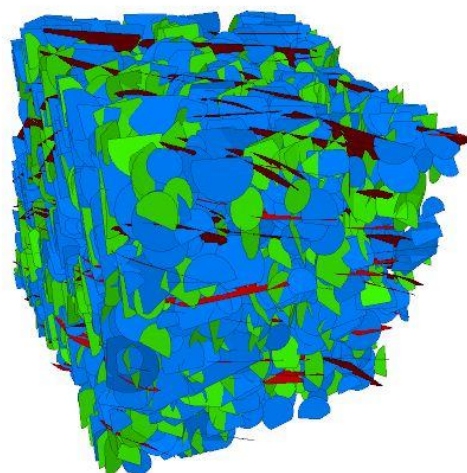
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

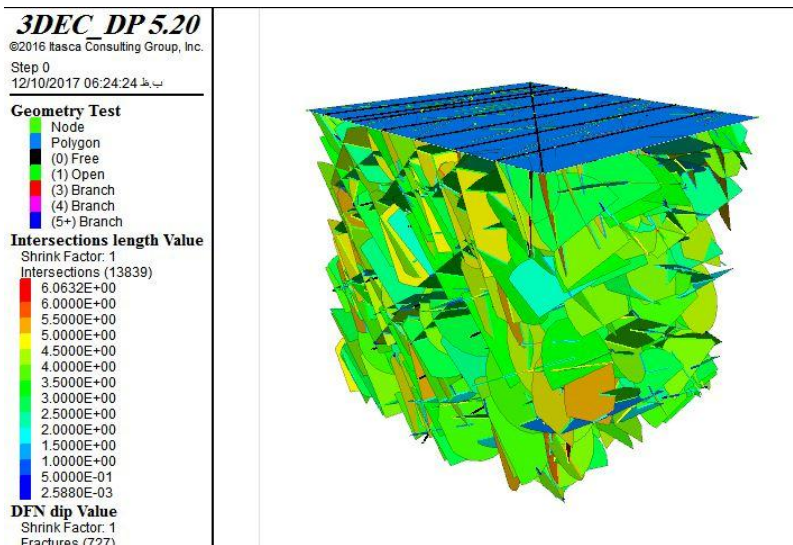
Shrink Factor: 1

Fractures (2865)

- dfn1
- dfn2
- dfn3

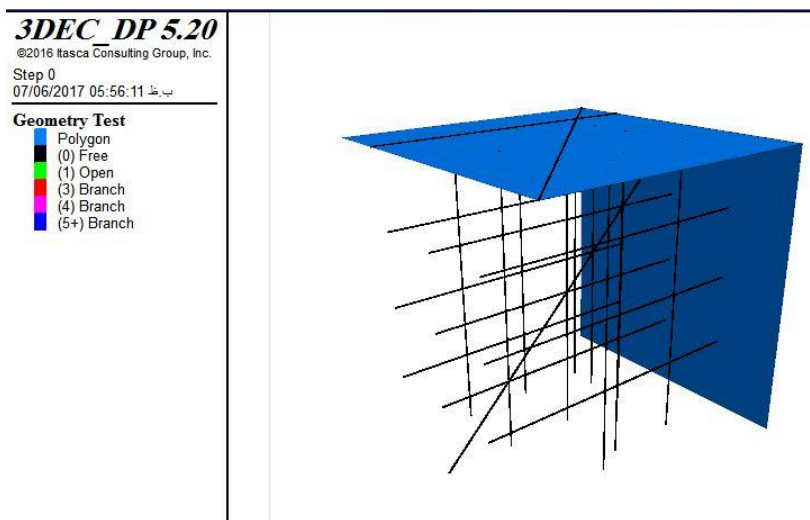


شکل ۵-۸: شبکه ناپیوستگی‌های سد مخزنی کارون



شکل ۵-۹: شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد

سپس در مدل‌های سد پارسیان، سد کارون ۴ و سد تلمبه- ذخیره‌ای آزاد، یک مقطع افقی و یک مقطع قائم برای نشان دادن رخنمون در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی‌های بعدی درون مدل‌های بلوکی این مناطق چال‌های منظم به صورت عمودی و افقی حفر می‌شود. (شکل ۵-۱۰). در هر کدام از این گمانه‌ها اطلاعات فراوانی ناپیوستگی‌ها در راستای چال حاصل می‌گردد (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۰: چال‌ها و رخنمون‌های عمودی و افقی

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

ب.ظ 07/06/2017 06:00:57

Geometry Test

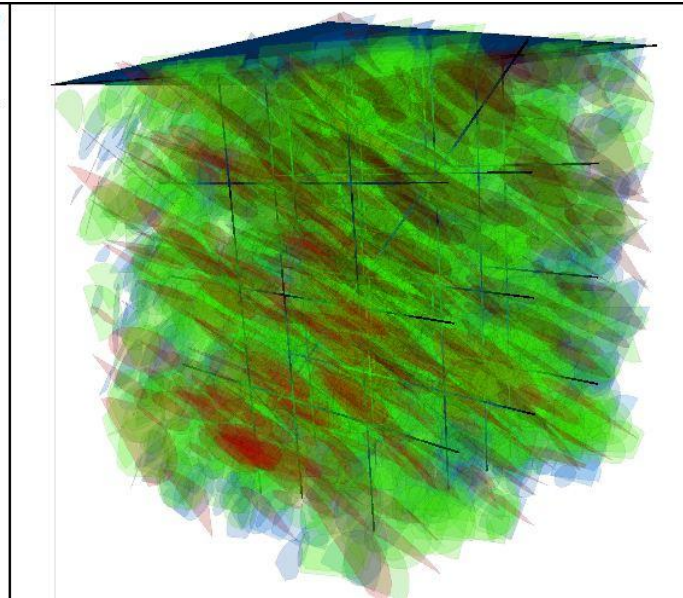
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

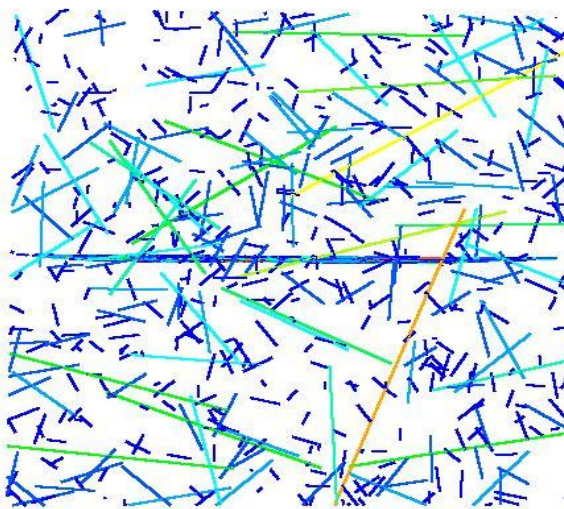
Fractures (2865)

- dfn1
- dfn2
- dfn3



شکل ۵-۱۱: ترکیب ناپیوستگی‌ها و گمانه‌ها

برای هر یک از موارد مطالعاتی، نقاط ابتدا و انتهای گمانه‌ها (راستای چال) و چگالی خطی هر کدام درون مدل محاسبه شده و به صورت جدول ۵-۲ نشان داده شده است. بر اساس شدت خطی برداشت شده از راستای گمانه‌ها مدل جدیدی شبیه سازی شده است. در هر کدام از مدل‌های شبیه‌سازی شده شدت حجمی محاسبه شده است، سپس میان چگالی خطی و حجمی رابطه‌ای استخراج شده است. میزان شدت سه‌بعدی کل محدوده برای هر یک از موارد مطالعاتی سد کارون ۴، سد پارسیان و سد آزاد به ترتیب برابر با ۳/۶، ۴/۱ و ۳/۰۲ است. این میزان شدت، نشان‌دهنده‌ی میزان نسبت مساحت سطح ناپیوستگی‌ها بر حجم ۲۵×۲۵×۲۵ مترمکعبی برای سد پارسیان، ۲۰×۲۰×۲۰ برای سد کارون ۴ و ۲۳×۲۳×۲۳ برای سد آزاد در نظر گرفته شده است. برای اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی شده در حالت دوم با مدل اولیه‌ی ساخته شده، بهترین راه مقایسه‌ی شدت‌های سه‌بعدی در دو مدل است. برخورد ناپیوستگی‌ها با مقطع افقی (شکل ۵-۱۲)، بیان‌کننده‌ی طول‌های اثر ناپیوستگی‌ها در برداشت سطحی است. در صورتی که امکان برداشت سطحی در مدل‌سازی وجود داشته باشد، با اندازه‌گیری فراوانی و طول‌های اثر ناپیوستگی‌ها از سطح رخنمون می‌توان به مقایسه و اعتبارسنجی مدل عددی پرداخت.



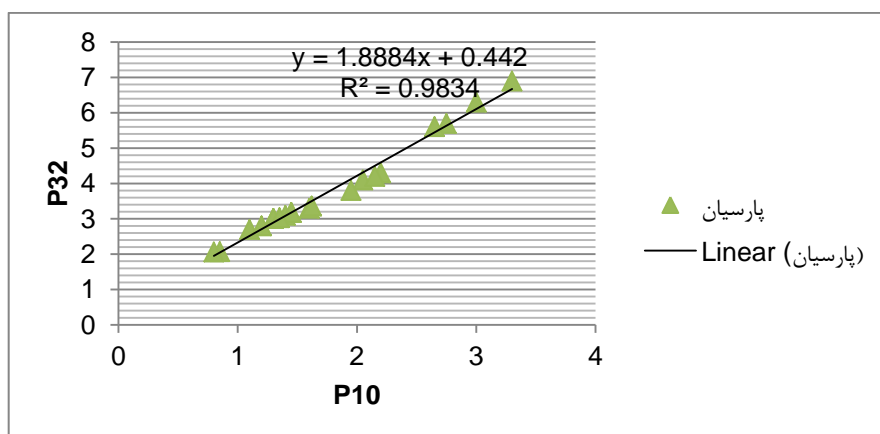
شکل ۵-۱۲: برخورد ناپیوستگی‌ها با مقطع افقی در محدوده احداث سد کارون ۴

۵-۲-۳- رابطه‌ی تجربی میان P_{10} و P_{32}

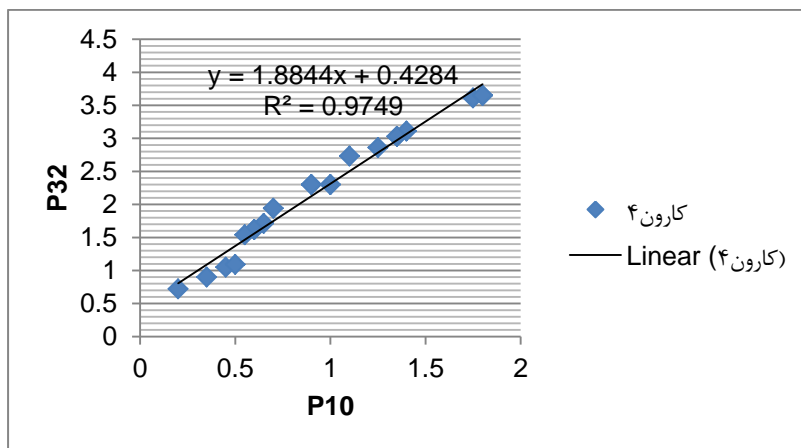
با توجه به مقادیر P_{10} حاصل شده از خط برداشت‌های درون گمانه، مدل‌سازی با اعمال چگالی خطی ناپیوستگی‌ها در راستای گمانه‌ها انجام می‌شود. بر اساس چگالی خطی در راستای گمانه‌ها در نرم افزار 3DEC شدت حجمی را می‌توان به عنوان خروجی به دست آورد. سپس با محاسبه‌ی ضریب همبستگی بین این پارامتر و بررسی مقادیر شدت‌های یک و سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار SPSS، رابطه‌ی میان شدت‌های یک و سه‌بعدی محاسبه می‌شود (شکل‌های ۵-۱۳، ۵-۱۴ و ۵-۱۵).

جدول ۵-۲: محاسبه شدت یک و سه بعدی در مدل جهت استخراج رابطه‌ی تجربی

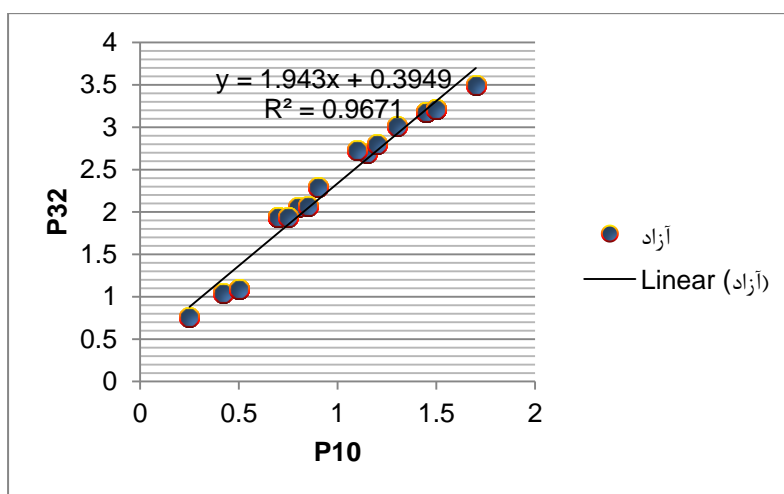
	راستای گمانه		P ₁₀			P ₃₂		
	شروع گمانه	پایان گمانه	کارون ۴	سد آزاد	پارسیان	کارون ۴	سد آزاد	پارسیان
۱	(۰,۰,۱۰)	(۰,۰,-۱۰)	۱/۳۵	۱/۷	۱/۳	۳/۰۳	۳/۵	۳/۰۱
۲	(۵,۳,۱۰)	(۵,۳,-۱۰)	۱/۱	۱/۱۵	۱/۱	۲/۷۳	۲/۷	۲/۷
۳	(-۲,-۶,۱۰)	(-۲,-۶,-۱۰)	۱/۷۵	۱/۴۵	۱/۳	۳/۶۱	۳/۱۸	۳/۰۱
۴	(-۱۰,۶,۱۰)	(۱۰,۶,-۱۰)	۰/۲	۰/۲۵	۰/۸۵	۰/۷۲	۰/۷۶	۲/۰۷
۵	(-۱۰,-۱۰,۱۰)	(۱۰,۱۰,۱۰)	۰/۶	۰/۴۲	۱/۴	۱/۶۲	۱/۰۵	۳/۱
۶	(-۵,۵,۱۰)	(-۵,۵,-۱۰)	۱/۸	۱/۵	۱/۴۵	۳/۶۵	۳/۲۲	۳/۱۸
۷	(۰,۵,۱۰)	(۰,۵,-۱۰)	۱/۲۵	۱/۴۵	۱/۳	۲/۸۶	۳/۱۸	۳/۰۱
۸	(۵,۵,۱۰)	(۵,۵,-۱۰)	۱/۴	۱/۳	۰/۸	۳/۱۱	۳/۰۱	۲/۰۶
۹	(-۵,۰,۱۰)	(-۵,۰,-۱۰)	۰/۹	۱/۱	۱/۶	۲/۳	۲/۷۳	۳/۳
۱۰	(-۵,۵,۱۰)	(-۵,۵,-۱۰)	۱/۸	۱/۵	۱/۴۵	۳/۶۵	۳/۲۲	۳/۱۸
۱۱	(۰,-۵,۱۰)	(۰,-۵,-۱۰)	۱/۳۵	۱/۵	۱/۳۵	۳/۰۳	۲/۸	۳/۰۳
۱۲	(۵,-۵,۱۰)	(۵,-۵,-۱۰)	۰/۹	۱/۲	۱/۲	۲/۳	۱/۹۴	۲/۸
۱۳	(۱۰,۵,۵)	(-۱۰,۵,۵)	۰/۴۵	۰/۷	۲/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۹	۴/۱
۱۴	(۱۰,۰,۵)	(-۱۰,۰,۵)	۰/۶۵	۰/۵	۱/۶۲	۱/۷۱	۲/۰۶	۳/۳۶
۱۵	(۱۰,-۵,۵)	(-۱۰,-۵,۵)	۰/۷	۰/۸	۲/۷۵	۱/۹۴	۲/۳	۵/۷
۱۶	(۱۰,۵,۰)	(-۱۰,۵,۰)	۰/۶	۰/۹	۱/۹۵	۱/۶۲	۲/۰۷	۳/۸
۱۷	(۱۰,۰,۰)	(-۱۰,۰,۰)	۰/۳۵	۰/۸۵	۳/۳	۰/۹	۱/۹۴	۶/۹
۱۸	(۱۰,-۵,۰)	(-۱۰,-۵,۰)	۱	۰/۷	۲/۶۵	۲/۳	۱/۹۴	۵/۶۱
۱۹	(۱۰,۵,-۵)	(-۱۰,۵,-۵)	۰/۵۵	۰/۷	۲/۲	۱/۵۴	۱/۰۹	۴/۳
۲۰	(۱۰,۰,-۵)	(-۱۰,۰,-۵)	۱	۰/۵	۳	۲/۳	۱/۹۴۲	۶/۳
۲۱	(۱۰,-۵,-۵)	(-۱۰,-۵,-۵)	۰/۵	۰/۷۵	۲/۱۵	۱/۰۹	۲/۳	۴/۲



شکل ۵-۱۳: ارتباط میان شدت یک و سه بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد پارسیان



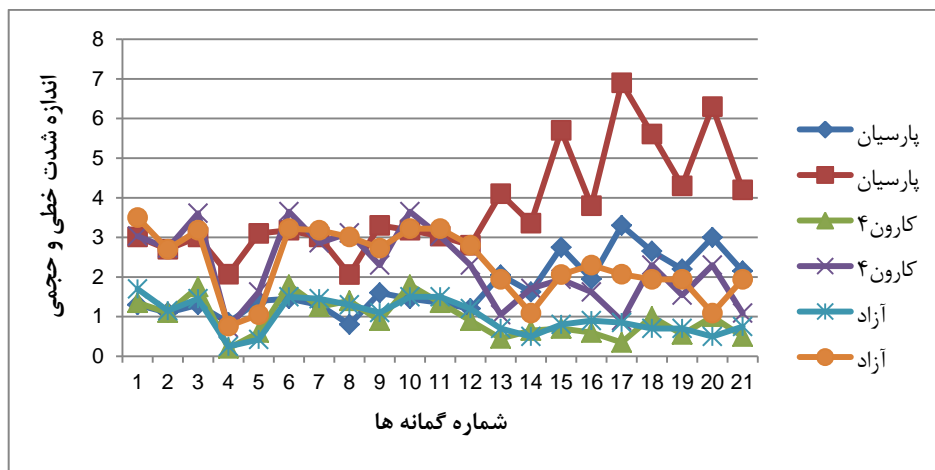
شکل ۵-۱۴: ارتباط میان شدت یک و سه بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد کارون ۴



شکل ۵-۱۵: ارتباط میان شدت یک و سه بعدی با استفاده از اطلاعات گمانه در سد آزاد

رابطه‌ی میان شدت خطی و حجمی ناپیوستگی‌ها با استفاده از این روش به صورت خطی محاسبه شده است. بر این اساس هرچه شدت خطی در راستای گمانه بیشتر شود، شدت حجمی بر اساس توزیع انجام شده توسط نرم افزار بیشتر خواهد شد.

سد پارسیان دارای ۴ دسته درزه است. بنابراین تغییرات شدت اندازه‌گیری شده در آن بیشتر از سایر مناطق مورد مطالعه است (شکل ۵-۱۶).



شکل ۵-۱۶: تغییرات شدت خطی و حجمی گمانه‌ها بر اساس شماره گمانه

۵-۲-۴- مراحل مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها

در بخش ۵-۱ به‌طور مفصل به پنج مرحله مدل‌سازی پرداخته شد. در این بخش بر اساس ۵ مرحله‌ی موردنظر مدل‌ها ساخته می‌شود و میزان شدت حجمی ناپیوستگی‌ها با شدت حجمی حالت مبنا (مدل اولیه ساخته شده با داشتن تمامی اطلاعات ناپیوستگی‌ها) مقایسه می‌شود و میزان اعتبار هر مرحله به‌صورت جداگانه موردبررسی قرار می‌گیرد. در ادامه تمامی مراحل مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها آورده شده است.

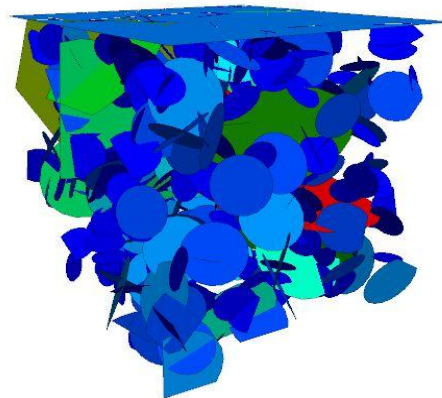
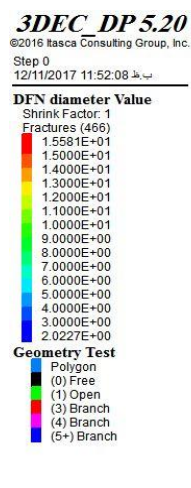
۵-۲-۴-۱- مدل‌سازی مبتنی بر P_{10} کلی خط برداشت

در این مرحله با در اختیار داشتن مغزه‌های حفاری، خط برداشتی بر روی طول مغزه‌های حفاری در نظر گرفته می‌شود و فراوانی ناپیوستگی‌ها تعیین می‌گردد. مدل بلوکی $25 \times 25 \times 25$ که قبلاً ذکر شد را تولید و با حفر گمانه در راستای عمودی بلوک، هندسه اولیه مورد نیاز برای مدل ساخته می‌شود. سپس در راستای گمانه حفر شده شدت خطی محاسبه شده از مغزه‌های حفاری قرار داده می‌شود. نرم افزار بر اساس ابعاد بلوک و شدت خطی تعریف شده در راستای گمانه، طول‌های اثر مشخصی برای ناپیوستگی‌ها در نظر می‌گیرد. شیب و جهت شیب این ناپیوستگی‌ها مقادیری تصادفی هستند، بنابراین در این مرحله جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از قانون خاصی پیروی نمی‌کند و هر مقداری می‌تواند

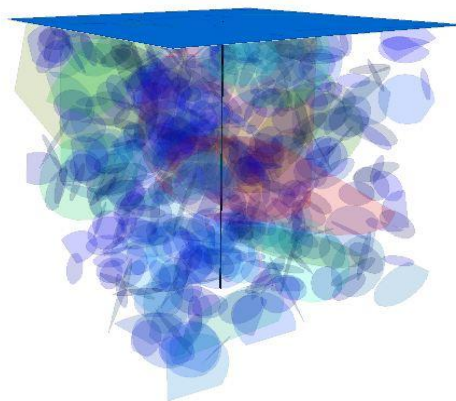
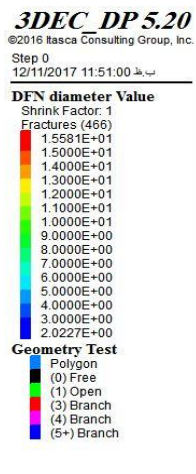
داشته باشد. پس از اعمال چگالی، توسط فیش نویسی دستوری برای حذف اندازه‌های بسیار کوچک ناپیوستگی‌ها نوشته می‌شود. حذف اندازه‌های کوچک ناپیوستگی می‌تواند دقت مدل‌سازی و اندازه‌ی شدت سه بعدی حاصل را بالا ببرد. هر کدام از موارد مطالعاتی در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

الف: سد مخزنی پاریسیان

با اعمال شدت خطی برای سد مخزنی پاریسیان در راستای گمانه، شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها به صورت شکل ۵-۱۷ و ۵-۱۸ به دست می‌آید. جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به صورت نامنظم در مدل توزیع شده‌اند اما اندازه‌ی طول اثر بر اساس اندازه‌ی بلوک و چگالی خطی تعریف شده در راستای گمانه ساخته شده‌اند.



شکل ۵-۱۷: شبکه‌ی ناپیوستگی‌های سد مخزنی پاریسیان در مرحله اول



شکل ۵-۱۸: توزیع ناپیوستگی‌ها در راستای گمانه بر اساس چگالی خطی گمانه

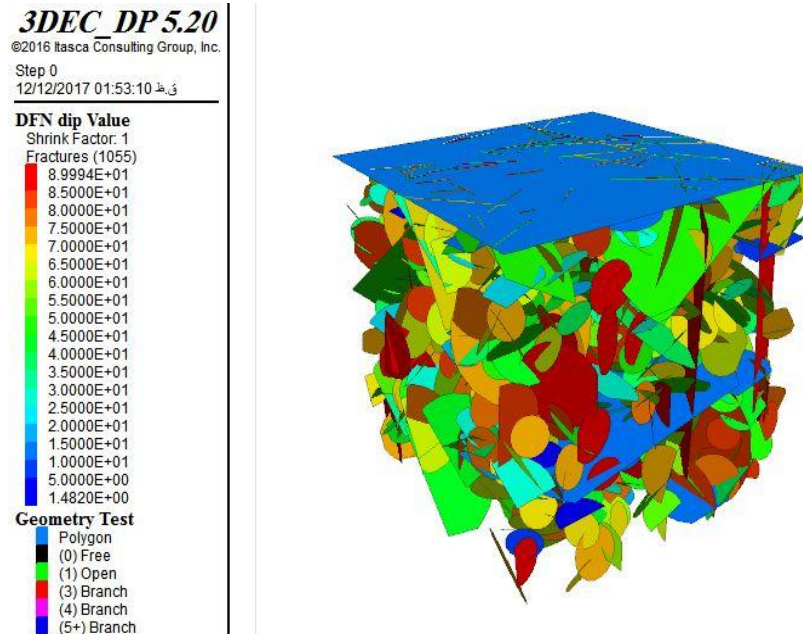
پس از ساخت مدل، شدت‌های P_{10} و P_{32} شبیه‌سازی شده برآورد می‌شوند و در جدول ۳-۵ نشان داده می‌شود.

جدول ۳-۵: شدت‌های شبیه‌سازی شده در مدل ناپیوستگی‌های سد پارسیان

P_{32}	P_{10}	پارامتر
۲/۱	۱/۹	مقدار

ب- سد کارون ۴

مدل شبکه ناپیوستگی‌های سد کارون ۴ در این مرحله‌ی به‌صورت شکل (۵-۱۹) ارائه شده است.



شکل ۵-۱۹: شبکه ناپیوستگی‌های سد کارون ۴

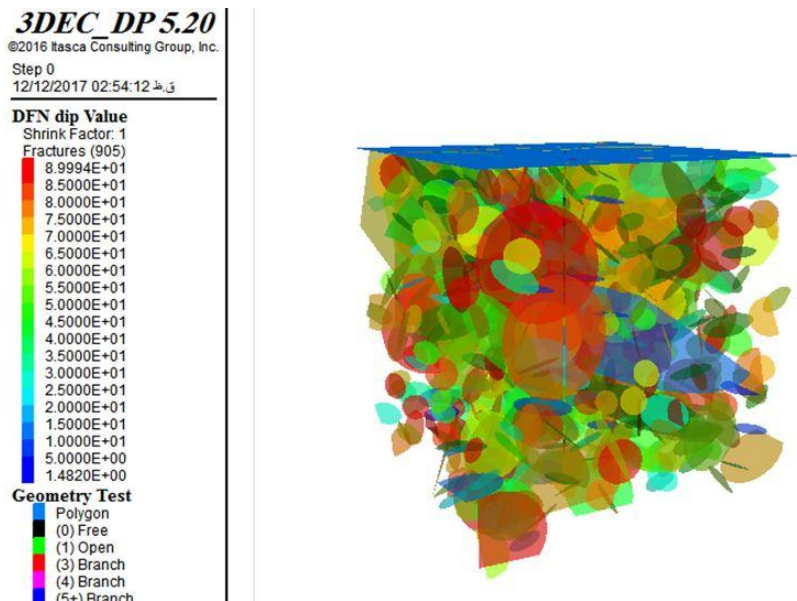
چگالی خطی و شدت حجمی مدل شبیه‌سازی شده سد کارون ۴ در جدول (۵-۴) نشان داده شده است.

جدول ۴-۵: شدت‌های شبیه‌سازی شده در مدل ناپیوستگی‌های سد کارون ۴

P_{32}	P_{10}	پارامتر
۱/۸۲	۱/۷۱	مقدار

ج: سد آزاد

پس از مدل سازی با چگالی خطی مغزه های برداشت شده از محل سد آزاد، شبکه ی ناپیوستگی ها به صورت شکل ۵-۲۰ ارزیاب شده است. همانگونه که قبلا ذکر شد، اندازه ی ناپیوستگی ها بر اساس ابعاد بلوک و شدت خطی تعریف شده توسط نرم افزار انتخاب می شود، بنابراین هرچه اندازه ی شدت خطی افزایش یابد باعث افزایش شدت حجمی خواهد شد.



شکل ۵-۲۰: شبکه ناپیوستگی های مرحله اول سد آزاد

شدت های شبیه سازی شده در سد آزاد نیز همانند سایر مناطق مورد بررسی، محاسبه و به صورت جدول ۵-۵ نمایش داده شده است.

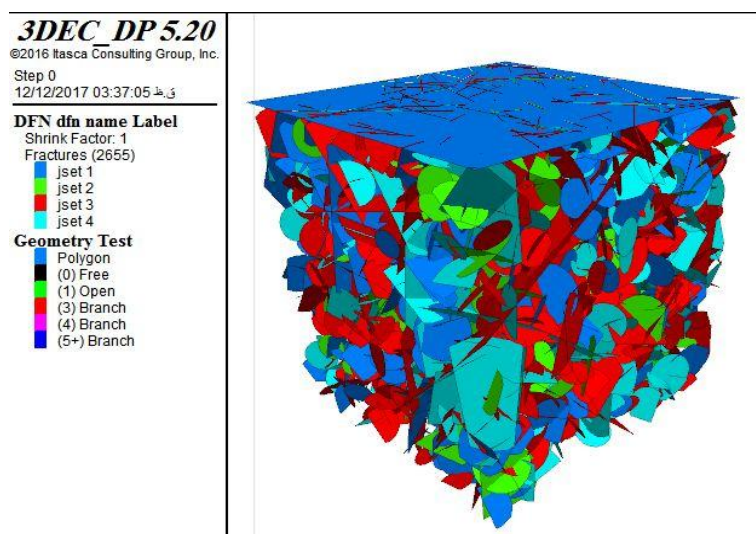
جدول ۵-۵: شدت خطی و حجمی ثانویه سد آزاد در مرحله اول

P ₃₂	P ₁₀	مرحله اول سد آزاد
۱/۶۵	۰/۹۵	

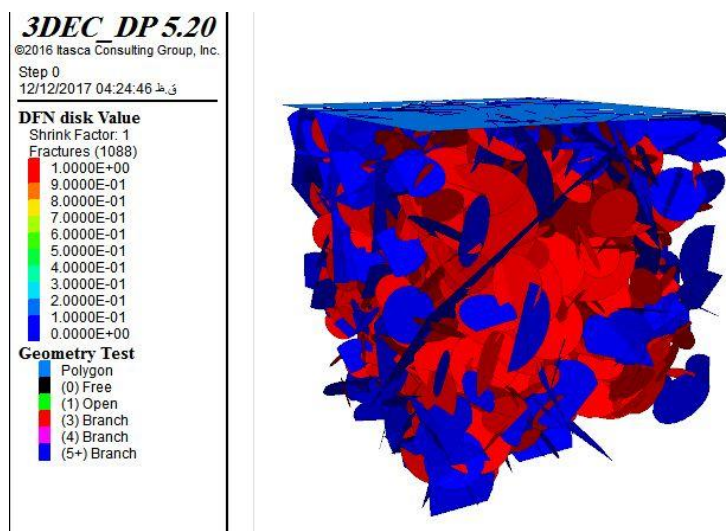
۵-۲-۲-۲-مدل سازی مبتنی بر P₁₀ هر دسته درزه در طول خط برداشت

در این مرحله با در اختیار داشتن مغزه ی حفاری و برداشت خطی در طول مغزه حفاری، به صورت چشمی و با توجه به موقعیت قرارگیری درزه ها می توان درزه ها را تفکیک و در دسته های مختلف

تقسیم کرد. پس از اینکه درزه‌ها درون دسته‌های مختلف قرار گرفتند، چگالی خطی هر دسته به صورت جداگانه محاسبه شده و مدل‌سازی بر اساس دسته درزه‌ها و فراوانی خطی هر کدام از آنها انجام می‌شود. همانند روند مدل‌سازی توصیف شده در مرحله اول، مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) مناطق مورد مطالعه تهیه (شکل‌های ۵-۲۱ تا ۵-۲۳) و شدت‌های خطی و حجمی محاسبه شده در مدل شبیه‌سازی شده به صورت جدول ۵-۶ بدست می‌آیند.



شکل ۵-۲۱: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد پارسیان در مرحله دوم



شکل ۵-۲۲: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد کارون ۴ در مرحله دوم

3DEC_DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

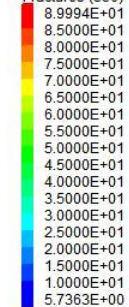
Step 0

12/12/2017 04:29:48

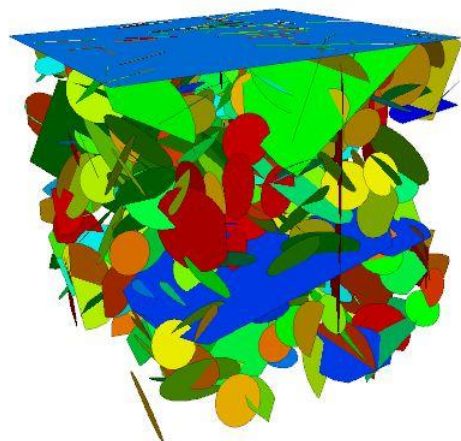
DFN dip Value

Shrink Factor: 1

Fractures (556)



Geometry Test



شکل ۵-۲۳: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد آزاد در مرحله دوم

جدول ۵-۶: شدت‌های خطی و حجمی مدل شبیه‌سازی شده

سد آزاد	سد کارون ۴	سد پارسیان	مورد مطالعاتی
۱/۰۱	۱/۷۵	۲/۰۲	P ₁₀
۱/۹۶	۲/۳	۲/۷	P ₃₂

۵-۲-۴-۳- مدل‌سازی مبتنی بر P₁₀ و اندازه‌گیری بازشدگی بر روی مغزه‌های حفاری

در طول یک مغزه‌ی حفاری علاوه بر اندازه‌گیری فراوانی ناپیوستگی‌ها، می‌توان بازشدگی درزه‌ها را نیز اندازه‌گیری کرد. با در اختیار داشتن بازشدگی درزه‌ها می‌توان با استفاده از روابط موجود میان بازشدگی و طول اثر، اندازه طول اثر را تخمین زد. در این پژوهش از رابطه‌ی باغبانان برای محاسبه‌ی طول اثر استفاده شده است (معادله‌ی ۲-۵۰). پس از محاسبه‌ی طول اثر ناپیوستگی از بازشدگی، تابع طول اثر از نرم‌افزار easy_fit محاسبه و در مدل‌سازی اعمال می‌شود.

مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌ها برای هر یک از مناطق مورد مطالعه انجام شده است (شکل‌های ۵-۲۴ تا ۵-۲۷) و شدت‌های خطی و حجمی در هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی شده به صورت جدول ۵-۷ محاسبه شده است.

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 12/12/2017 05:04:52

DFN dfn name Label

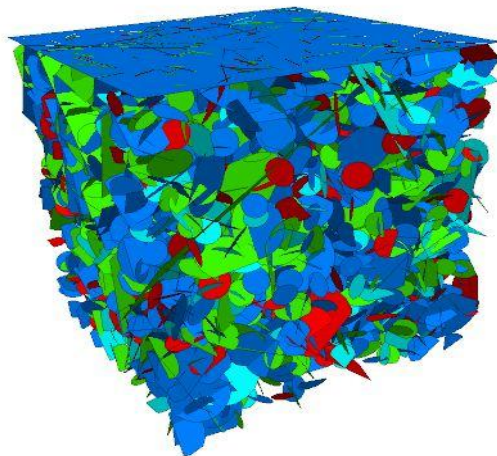
Shrink Factor: 1

Fractures (4304)

- jset 1
- jset 2
- jset 3
- jset 4

Geometry Test

- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch



شکل ۵-۲۴: شبکه ناپیوستگی‌های سد پارسین در مرحله سوم

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 12/12/2017 05:10:00

Geometry Test

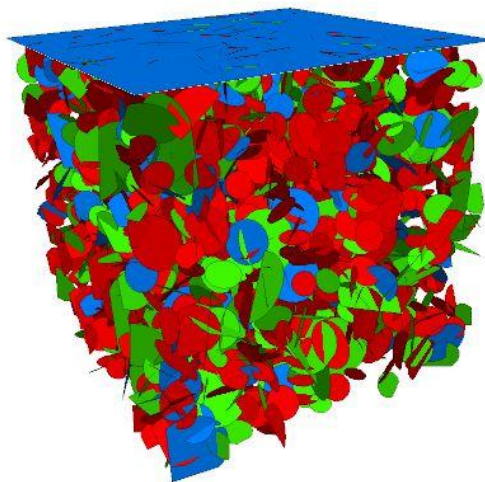
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (2489)

- jset 1
- jset 2
- jset 3



شکل ۵-۲۵: شبکه ناپیوستگی‌های کارون ۴ در مرحله سوم

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 12/12/2017 05:11:23

Geometry Test

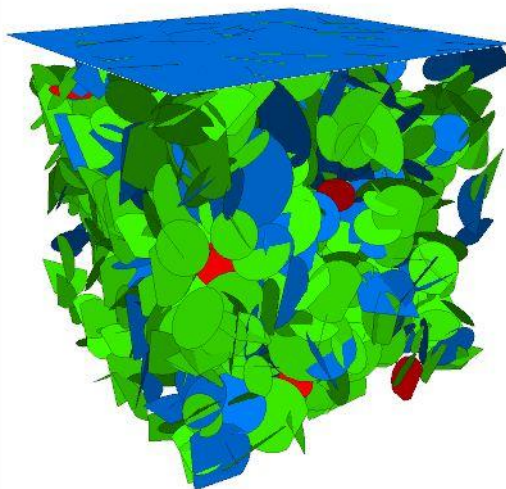
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (922)

- jset 1
- jset 2
- jset 3



شکل ۵-۲۶: شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد در مرحله سوم

جدول ۵-۷: شدت‌های خطی و حجمی موارد مطالعاتی در مرحله سوم

سد آزاد	سد کارون ۴	سد پارسیان	مورد مطالعاتی
۱/۱	۱/۷۸	۲/۰۸	P ₁₀
۲/۶	۳/۲	۳/۵۳	P ₃₂

۵-۲-۴-۴-مدل‌سازی مبتنی بر P₁₀، بازشدگی و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها

علاوه بر فراوانی و بازشدگی ناپیوستگی‌ها، در صورتی که حفاری به روش ژئوتکنیکی انجام شود، شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را نیز می‌توان اندازه‌گیری کرد. در این حالت با داشتن اطلاعات فراوانی هر دسته‌درزه، بازشدگی و جهت‌داری آنها می‌توان اقدام به مدل‌سازی نمود. در این مرحله اندازه درزه‌ها بر اساس رابطه میان بازشدگی و طول اثر تخمین زده می‌شود.

مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) مناطق مورد مطالعه تهیه (شکل‌های ۵-۲۷ تا ۵-۲۹) و شدت‌های خطی و حجمی در مدل شبیه‌سازی شده محاسبه و به صورت جدول ۵-۸ نمایش داده می‌شوند.

3DEC_DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 12/12/2017 05:27:23

Geometry Test

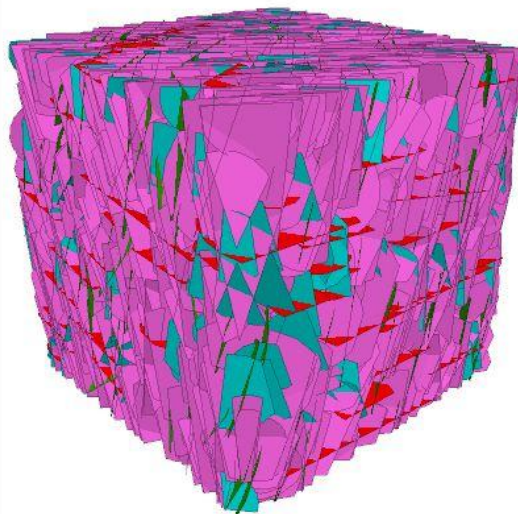
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (2546)

- jset 1
- jset 2
- jset 3
- jset 4



شکل ۵-۲۷: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد پارسیان در مرحله چهارم

3DEC_DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

تاریخ: 12/12/2017 05:47:27

Geometry Test

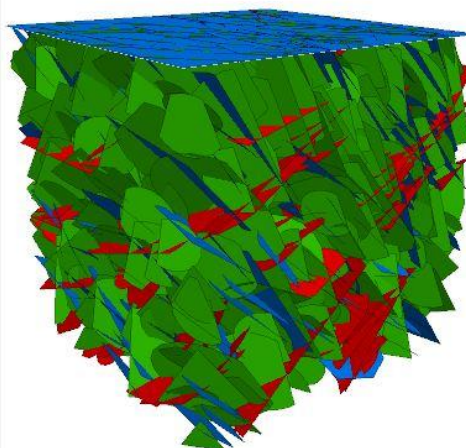
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (1112)

- jset 1
- jset 2
- jset 3



شکل ۵-۲۸: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد کارون ۴ در مرحله چهارم

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 0

12/12/2017 05:55:51

Geometry Test

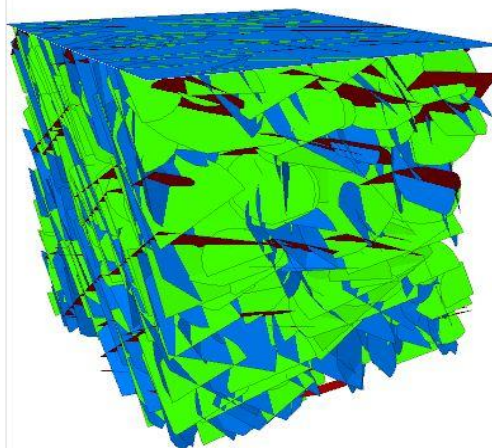
- Polygon
- (0) Free
- (1) Open
- (3) Branch
- (4) Branch
- (5+) Branch

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1

Fractures (1148)

- jset 1
- jset 2
- jset 3



شکل ۵-۲۹: شبکه ناپیوستگی‌های مجزا سد آزاد در مرحله چهارم

جدول ۵-۸: شدت‌های خطی و حجمی در مرحله چهارم

سد آزاد	سد کارون ۴	سد پارسیان	مطالعه موردی
۱/۳	۱/۷۸	۲/۱	P ₁₀
۲/۷۳	۳/۴	۳/۶۴	P ₃₂

۵-۲-۴-۵- مدل‌سازی مبتنی بر اطلاعات حفاری و امکان برداشت سطحی

مراحل بررسی مدل‌سازی شبکه شکستگی با امکان برداشت سطحی خاتمه می‌یابد. در این مرحله علاوه بر اطلاعات برداشت شده از گمانه، امکان برداشت سطحی به دلیل وجود رخنمون ناپیوستگی‌ها امکان پذیر است. با در نظر گرفتن خط برداشت روی سطح زمین و اندازه‌گیری پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها همچون شیب، جهت شیب، فاصله داری، فراوانی، بازشدگی و طول اثر، تمامی اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی شبکه‌ی شکستگی‌ها در دسترس خواهد بود. با محاسبه‌ی توابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها و استفاده از میانگین و انحراف معیار آن‌ها در مدل‌سازی، مدل‌های سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها حاصل می‌گردد. پس از مدل‌سازی شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا (DFN) مناطق مورد بررسی (شکل‌های ۵-۳۰ تا ۵-۳۱)، شدت‌های خطی و حجمی هر منطقه به صورت جدول ۵-۹ بدست می‌آید.

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

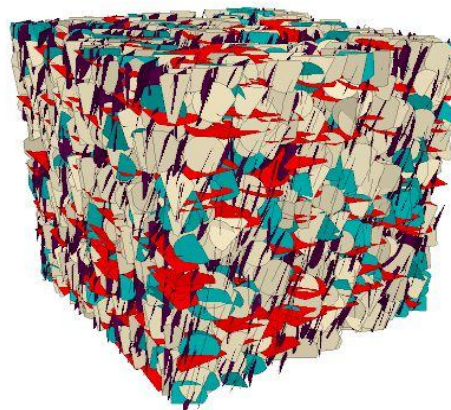
Step 0

ق.ظ 12/12/2017 06:21:57

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1
Fractures (7660)

- dfn1
- dfn2
- dfn3
- dfn4



شکل ۵-۳۰: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های سد پارسیان

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

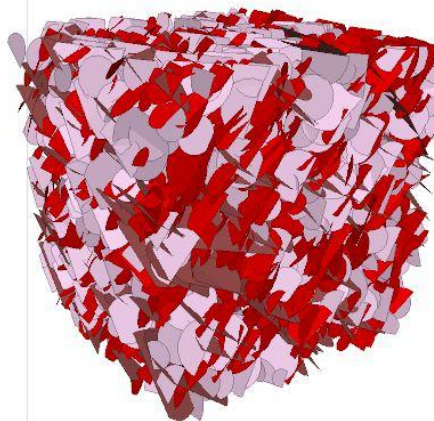
Step 0

ق.ظ 12/12/2017 06:25:48

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1
Fractures (2816)

- dfn1
- dfn2
- dfn3



شکل ۵-۳۱: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های محل احداث سد کارون ۴

3DEC DP 5.20

©2016 Itasca Consulting Group, Inc.

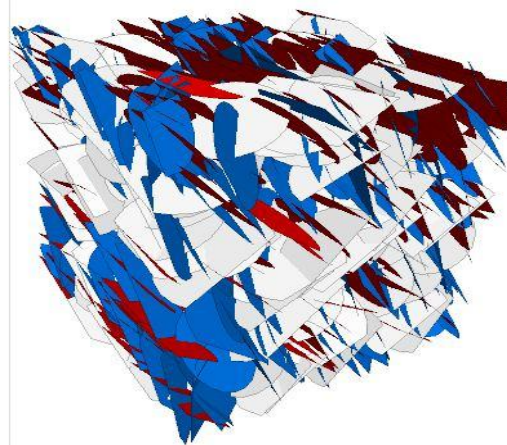
Step 0

ق.ظ 12/12/2017 06:31:46

DFN dfn name Label

Shrink Factor: 1
Fractures (727)

- dfn1
- dfn2
- dfn3



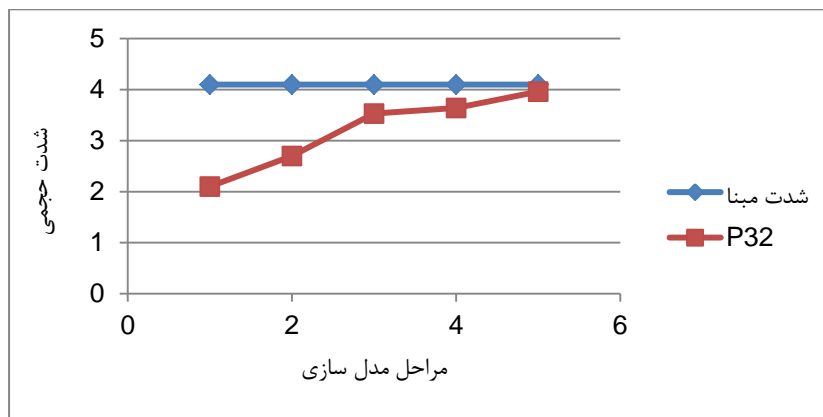
شکل ۵-۳۲: مرحله‌ی پنجم مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های سد آزاد

جدول ۵-۹: شدت‌های خطی و حجمی ناپیوستگی‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی شده

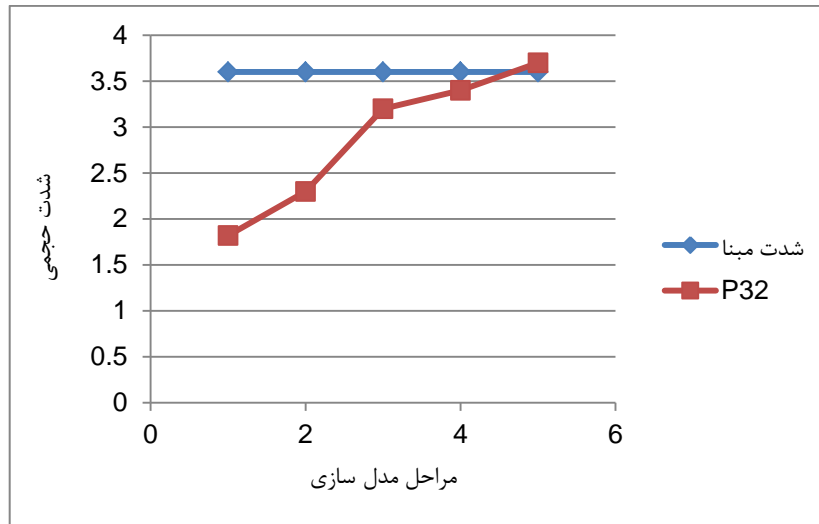
مطالعه موردی	سد پارسیان	سد کارون ۴	سد آزاد
P ₁₀	۲/۱	۱/۸۲	۱/۵
P ₃₂	۳/۹۶	۳/۷	۲/۹۳

۵-۲-۵- اعتبار سنجی مدل

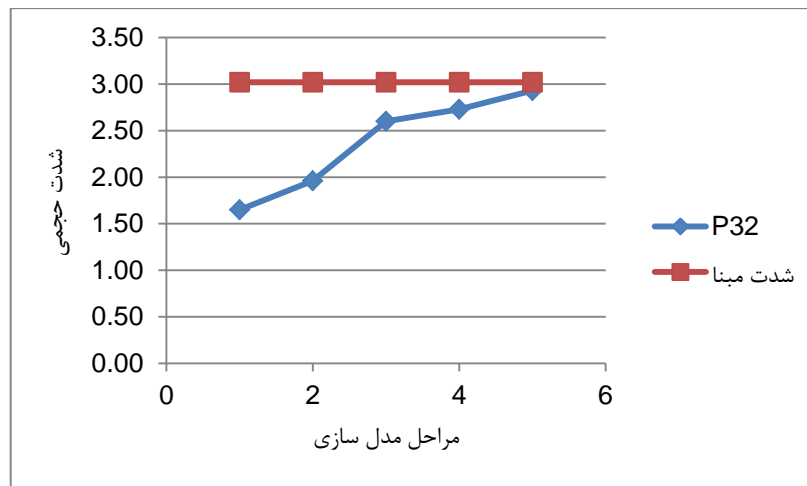
پس از مدل‌سازی ۵ مرحله‌ای ناپیوستگی‌ها به گونه‌ای که ذکر شد، در این بخش به بررسی میزان اعتبار هر یک از مدل‌ها پرداخته شده است. به منظور اعتبار سنجی مدل‌سازی‌ها می‌توان روند تغییرات شدت‌های حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله از مدل‌سازی را به صورت یک نمودار نشان داد. بر این اساس میزان اعتبار مدل‌های شبیه‌سازی شده در هر مرحله از مدل‌سازی‌ها مشخص می‌شود. شکل‌های ۵-۳۳ تا ۵-۳۵ تغییرات شدت ناپیوستگی‌ها در هر مرحله از مدل‌سازی برای موارد مطالعاتی مختلف را نشان می‌دهند.



شکل ۵-۳۳: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد پارسیان



شکل ۳۴-۵: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد کارون ۴



شکل ۳۵-۵: تغییرات شدت حجمی ناپیوستگی‌ها در هر مرحله مدل‌سازی برای سد آزاد

با توجه به شکل‌های ۳۳-۵ تا ۳۵-۵، میزان شدت حجمی ناپیوستگی‌ها با افزایش اطلاعات پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها افزایش می‌یابد و به میزان شدت حجمی مبنا نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مرحله‌ی پنج کامل‌ترین نوع مدل‌سازی و مرحله‌ی یک دارای کمترین اعتبار برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها است.

در جدول‌های ۱۰-۵، ۱۱-۵ و ۱۲-۵ درصد اعتبار تمامی مراحل مدل‌سازی برآورد شده است. درصد اعتبار هر مرحله شبیه‌سازی، حاصل کسر شدت حجمی مدل شبیه‌سازی شده بر شدت حجمی مدل مبنا است.

جدول ۵-۱۰: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد پارسیان)

مراحل مدل‌سازی	۱	۲	۳	۴	۵
اعتبار (درصد)	۵۱	۶۵	۸۶	۸۸	۹۶

جدول ۵-۱۱: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد کارون ۴)

مراحل مدل‌سازی	۱	۲	۳	۴	۵
اعتبار (درصد)	۵۰	۶۳	۸۸	۹۴	۱۰۲

جدول ۵-۱۲: اعتبار مراحل مدل‌سازی نسبت به مدل مبنا (سد آزاد)

مراحل مدل‌سازی	۱	۲	۳	۴	۵
اعتبار (درصد)	۵۴	۶۴	۸۶	۹۰	۹۷

لازم به ذکر است که با توجه به میزان هزینه طرح و هدف برداشت ناپیوستگی‌ها، دقت هر مرحله مدل‌سازی می‌تواند ارزشمند باشد. در مناطقی که کمترین هزینه در نظر گرفته می‌شود و هدف بررسی وضعیت خردایش سنگ منطقه است، مرحله‌ی اول می‌تواند استفاده گردد و هنگامی که هدف از برداشت ناپیوستگی‌ها، حفر تونل در منطقه یا سایر پروژه‌های مرتبط است و میزان دبی جریان آب ورودی به داخل فضای زیرزمینی اهمیت دارد، اندازه‌گیری جهت‌داری و بازشدگی واقعی ناپیوستگی‌ها بسیار اهمیت دارد.

تغییرات شدت در مرحله چهارم نسبت به مرحله سوم تغییرات چندانی نداشته است زیرا تنها جهت قرارگیری ناپیوستگی‌ها تغییر کرده است و اندازه‌ی ناپیوستگی‌ها تغییری نکرده است. شدت حجمی ناپیوستگی‌ها تحت تاثیر مستقیم اندازه‌ی ناپیوستگی‌ها است و تغییر جهت تاثیر چندانی بر روی آن ندارد.

بر اساس جدول‌های ۵-۱۰، ۵-۱۱ و ۵-۱۲ هنگامی که مدل‌سازی تنها بر اساس P_{10} انجام می‌گیرد، مقدار P_{32} بین ۵۰ تا ۵۴ درصد است. پس اگر مقادیر P_{32} حاصل از مدل ساخته شده بر مبنای P_{10} در

۲ ضرب شود، مقادیر شدت حجمی نزدیک به شدت حجمی مبنا محاسبه می‌شود. البته نمی‌توان گفت که این مطلب برای تمامی شبیه‌سازی‌ها درست است، زیرا تعداد مناطق مورد بررسی به دلیل مشکلات دریافت داده، محدود است.

۵-۳- جمع‌بندی

در فصلی که گذشت مدل‌های اولیه‌ی مناطق سد مخزنی پارسیان، کارون ۴ و سد آزاد ساخته شد و به‌عنوان مدل مبنا جهت بررسی‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. سپس مراحل مدل‌سازی در ۵ مرحله انجام شد، این مراحل از فراوانی ناپیوستگی‌ها شروع می‌شود و در ادامه، به ترتیب با افزودن فراوانی هر دسته درزه، بازشدگی، جهت‌داری و امکان برداشت سطحی خاتمه می‌یابد. در تمامی مراحل با محاسبه‌ی شدت حجمی برای هر مدل و مقایسه با مدل مبنا اعتبار سنجی مدل‌ها انجام گرفته است.

نتیجہ گیری و پیشہ ادا

۶-۱- مقدمه

امروزه در اکثر پروژه‌هایی که نیاز به شناخت ساختار زمین و حفاری آن داشته باشد، بررسی ناپیوستگی‌ها بسیار اهمیت دارد. در صورتی که دید کلی از ناپیوستگی‌های منطقه و رفتار آن‌ها در دست نباشد، امکان خسارت‌های جانی و مالی و عدم موفقیت در پروژه‌های مرتبط با ساختار زمین وجود دارد. با توجه به اینکه در واقعیت امکان برداشت سه‌بعدی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های زمین وجود ندارد، از روش‌های آماری، نزدیک‌ترین حالت ناپیوستگی‌ها به ساختار زمین مدل‌سازی می‌شود. اگر در مواردی رخنمون ناپیوستگی‌ها در دسترس نباشد و یا به هر دلیلی امکان برداشت آن‌ها وجود نداشته باشد، می‌توان از طریق مغزه‌های حفاری و دوربین‌های درون چال، ناپیوستگی‌ها را بررسی و سپس مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی ناپیوستگی‌های منطقه بر اساس اطلاعات اولیه و محدود ناپیوستگی‌ها، بر اساس پروژه‌های در دست اجرا و هزینه و امکانات موجود ارزشمند می‌گردد.

۶-۲- نتایج

- بر اساس مدل‌سازی‌های انجام‌شده، اگرچه امکان مدل‌سازی دقیق شبکه ناپیوستگی‌های منطقه در سه بعد نیست، ولی با داشتن پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها در یک یا دو بعد می‌توان شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها در سه بعد را مدل‌سازی کرد.
- مدل‌سازی ناپیوستگی‌های منطقه از مرحله‌ی اول تا مرحله‌ی پنجم، نشان دهنده‌ی نزدیک شدن شدت حجمی ناپیوستگی‌ها به مقدار واقعی شدت حجمی منطقه است.
- بهترین مرحله‌ی تخمین دقیق اندازه‌ی شدت حجمی و موقعیت قرارگیری ناپیوستگی‌ها مرحله‌ی پنجم است. بنابراین با داشتن تنها چگالی خطی ناپیوستگی‌ها نمی‌توان به مدل دقیقی از منطقه ناپیوستگی‌های منطقه دست یافت.
- مرحله اول مدل‌سازی تنها با استفاده از چگالی در طول یک خط برداشت انجام شده است، بنابراین جهت‌داری و طول اثر ناپیوستگی‌ها به صورت کمیت‌های غیرمنطقی و بر اساس ابعاد

بلوک توزیع شده است. بنابراین در پروژه‌های بررسی میزان جریان آب ورودی به فضای زیر زمینی قابل اعتماد نیست.

- مرحله دوم با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها به صورت دسته درزه‌های مختلف صورت گرفته است، بنابراین انتظار افزایش شدت حجمی درون مدل بالا می‌رود.
- با توجه به موقعیت ناپیوستگی‌ها در منطقه، به داده‌های اندک نمی‌توان قانع شد، هر چه اطلاعات برداشت شده ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، مدل‌سازی با دقت بیشتری انجام می‌گیرد.

۳-۶- پیشنهادها

- ۱- با توجه به دشواری دسترسی به اطلاعات مناطق برداشت‌شده و عدم دسترسی به اطلاعات کافی جهت تکمیل نهایی روابط، پیشنهاد می‌شود که در صورت امکان از داده‌های بیشتری جهت بررسی مدل‌های آماری استفاده شود.
- ۲- با توجه به این‌که مدل‌سازی در این پایان‌نامه با استفاده از نرم‌افزار 3dec انجام گرفته و می‌توان گفت که هر نرم‌افزاری از ایرادات خاصی برخوردار و دارای محدودیت‌های ویژه‌ای است، پیشنهاد می‌شود که از نرم‌افزارهای دیگر مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های مجزا جهت بالا بردن اعتبار مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها استفاده شود.

منابع و مراجع

- ابولقاسم اصفهانی، ع، میرزایی نصیر آباد، ح، (۱۳۹۳). "تعیین توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر، بازشدگی و فاصله داری شکستگی‌های توده سنگ درزه دار". مطالعه موردی: ساختگاه سد پارسیان. همایش ملی زمین شناسی و اکتشاف منابع-شیراز
- افشار حرب، ع (۱۳۷۳). "زمین شناسی کپه داغ". انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۱۱، ۲۷۶ ص.
- باغبانان ع، جولایی الف، (۱۳۸۹). "تولید شبکه شکستگی مجزا در فضای سه بعدی". چهاردهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه ارومیه.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران (مرداد۱۳۸۲): "گزارشات مطالعات مکانیک سنگ طرح سد و نیروگاه کارون ۴"، (جلد ۱/۳)، مطالعات مرحله دوم.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران: "گزارشات مطالعات و طراحی های مکانیک سنگ نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد"، گزارش اول، اسفند ۹۲
- شرکت مهندسی مشاور لار، "گزارش زمین شناسی عمومی و مهندسی طرح سد گورک (پارسیان)"، ۱۳۸۸.
- شمس ق، شریف زاده م، جوادی اصطهباناتی م، (۲۰۱۴). "شناسایی مسیرهای اصلی جریان سیال اطراف حفاریات زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا و اتومات سلولی". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن. ص ۶۷-۶۶
- ملایوسفی الف، باغبانان ع، فتحیان پور ن، (۱۳۹۰). "تعیین پارامترهای مدل سازی عددی شبکه درزه های مجزا با استفاده از داده های لاگ تصویری FMI". نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن. دوره ششم، شماره یازده، ۱۳۹۰، ص ۷۱ تا ۷۷.
- میرزایی نصیرآباد ح، سلطانعلی زاده الف، بالیده ص، "توصیف هندسی و مدل سازی سه بعدی ناپیوستگی های توده سنگ".
- نعمت الهی، ن. (۱۳۹۶). "آمار و احتمال مهندسی". انتشارات شرح، چاپ ۱. صفحه ۲۲۰-۱۷۹.
- نوروزی م، جلالی س.م.الف، خالوکاکایی ر (۱۳۹۴). "شبیه سازی هندسی سه بعدی شبکه ناپیوستگی های توده سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان". نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، شماره ۱، دروه ۴: ۵۳-۶۸
- نوروزی م، خالو کاکایی ر، جلالی، س.م.الف، (۱۳۹۲). "بررسی مدل تصادفی- ترکیبی برای تعیین ویژگی های مقاومتی توده سنگ". سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، تهران.

- نوروزی، م. جلالی، س.م.ا. کاکایی، ر. (۱۳۹۲). "روابط آماری حاکم بر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها". کنفرانس بین‌المللی معدن‌کاری فرایندهای معدنی، مهندسی متالورژی و زیست محیطی. زنجان.

- Baghbanan, A., & Jing, L. (2007). *Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 704-719.
- Bang, S. H., Jeon, S. W., & Kwon, S. K. (2012). *Modeling the hydraulic characteristics of a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture: application in the underground research tunnel at Kaeri*. *Nuclear engineering and technology*, 44(6), 639-652.
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). *Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran*. *Canadian journal of earth sciences*, 18(2), 210-265.
- Brueckman, C. (2016). *Reliability analysis of discrete fracture network projections from borehole to shaft scale discontinuity data* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Chen, R., & Tonon, F. (2012). *Fracture Cluster Modeling for Groundwater Inflow Prediction into Rock Tunnels Using Geostatistics*. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 2372-2381).
- De Dreuzy, J. R., Davy, P., & Bour, O. (2001). *Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution 2. Permeability of networks based on lognormal distribution of apertures*. *Water Resources Research*, 37(8), 2079-2095.
- Decker, J. B. (2007). *Building, updating and verifying fracture models in real time for hard rock tunneling* (Doctoral dissertation).
- Dershowitz, W. S., & Herda, H. H. (1992, January). *Interpretation of fracture spacing and intensity*. In *The 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Fox, A., Forchhammer, K., Pettersson, A., La Pointe, P., & Lim, D. H. (2012). *Geological discrete fracture network model for the olkiluoto site, eurajoki, finland*.
- Hatton, C. G., Main, I. G., & Meredith, P. G. (1994). *Non-universal scaling of fracture length and opening displacement*. *Nature*, 367(6459), 160-162.
- Huang, L., Tang, H., Tan, Q., Wang, D., Wang, L., Eldin, M. A. E., ... & Wu, Q. (2016). *A novel method for correcting scanline-observational bias of discontinuity orientation*. *Scientific reports*, 6, 22942.
- Itasca, 3. D .E .C. "Vesion 5.2" 2016.
- Johnston, J. D., & McCaffrey, K. J. W. (1996). *Fractal geometries of vein systems and the variation of scalingrelationships with mechanism*. *Journal of Structural Geology*, 18(2-3), 349-358.
- Kulatilake, P. H. S. W. (1993, February). *Application of probability and statistics in joint network modeling in three dimensions*. In *Proc. Conf. on Probabilistic Methods in Geotech. Engrg., Lanberra, Australia* (pp. 63-87).

- Kulatilake, P. H. S. W., & Wu, T. H. (1984, December). **The density of discontinuity traces in sampling windows**. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 21, No. 6, pp. 345-347). Pergamon.
- Kulatilake, P. H., Wathugala, D. N., & Stephansson, O. V. E. (1993). **Stochastic three dimensional joint size, intensity and system modelling and a validation to an area in Stripa Mine, Sweden**. *Soils and Foundations*, 33(1), 55-70.
- Latham, J. P., Van Meulen, J., & Dupray, S. (2006). **Prediction of in-situ block size distributions with reference to armourstone for breakwaters**. *Engineering Geology*, 86(1), 18-36.
- Martel, S. J. (1999). **Analysis of fracture orientation data from boreholes**. *Environmental & Engineering Geoscience*, (2), 213-233.
- Mauldon, M. (1994, April). **Intersection probabilities of impersistent joints**. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 31, No. 2, pp. 107-115). Pergamon.
- Mauldon, M., & Dershowitz, W. (2000). **A multi-dimensional system of fracture abundance measures**. In *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 32, No. 7, p. A474).
- Meyer, T., & Einstein, H. H. (2002). **Geologic stochastic modeling and connectivity assessment of fracture systems in the Boston area**. *Rock mechanics and rock engineering*, 35(1), 23-44.
- Özkaya, S. I. (2003). **Fracture length estimation from borehole image logs**. *Mathematical Geology*, 35(6), 737-753.
- Pahl, P. J. (1981, June). **Estimating the mean length of discontinuity traces**. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 18, No. 3, pp. 221-228). Pergamon.
- Palmstrom, A. (2005). **Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)**. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377.
- Priest, S. D. (2012). **Discontinuity analysis for rock engineering**. Springer Science & Business Media.
- Renshaw, C. E., & Park, J. C. (1997). **Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture**. *Nature*, 386(6624), 482.
- Renshaw, C. E., & Park, J. C. (1997). **Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture**. *Nature*, 386(6624), 482.
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). **Applied hydrogeology of fractured rocks**. Springer Science & Business Media.
- Stone, D. (1984, August). **Sub-surface fracture maps predicted from borehole data: An example from the Eye-Dashwa pluton, Atikokan, Canada**. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 21, No. 4, pp. 183-194). Pergamon.
- Tollenaar, R. N. (2008). **Characterization of discrete fracture networks and their influence on caveability and fragmentation**(Doctoral dissertation, University of British Columbia).

- Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1995). *Relation between vein length and aperture*. *Journal of structural geology*, 17(3), 423-434.
- Von, V., (2013) *Characterization and flow simulations of discrete fracture networks*.
- Wang, X. (2005), *Multi-dimensional intensity measures for Fisher-distributed fractures*, in *Civil Engineering*.
- Wang, X. (2005). *Stereological interpretation of rock fracture traces on borehole walls and other cylindrical surfaces* (Doctoral dissertation).
- Warburton, P. M. (1980, August). *A stereological interpretation of joint trace data*. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 17, No. 4, pp. 181-190). Pergamon.
- Zhang, L., & Einstein, H. H. (2000). *Estimating the intensity of rock discontinuities*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 819-837.
- Zhang, X., & Sanderson, D. J. (Eds.). (2002). *Numerical modelling and analysis of fluid flow and deformation of fractured rock masses*. Elsevier.

Abstract:

Geometric characteristics of rock mass discontinuities are the most important factors influencing the flow rate of fluid (oil, water and gas), rock mass resistance and stability, as well as the penetration rate of the TBM machine. In many areas there is no possibility of harvesting discontinuities due to the absence of outcrops on the ground. In this case, the only way is to grasp the geometric information of the discontinuity network, to speculate in the region, and to examine the discontinuities deep in the earth. The specimens provide a lot of information for modeling, including slope and tilt direction (if not done geotechnically) and length of work. The main purpose of this dissertation is to estimate the geometric model of the rock mass discontinuity network based on the minimum information obtained from the specimens, the linear density of seismicity. For this purpose, using three data points of Parsian Reservoir Dam, Karun 4 Dam and Azad Dam Based on the data of drilling and surface drilling data, modeling has been done in five levels of accuracy. For the modeling of discontinuities, at the first level, the general frequency of discontinuities and, at the next levels, in the next levels, are added to the abundance information of each joint, opening, slope and tilt direction, and surface information. The modeling validity percentage is based on the comparison between the volume intensity of the discontinuities in the simulated model and the base model. The results show that by increasing the information gathered from the network of discontinuities, the modeling accuracy increases. The percentage of credibility of all three areas studied in the first stage is 51-54, the second stage is 63-65, the third stage is 56-88, the fourth stage 88-90, the fifth stage is 96-102. On the third level of simulation, the level of volume variation and model validity strongly increase with respect to the fourth level, indicating a greater sensitivity of modeling validity to the length of the discontinuity effect. Also, slope and slope direction will not have much effect on the volume of the model.

Key words: Separate discontinuity network, joint density, geometric modeling



دانشگاه صنعتی شاهرود

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Demonstration of the 3D geometrical model of rock mass based on the discontinuities density

By: Hassan Ramezani

Supervisors

Dr Seyed Mohammad Esmaeil Jalali

Dr Mehdi Noroozi

February 2018

