

تولید سه بعدی شبکه شکستگی مجزا با رویکرد زمین آماری

رحمان لطفی^{۱*}؛ علیرضا باغبانان^۲؛ حمید هاشم‌الحسینی^۳؛ سجاد نامداری^۴

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشجوی دکترا مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۱/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.5539.1307

واژگان کلیدی	چکیده
مدل‌سازی فضایی شکستگی چگالی جهت‌داری شبیه‌سازی گوسین متوالی GFracIUT	شبیه‌سازی توزیع شکستگی‌های سنگ یک مسئله بسیار مهم مشترک در زمینه‌های مختلف مهندسی زمین است. این مسئله در مبحث آب‌گذری در توده‌سنگ و پیش‌بینی میزان ورود آب به درون فضاهای زیرزمینی اهمیت به‌خصوصی دارد. مطالعات تئوری نشان داده است که نتایج مدل‌های سه‌بعدی شبکه شکستگی مجزا نسبت به سایر مدل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های روش‌های آماری مدل‌سازی شبکه درزه عدم توجه به رفتار فضایی پارامترهای مورد نیاز شبکه درزه است. به‌عبارتی دیگر در روش‌های آماری، تولید پارامترهای شبکه درزه بر اساس توابع توزیع احتمال، به‌صورت تصادفی و با استفاده از الگوریتم مونت کارلو است. در این تحقیق یک کد محاسباتی به نام GFracIUT توسعه داده شده است. این کد به‌منظور تولید شبکه شکستگی مجزای سه‌بعدی و با توجه به توابع چگالی احتمال پارامترهای هندسی ناپویستگی‌های برداشت‌شده از سطح برون‌زد سنگ‌ها و گمانه‌ها، به روش زمین‌آمار توسعه داده شده است. در این برنامه ابتدا چگالی شکستگی‌ها به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی محاسبه می‌شوند. سپس موقعیت مرکز شکستگی‌ها از طریق فرآیند پواسون مشخص می‌شود. با معین شدن موقعیت مرکز شکستگی‌ها مؤلفه‌های جهت‌یافتگی با به‌کارگیری روش زمین‌آمار تخمین زده می‌شوند. این برنامه امکان مدل‌سازی شکستگی‌ها با شکل‌های مختلف هندسی از جمله دیسک دوار و متوازی‌الاضلاع را متناسب با مشخصات مورد نظر کاربر دارد. به‌منظور کاربرد عملی این برنامه یک مطالعه موردی بر روی ناحیه‌ای از میدان نفتی گچساران صورت گرفت.

۱- پیشگفتار

یکی از مهم‌ترین خصوصیات توده‌سنگ‌ها، شکستگی‌های آن‌ها است که به دلیل فرآیندهای ژنتیکی مختلف از قبیل رُخ، کشش و برش می‌توانند در مقیاس‌های متفاوتی از میکرو تا مگامتر در طبیعت ایجاد گردند. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی نفوذپذیری بدنه صلب سنگ در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بسیار ناچیز بوده و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند. شکستگی‌ها به‌شدت بر روی خصوصیات مکانیکی و

هیدرولیکی توده‌سنگ به‌خصوص سنگ‌های کریستاله با نفوذپذیری پایین تأثیر می‌گذارند (Adler & Thovert, 1999). بنابراین برای چنین ساختارهایی رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ به‌وسیله شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ نیازمند درک مناسبی از خصوصیات هیدرولیکی شکستگی و شبکه شکستگی‌ها است. دستیابی به مدل واقع‌بینانه از شکستگی‌ها برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ اطراف حفاریات زیرزمینی مثل تونل، مغارهای زیرزمینی، مخازن نفتی و مخازن دفن زباله‌های

* نویسنده مسئول - اصفهان؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده مهندسی معدن، طبقه سوم؛ کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱؛ شماره‌ی تلفن:

۰۳۱-۳۳۹۱۵۱۲۸؛ رایانامه: Lotfi_Rahman@gmail.com

هسته‌ای، می‌تواند دقت مطالعات طراحی و ایمنی را افزایش دهد. در این تحلیل‌ها باید رفتار آب‌های زیرزمینی منطقه، بررسی شود و امکان هر نوع تغییر در رفتار و رژیم جریان و تأثیر آن بر عملیات احداث، بهره‌برداری و نگهداری سازه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بررسی رفتار آب‌های زیرزمینی پس از احداث سازه‌های زیرزمینی از آن جهت حائز اهمیت است که حرکت آب همواره در جهتی است که دارای کوتاه‌ترین مسیر و بیشترین شیب هیدرولیکی باشد. در سازندهای سخت، حرکت آب در مسیر درزه‌ها، شکاف‌ها و ناپیوستگی‌ها است. نشت آب به درون این سازندها تأثیر زیادی بر پایداری سازه‌های مهندسی موجود در توده‌سنگ‌های درزه‌دار دارد.

برخی از زمینه‌های کاربرد مطالعه این موضوع مانند پیش‌بینی جریان سیال و الگوی حرکت کلی سیالات در اطراف فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها و مغارها به صورت مبالغه‌آمیزی مغفول مانده‌اند. دلیل این امر را می‌توان در تعدد تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌هایی مانند مهندسی نفت و مطالعات سایت‌های زیرزمینی دفن زباله‌های هسته‌ای جستجو نمود که این امر باعث شده است که زمینه‌هایی مانند تونل و فضاهای زیرزمینی در سایه این تنوع قرار گیرد.

کولاتیلاکه هندسه شکستگی را به‌طور تصادفی برای بخش شرقی تونلی واقع در کالیفرنیا مدل‌سازی کرد. آنها ابتدا داده‌هایی که شامل ۱۶ خط برداشت و به طول ۳۰۰ متر در راستای تونل می‌شد را ثبت کرده و با نرم‌افزار *FRACNTWK* مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (*Kulatilake, et al., 2003*). رایلی در سال ۲۰۰۴ روش آماری مبتنی بر قانون را برای تولید الگوهای شکستگی سنگ پیشنهاد کرد (*Riley, 2004*). جان یک روش جامع مهندسی به‌منظور تحلیل پایداری حفریه قائم در سنگ سخت پیشنهاد کرد. جان و همکاران ابتدا برای ثبت پیچیدگی‌های ساختاری، شبکه شکستگی مجزای توده‌سنگ را تولید کردند. سپس سیستم شکستگی‌های تولیدشده به‌منظور تحلیل تنش با یک روش المان مجزا ترکیب شد (*Hadjigeorgiou, Esmaili & Grenon, 2009*). گاتینونی جریان آب ورودی به تونل ناشی از سیستم شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ را به‌صورت عددی بررسی کرد. هدف اصلی مطالعه گاتینونی بررسی تأثیر برخی پارامترهای زمین‌ساختاری (شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها) روی فرآیند زهکشی تونل بود (*Gattinoni, Scesi, & Terrana, 2009*).

با پیشرفت علم و تلاش محققین در زمینه تولید آماری شبکه درزه‌ها، مدل‌های شبکه شکستگی مجزا ارائه شد. این مدل‌ها اجازه ورود شکستگی‌های با طول محدود و با جهت‌گیری دلخواه را می‌دهند. به‌منظور ساخت شبکه شکستگی مجزا اطلاعاتی از قبیل چگالی، جهت‌داری، طول و بازشدگی شکستگی‌ها مورد نیاز است. در چند سال اخیر چندین محقق در داخل کشور نیز بر روی مدل‌سازی شبکه درزه‌روشی‌هایی ارائه کردند که در ادامه به آنها اشاره خواهد

برخی از زمینه‌های کاربرد مطالعه این موضوع مانند پیش‌بینی جریان سیال و الگوی حرکت کلی سیالات در اطراف فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌ها و مغارها به صورت مبالغه‌آمیزی مغفول مانده‌اند. دلیل این امر را می‌توان در تعدد تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌هایی مانند مهندسی نفت و مطالعات سایت‌های زیرزمینی دفن زباله‌های هسته‌ای جستجو نمود که این امر باعث شده است که زمینه‌هایی مانند تونل و فضاهای زیرزمینی در سایه این تنوع قرار گیرد.

۲- پیشینه و انگیزه تحقیق

برای مدل‌سازی شکستگی‌های بسیار پیچیده روش‌های مختلفی طی چهار دهه گذشته پیشنهاد شده است. در مراحل اولیه «اسنو» شبکه شکستگی را از طریق سه گروه عمود بر هم از صفحات نامحدود با فواصل ثابت یا اتفاقی به‌سادگی مدل‌سازی کرد (*Snow, 1969*). برای مدل‌های توزیع پواسون در فضای دوبعدی، مدلی ارائه شد که فاصله یک صفحه شکستگی نامحدود از یک مبدأ قراردادی را با فرآیند پواسون تعریف می‌کرد و جهت‌داری آن را به‌صورت تصادفی و یا با جهت‌داری دسته درزه‌های غالب به دست آورد (*Andersson, Shapiro & Bear, 1984*). (*Priest & Andersson & Thunvik, 1986*) و شبکه که شکستگی متشکل از صفحات محدود با توسعه و بهبود مدل صفحه‌ای پواسون تولید شد (*Long, Gilmour & Witherpoon, 1985*). (*Rouleau & Andersson & Dverstorp, 1987*) و

شد. کد کامپیوتری *FracIUT* به‌منظور تولید مدل شبکه شکستگی مجزا بر مبنای توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌های برداشت‌شده از سطح برون‌زد گمانه‌ها و با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو توسعه داده شد (Joolaei & Baghbanan, 2013). نروزی شبکه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در سد رودبار لرستان را با ارائه کد محاسباتی *DFN-FRAC3D* شبیه‌سازی کرد (Noroozi, Kakaie & Jalali, 2015). فرشته‌نژاد یک روش سه‌بعدی متکی بر هندسه را برای مدل کردن لایه‌های چین‌خورده سنگ پیشنهاد کرد (Fereshtenejad, et al., 2016).

علی‌رغم برطرف شدن برخی مسائل از قبیل جهت‌داری شکستگی‌ها و بی‌نهایت فرض کردن طول آن‌ها به کمک روش‌های آماری تولید شبکه شکستگی مجزا، اعمال برخی ویژگی‌ها با این روش‌ها امکان‌پذیر نیست. از جمله این ویژگی‌ها اعمال ناهمسانگردی برای تولید پارامترهای شبکه درزه، برقراری ارتباط فضایی بین مقادیر مختلف از یک پارامتر خاص شبکه درزه، تأثیر پذیرفتن این پارامتر از داده‌های اطراف خود (به‌کارگیری موقعیت مکانی و مقدار داده در هر موقعیت برای انجام محاسبات) و نیز تولید غیر تصادفی (اعمال تأثیر داده‌های اطراف روی موقعیت مورد تخمین) یک پارامتر خاص از شکستگی‌ها می‌باشند. همچنین بر اساس تحقیقات انجام‌گرفته توسط کویکه و همکاران در سال ۲۰۱۵ این واقعیت به اثبات رسیده است که موقعیت شکستگی‌های با جهات مشابه نزدیک به هم هستند و با الگوهای خاصی از قبیل دسته‌های توأم تحت تنش‌های فشاری بالا شکل می‌گیرند (Koike, Liu & Sanga, 2012) و (Koike, et al., 2015). این بدین معناست که شکستگی‌ها به‌صورت تصادفی شکل نمی‌گیرند و یک همبستگی فضایی بین آنها وجود دارد. این همبستگی جهتی برای دستیابی به مدل واقع‌بینانه‌تر می‌تواند با مدل‌سازی شکستگی‌ها ترکیب شود.

برای اعمال خصوصیات فضایی سیستم شکستگی‌ها باید روشی در نظر گرفته شود تا بتوان به‌واسطه آن بین مقادیر مختلف و موقعیت‌های متفاوت از یک پارامتر مورد نیاز برای تولید سیستم شکستگی‌ها، ارتباط برقرار کرد. روش زمین‌آمار با برقراری ارتباط فضایی بین مقادیر مختلف از یک پارامتر می‌تواند مبنای تولید قرار گیرد. مدل‌سازی

زمین‌آمار شبکه شکستگی‌ها در سال ۱۹۸۷ توسط لانگ و بیلوکس پیشنهاد گردید و واریوگرام تغییرات چگالی شکستگی برای مراکز آنها در فضای دوبعدی استفاده شد (Long & Billaux, 1987). کویکه و همکاران در سال ۲۰۰۱ با روش شبیه‌سازی گوسین متوالی ابتدا چگالی شکستگی‌ها را برای یک مدل دوبعدی تولید و سپس با به‌کارگیری الگوریتم مونت‌کارلو جهت‌داری شکستگی‌های تولیدشده را تعیین کردند (Koike, Komorida & Ichikawa, 2001).

کویکه و همکاران در سال ۲۰۱۲ کد کامپیوتری ارائه کردند که شامل سه مرحله‌ی تولید چگالی شکستگی‌ها با روش شبیه‌سازی گوسین متوالی، اختصاص دادن شیب و جهت‌شیب به هر یک از شکستگی‌های تولیدشده با الگوریتم مونت‌کارلو و اتصال شکستگی‌ها به یکدیگر می‌شد (Koike, Liu & Sanga, 2012).

به‌منظور مدل‌سازی شبکه درزه به روش زمین‌آمار و نیز بومی‌سازی در این زمینه، کد کامپیوتری *GFracIUT* به زبان برنامه‌نویسی سی‌شارپ (C#) توسعه داده شد. این برنامه ابتدا با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از دیواره گمانه‌ها و رخنمون‌های سطحی، به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی چگالی شکستگی‌های موجود در هر ریزبلوک را تخمین زده و با استفاده از فرآیند پواسون موقعیت مکانی هر یک از شکستگی‌های موجود در هر ریزبلوک را تعیین می‌کند. در گام بعد با مشخص بودن موقعیت شکستگی‌ها و به‌کارگیری روش زمین‌آمار مؤلفه‌های جهت‌داری هر یک از شکستگی‌ها را محاسبه می‌کند. همچنین مؤلفه‌ی طول تمام شکستگی‌ها باهم برابر و مشابه در نظر گرفته می‌شود. سپس با به‌کارگیری اطلاعات به‌دست‌آمده یک مدل سه‌بعدی از شبکه شکستگی‌ها ارائه می‌کند. همچنین به‌منظور کاربرد عملی این برنامه یک مطالعه موردی بر روی بخشی از میدان نفتی گچساران صورت گرفت و نتایج مدل‌سازی بررسی شد.

۳- تولید شبکه درزه به روش زمین‌آمار

در روش‌های آماری، اجزا و نمونه‌های برداشتی از کل جامعه برای شناخت آن، فاقد اطلاعات مکانی در فضا است. در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه

پژوهش به چگونگی تولید هر کدام از پارامترهای شبکه درزه پرداخته شده است.

۳-۱- تخمین چگالی شکستگی‌ها

در نخستین گام از شبیه‌سازی شکستگی‌ها باید موقعیت آن‌ها از طریق مراکزشان مشخص شود. برای این منظور باید نقشه چگالی شکستگی معین شود. چگالی شکستگی‌ها به روش‌های مختلفی از قبیل تعداد یا مساحت کل شکستگی‌ها بر واحد حجم در فضای سه‌بعدی، تعداد یا طول کل شکستگی‌ها بر واحد سطح در فضای دوبعدی و تعداد تقاطع شکستگی‌ها در یک خط برداشت بر واحد طول در فضای یک‌بعدی انجام می‌شود. در برنامه توسعه داده‌شده چگالی شکستگی‌ها از طریق تعداد مراکز شکستگی‌ها بر واحد شبکه سلولی صورت می‌گیرد.

دیگری به فاصله معین نخواهد داشت (Hassani pak & Sharafoldin, 2002). به عبارتی دیگر در آمار کلاسیک بین مقادیر مختلف یک کمیت در نمونه‌های مختلف از جامعه نمی‌توان ارتباط فضایی برقرار کرد. بنابراین مبنای این روش با روش زمین‌آمار متفاوت بوده و نمی‌توان از آن به‌منظور دستیابی به هدف این تحقیق استفاده کرد. از این‌رو برنامه *GFracIUT* ابتدا به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی چگالی شکستگی‌های موجود در هر ریزبلوک را تخمین می‌زند و نقشه چگالی شکستگی‌ها را برای هر دسته درزه تعیین می‌کند. سپس با فرآیند پواسون موقعیت مرکز هر شکستگی در ریزبلوک مربوطه را مشخص می‌نماید. همچنین مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها را با استفاده از روش زمین‌آمار تخمین می‌زند. در نهایت با تولید مؤلفه‌ی شعاع شکستگی‌ها یک مدل سه‌بعدی ارائه می‌کند. در ادامه این



شکل ۱- فلوچارت تولید چگالی شکستگی‌ها به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی

کریجینگ روش مناسبی خواهد بود؛ اما اگر هدف تخمین ارزیابی شدت تغییرپذیری چگالی شکستگی‌ها باشد،

اگر هدف از تخمین دستیابی به مقدار میانگین چگالی شکستگی‌ها باشد، برای دستیابی به این امر

داده‌ها چگالی شکستگی با توزیع محلی خواهد بود. تابع توزیع احتمال تجمعی نرمال استاندارد شده، تابعی است که در آن میانگین داده‌ها صفر و واریانس آنها یک است که با $G(u) = F_U(u)$ نشان داده می‌شود و رابطه آن به شکل زیر است (Deutsch & Journal, 1998):

$$p = G(u) = 0.5 * (1 + \operatorname{erf}(\frac{u}{\sqrt{2}})) \quad (۳)$$

در رابطه (۳): erf به تابع خطا اشاره دارد که بسط آن در کد $GFracIUT$ آورده شده و p عددی بین صفر و یک است. حال با به دست آوردن معکوس تابع $G(u)$ از رابطه (۳) و جایگزین کردن آن در رابطه (۲)، رابطه نهایی (۴) به دست می‌آید (Deutsch & Journal, 1998):

$$q = G^{-1}(p) = G^{-1}(F_Q(q)) = \sqrt{2} * \operatorname{erf}^{-1}(2p - 1) \quad (۴)$$

در نهایت با داشتن یک p خاص و قرار دادن در رابطه (۴) می‌توان مقدار نرمال استاندارد شده آن را به دست آورد.

در مرحله دوم جهت محاسبه واریوگرام تجربی داده‌های برداشت‌شده از گمانه‌ها و یا داده‌های دارای رخنمون سطحی از رابطه (۵) استفاده شده است (Hassani pak & Sharafoldin, 2002):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 * N(h)} \sum_{k=1}^{N(h)} [Z(p_k) - Z(p_k + h)]^2 \quad (۵)$$

این برنامه پس از محاسبه واریوگرام تجربی بهترین مدل تئوری برازش شده به داده‌های تجربی را از بین مدل‌های تئوری موجود در این برنامه از قبیل گوسی، نمایی، کروی، اثر قطعه‌ای و موجی انتخاب کرده و پارامترهای مدل تئوری برازش شده را برای محاسبات بعدی در حافظه خود ذخیره می‌کند. به‌منظور برازش بهترین مدل تئوری از بین مدل‌های موجود به داده‌های تجربی از روش لونبرگ مارکوارت که در پیوست این مقاله توضیح داده شده است، استفاده شده است. مطابق شکل ۲ فاصله‌ای که واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد، شعاع تأثیر نامیده می‌شود. این امر بدین معنی است که در خارج از شعاع تأثیر، نمونه‌ها دیگر به هم وابسته نمی‌باشند. مقدار واریوگرام پس از آنکه به حد ثابتی رسید به نام حد آستانه‌ای خوانده می‌شود. مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات یعنی به ازای $h=0$ اثر قطعه‌ای نامیده می‌شود (Hassani pak & Sharafoldin, 2002).

کریجینگ نتایج غیرواقعی را در اختیار می‌گذارد زیرا کریجینگ با فرآیند میانگین‌گیری وزن‌دار به کاهش واریانس می‌پردازد. درواقع دستیابی به حداقل پراش تخمین چگالی شکستگی‌ها منجر به هموارسازی مقادیر تخمین‌زده شده می‌شود؛ اما اگر هدف بررسی تغییرپذیری یک متغیر باشد (نه تخمین میانگین آن)، این هموارسازی با کاهش واریانس در مقادیر تخمینی مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. مهم‌ترین خاصیت شبیه‌سازی زمین‌آماری آن است که به‌جای یک تخمین ناریب با حداقل خطا، مجموعه‌ای از مدل‌های ممکن را تولید می‌کند که هر یک از آن‌ها را یک حالت تحقق‌یافته می‌نامند و لذا می‌تواند دامنه‌ای از حالت‌های ممکن را به نمایش بگذارد. دلیل انتخاب روش شبیه‌سازی گوسین متوالی مطالب بیان‌شده است و با اتخاذ این روش می‌توان از طریق شبیه‌سازی‌های مکرر به احتمالات واقع‌بینانه‌تری از رخدادهای تغییر چگالی شکستگی‌ها در هر ریز بلوک دست یافت (Deutsch & Journal, 1998). شرط اساسی در استفاده از روش شبیه‌سازی گوسین متوالی انتقال داده‌های خام اولیه به یک فضای نرمال استاندارد است. شکل ۱ فلوچارت تولید چگالی شکستگی‌ها به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی را نشان می‌دهد.

در اولین مرحله شبیه‌سازی به روش گوسین متوالی، داده‌های اولیه به فضای نرمال استاندارد انتقال داده می‌شوند. فرض کنید Q یک متغیر دلخواه مربوط به داده‌ها با توزیع محلی و U متغیر دلخواه مربوط به همان داده‌ها ولی تبدیل‌شده به توزیع نرمال استاندارد و $F_Q(q)$ و $F_U(u)$ به ترتیب توابع توزیع احتمال تجمعی آنها باشند. چون هر دو تابع توزیع احتمال تجمعی $F_U(u)$ و $F_Q(q)$ بین صفر و یک تغییر می‌کنند پس می‌توان با داشتن یک مقدار خاص از متغیر Q و معلوم بودن احتمال تجمعی آن (مثلاً p) مقدار متغیر U آن را به دست آورد. در حالت کلی چون بین دو تابع توزیع احتمال تجمعی $F_U(u)$ و $F_Q(q)$ همواره رابطه (۱) برقرار است (Deutsch & Journal, 1998):

$$F_U(u_p) = F_Q(q_p) = p, \forall p \in [0,1] \quad (۱)$$

از این رو می‌توان نوشت:

$$q = F_U^{-1}(F_Q(q)) \quad (۲)$$

که در رابطه (۲): u یک مقدار نرمال استاندارد شده از

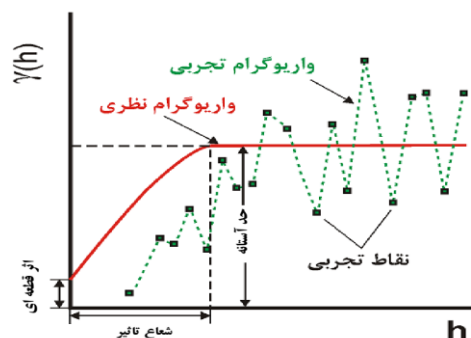
ابتدا و یک انتها دارد. اگر ابتدای این بردار را در مبدأ مختصات قرار دهیم انتهای آن در فضا قرار می گیرد. اگر این کار را برای تمامی نقاط داده های موجود در فضا انجام دهیم ابری از نقاط حول مبدأ مختصات تشکیل می شود. در حالت کلی ابر مورد نظر دارای یک کشیدگی است که جهت ناهمسانگردی را نشان می دهد. برای برازش بیضوی به این ابر می توان از تکنیک مؤلفه های اصلی کمک گرفت. برای این هدف ابتدا باید ماتریس کوواریانس طبق رابطه (۱۰) تشکیل شود (Krige, 1999):

$$R = \begin{bmatrix} \sum c_i x_i^2 & \sum c_i x_i y_i & \sum c_i x_i z_i \\ \sum c_i x_i y_i & \sum c_i y_i^2 & \sum c_i y_i z_i \\ \sum c_i x_i z_i & \sum c_i y_i z_i & \sum c_i z_i^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

مقدار کوواریانس با استفاده از کواریوگرام غیرجهتی برازش شده به داده ها به دست می آید. پس از تشکیل ماتریس فوق مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن محاسبه می شوند.

مشخص کردن وضعیت بیضوی ناهمسانگردی پنجمین مرحله شبیه سازی است و برای این منظور تعیین سه زاویه آزیموت، شیب و میل و همچنین سه دامنه تأثیر بزرگ، متوسط و کوچک ضروری است. بر اساس شکل ۳ موقعیت بیضوی با انجام سه چرخش متوالی صورت می پذیرد (Deutsch & Journel, 1998). در ابتدا و قبل از هر دورانی فرض می شود محور بزرگ بیضوی به موازات محور x ، محور میانی بیضوی به موازات محور y و محور کوچک بیضوی به موازات محور z باشد (شکل ۳-الف). چرخش اول به اندازه α درجه حول محور z (شکل ۳-ب)، چرخش دوم به اندازه β درجه حول محور y (شکل ۳-پ) و چرخش سوم به اندازه θ درجه حول محور x در خلاف جهت عقربه های ساعت انجام می پذیرد (شکل ۳-ت).

حال با مشخص شدن سه راستای اصلی ناهمسانگردی به کمک تکنیک مؤلفه های اصلی باید دامنه تأثیر در هر راستا را به دست آورد. هر چند می توان ادعا کرد که مقادیر ویژه ماتریس R همان دامنه های تأثیر در هر راستا می باشند ولی برای کاهش عدم قطعیت ناشی از محاسبات کواریوگرام، در هر راستای ناهمسانگردی واریوگرام جهتی از داده ها گرفته و مدل سازی می شود. در نهایت شعاع تأثیر



شکل ۲- نمایش واریوگرام تجربی، مدل برازش شده و

پارامترهای مدل تئوری
(Hassani pak & Sharafoldin, 2002)

در مرحله سوم شبیه سازی باید یک مسیر برای شبیه سازی انتخاب شود. اگر فرض شود که ابعاد بلوک اصلی در راستاهای x, y, z به ترتیب X, Y, Z و ابعاد ریزبلوک ها در همین سه راستا به ترتیب $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ باشند، آنگاه تعداد کل ریزبلوک ها از رابطه زیر به دست می آید:

$$N = \frac{X}{\Delta X} * \frac{Y}{\Delta Y} * \frac{Z}{\Delta Z} \quad (6)$$

مسیری که انتخاب می شود باید تمامی این ریزبلوک ها را پیمایش کند و اگر به ریزبلوکی برسد که مقدار آن از ابتدا اندازه گیری نشده بود محاسبات را برای آن بکار گیرد. برای اینکه مشخص شود اشاره گر در کدام یک از این ریز بلوک ها واقع است باید آدرس مربوط به ریزبلوک معین شود. برای این کار اگر مبدأ مختصات محلی را (X_0, Y_0, Z_0) در نظر بگیریم آنگاه آدرس مربوط به ریزبلوکی با موقعیت (x, y, z) از روابط زیر به دست می آید:

$$m = \left[\frac{x - X_0}{\Delta X} \right] \quad (7)$$

$$n = \left[\frac{y - Y_0}{\Delta Y} \right] \quad (8)$$

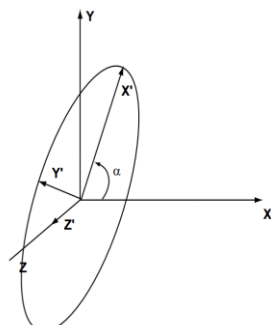
$$r = \left[\frac{z - Z_0}{\Delta Z} \right] \quad (9)$$

در این روابط: علامت $[]$ به جزء صحیح اشاره دارد و اندیس های m, n, r به آدرس یک ریزبلوک خاص اشاره دارند.

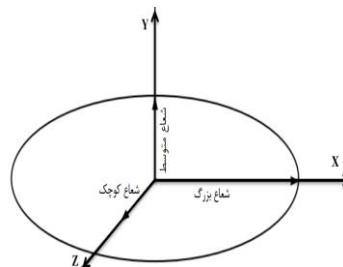
در مرحله چهارم و به منظور بررسی وضعیت ناهمسانگردی از تکنیک مؤلفه های اصلی استفاده شد. در این روش هر دو نقطه که در فضا به فاصله h از هم قرار داشته باشند با برداری به هم وصل می شوند. این بردار یک

در نظر گرفته خواهد شد.

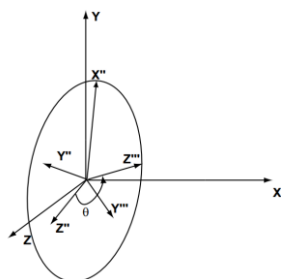
به‌دست‌آمده از مدل برازش شده به داده‌های وارویگرام به‌عنوان دامنه تأثیر یکی از سه راستای اصلی ناهمسانگردی



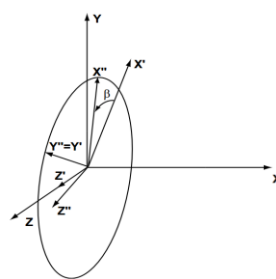
(ب) چرخش اول حول محور Z



(الف) حالت اولیه



(ت) چرخش سوم حول محور X



(پ) چرخش دوم حول محور Y

شکل ۳- مراحل به دست آوردن بیضوی ناهمسانگردی در فضای سه‌بعدی
(Deutsch & Journal, 1998)

مختصات محلی ریزبلوک i ام انتقال داده شوند تا در مرحله بعد مشخص شود چه تعداد از این نقاط باید در تخمین شرکت کنند.

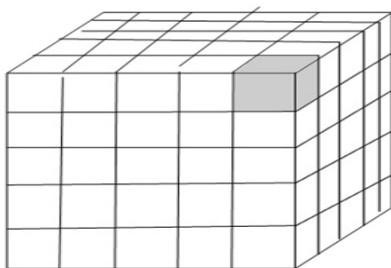
$$\begin{bmatrix} P_x^j \\ P_y^j \\ P_z^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j - x_i^c \\ y_j - y_i^c \\ z_j - z_i^c \end{bmatrix} \quad (11)$$

هر بار که اشاره‌گر به ریزبلوکی برسد که مقدار آن معلوم نیست و باید روش کریجینگ را جهت تخمین بکار گیرد، نیاز است مشخص شود که چه تعداد نقاط در تخمین شرکت می‌کنند. برای این کار ابتدا باید تمامی نقاط شرکت‌کننده در تخمین به مختصات محلی ریزبلوک فعلی

ششمین مرحله شبیه‌سازی انتقال نقاط شرکت‌کننده در تخمین به مختصات محلی هر ریزبلوک است. اگر فرض شود که بلوک اصلی دارای سامانه مختصات متعامد دکارتی جهانی (xyz) و سامانه مختصات متعامد دکارتی محلی ریزبلوک i ام (x'_i, y'_i, z'_i) باشند. آنگاه در طول شبیه‌سازی زمانی که اشاره‌گر به ریزبلوک i ام می‌رسد، باید موقعیت تمامی نقاط نسبت به سامانه محلی ریزبلوک فعلی سنجیده شوند. برای این منظور اگر فرض شود که موقعیت مرکز ریزبلوک i ام که همان مبدأ مختصات محلی ریزبلوک i ام نیز است، (x_i^c, y_i^c, z_i^c) باشد و (x_j, y_j, z_j) موقعیت نقطه j ام از داده‌های درون شبکه باشد آنگاه رابطه (۱۱) برقرار است.

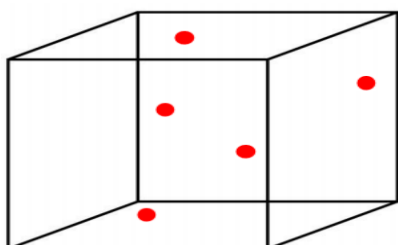
در رابطه (۱۱): زوایای α ، β و θ به ترتیب اشاره به زوایای آزیموت، شیب و میل داشته و P_x^j ، P_y^j و P_z^j نقطه انتقال یافته j ام به مختصات محلی ریزبلوک i ام است. به همین صورت باید تمام j نقطه شرکت‌کننده در تخمین به

شکل ۴- الف، ریزبلوک‌هایی را نشان می‌دهد که می‌تواند هدف تخمین قرار گیرد. در شکل ۴- ب موقعیت فرضی مرکز چند شکستگی در یک ریزبلوک خاص نمایش داده شده است.



الف) تقسیم‌بندی یک محدوده خاص به ریزبلوک‌های کوچک‌تر

جهت تخمین



ب) نمایش مرکز یک شکستگی در یک ریزبلوک خاص

شکل ۴- شماتیک ریزبلوک‌ها و مرکز چند شکستگی فرضی

در ابتدای شبیه‌سازی برنامه مسیری برای ردیابی ریزبلوک‌ها انتخاب می‌کند. وضعیت بیضوی ناهمسانگردی نیز برای داده‌های چگالی شکستگی‌های منطقه مورد بررسی مشخص می‌شود. اگر اشاره‌گر مربوط به ردیابی ریزبلوک‌ها به ریزبلوکی رسید که مقدار آن مجهول باشد مرکز بیضوی بر روی مرکز ریزبلوک منطبق می‌شود تا تعداد نقاطی که درون بیضوی می‌افتند، تعیین شود. این که کدام نقاط (داده) و چه تعداد نقطه در تخمین این نقطه مجهول شرکت می‌کنند را وضعیت بیضوی ناهمسانگردی مشخص می‌کند. حال با مشخص شدن تعداد نقاط شرکت‌کننده در تخمین، موقعیت مکانی هر کدام از این نقاط و نیز مقدار داده چگالی شکستگی برای این نقاط، محاسبات کریجینگ برای آن نقطه مجهول به کار گرفته می‌شود. همان گونه که در پیوست این مقاله اشاره شده است، مبنای روش کریجینگ به گونه‌ای است که تأثیر یا وزنی که هر یک از این نقاط با مقدار داده معلوم بر روی این نقطه مجهول می‌گذارند را هدف تخمین

انتقال یابند که برای این منظور از روشی که در مرحله قبل توضیح داده شد استفاده می‌شود و در نهایت با معادله شرطی زیر مشخص خواهد شد که کدام یک از این نقاط در محاسبه شرکت می‌کنند:

$$\frac{4 * x_j^2}{r_{max}^2} + \frac{4 * y_j^2}{r_{mean}^2} + \frac{4 * z_j^2}{r_{min}^2} \leq 1 \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا r_{min} و r_{mean} و r_{max} به ترتیب طول بزرگ، متوسط و کوچک بیضوی ناهمسانگردی می‌باشند. در واقع همان شعاع‌های تأثیر بزرگ، متوسط و کوچک می‌باشند که از واریوگرام‌های جهتی در سه راستای اصلی ناهمسانگردی حاصل شده‌اند.

زمانی که اشاره‌گر به ریزبلوکی رسید که چگالی آن از ابتدا اندازه‌گیری نشده باشد، مقدار آن را با روش کریجینگ محاسبه کرده و به آن ریزبلوک نسبت می‌دهد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تمامی ریزبلوک‌هایی که چگالی آنها محاسبه نشده بود دارای مقدار شوند. همچنین این مقدار انتخاب شده به جمع داده‌های اولیه اضافه می‌شوند و از این پس این داده به عنوان یک داده سخت تلقی می‌شود. این کار باعث می‌شود احتمال شرکت کردن نقاط بیشتر جهت تخمین ریزبلوک‌های بعدی افزایش یابد.

اما همان گونه که قبلاً بیان شد و در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، تمام مراحل قبل برای همه‌ی آرایش‌های مربوط به شبیه‌سازی گوسین متوالی تکرار می‌شود و سرانجام میانگین این آرایش‌ها برای محاسبات بعدی در نظر گرفته خواهد شد. در نهایت همه‌ی مقادیر چگالی محاسبه شده برای ریزبلوک‌ها از فضای نرمال استاندارد به توزیع اولیه خود برگردانده می‌شوند.

وقتی از روش کریجینگ برای انجام محاسبات استفاده می‌شود، باید منطقه مورد مطالعه به ریزبلوک‌های کوچک‌تری تقسیم شود تا محاسبات در این ریزبلوک‌ها صورت گیرد. به منظور درک بهتر این مسئله این وضعیت به طور شماتیک در شکل ۴، نشان داده شده است.

با مشخص شدن ابعاد ریزبلوک‌ها، منطقه مورد بررسی به تعداد مشخصی ریزبلوک تقسیم می‌شود. متناسب با موقعیت داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، مقدار چگالی شکستگی‌ها در برخی از این ریزبلوک‌ها معلوم (بر اساس داده‌های موجود) و در برخی دیگر مجهول است.

قرار می‌دهد.

مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها متفاوت عمل می‌کند این است که مقدار تخمین‌زده‌شده در هر نقطه مجهول به داده‌های پیشین اضافه نمی‌شود.

برای تخمین زمین‌آماری هر یک از مؤلفه‌های جهت‌داری اگر فرض شود که تعداد شکستگی‌ها تخمین‌زده‌شده در ریز بلوک m برابر N باشد آنگاه پس از معین شدن موقعیت هر کدام از این شکستگی‌ها در فضای ریز بلوک m ، می‌توان مؤلفه‌های جهت‌داری آن‌ها را تخمین زد. برای این کار ابتدا باید داده‌های اولیه هر کدام از مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها را به فضای نرمال استاندارد انتقال داد تا محاسبات در چنین فضایی صورت پذیرد (شکل ۱). به‌منظور محاسبه واریوگرام تجربی داده‌ها از رابطه (۵) و جهت برازش بهترین مدل ثئوری به آن‌ها از روش لونبرگ مارکوارت (پیوست) استفاده شد. حال برنامه با محاسبه کواریوگرام غیرجهتی سه‌بعدی از داده‌ها و بکار گرفتن تکنیک مؤلفه‌های اصلی (رابطه (۱۰))، راستاهای اصلی ناهمسانگردی را تشخیص داده و در این راستاها واریوگرام جهتی انجام می‌پذیرد. با معلوم شدن راستاهای اصلی ناهمسانگردی و همچنین شعاع‌های تأثیر در هر راستا وضعیت بیضوی ناهمسانگردی مشخص می‌شود. در نهایت با به‌کارگیری روش کریجینگ معمولی (پیوست) مقدار شیب و جهت‌شیب برای شکستگی n ام موجود در ریزبلوک m ام تخمین زده می‌شود.

۳-۳- تولید شعاع شکستگی‌ها

انتخاب طول شکستگی‌ها یک مسئله مهم است چراکه یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت هدایت هیدرولیکی آن‌ها است. در واقع مسافتی که سیالات اعم از آب، نفت و گاز باید بین فصل مشترک شکستگی‌ها طی کنند، از طول شکستگی‌ها تأثیر می‌پذیرد. آنچه مسلم است این است که شکستگی‌هایی با طول بیشتر، توانایی حمل میزان بیشتری سیال را خواهند داشت. برای شکستگی‌هایی با طول زیاد که بتوانند به صورتی مستقیم و یا حتی غیرمستقیم، راه سیالات را به درون حفریات زیرزمینی باز نمایند باید شبیه‌سازی‌هایی با دقت زیادتر از حد معمول و با وسواس انجام شود.

در این مقاله طول تمام شکستگی‌ها با هم برابر و مشابه هم است. دو روش در برنامه ارائه‌شده برای انتخاب

پس از اتمام محاسبات توزیع سه‌بعدی چگالی شکستگی‌ها با استفاده از شبیه‌سازی گوسین متوالی، شبیه‌سازی می‌شود. پس از محاسبات در هر ریزبلوک به تعداد تخمینی، شکستگی تولید و موقعیت مرکز آن‌ها با فرآیند پواسون مشخص می‌شود (Joolaei & Baghbanan, 2013).

۳-۲- تعیین مؤلفه‌های جهت‌یافتگی

یک پدیده زمین‌شناسی مشترک وجود دارد که در آن شکستگی‌های با جهت‌داری مشابه می‌توانند در یک گروه قرار گیرند. همچنین موقعیت شکستگی‌های با جهت‌داری مشابه نزدیک به هم است و تحت تنش‌های فشاری بالا با الگوهای خاصی از لحاظ جهت‌داری شکل می‌گیرند. این بدین معنی است که جهت‌داری شکستگی‌ها به صورت تصادفی توزیع نمی‌شود و از ساختار فضایی خاصی تبعیت می‌کنند (Koike, Liu & Sanga, 2012) و (Koike, et al., 2015).

جهت‌یافتگی شکستگی‌ها دارای دو مؤلفه جهت‌شیب و زاویه شیب می‌باشند. برای تولید هر دو مؤلفه جهت‌یافتگی در کد توسعه داده شده از روش‌های زمین‌آماری استفاده گردید. چون در اینجا هدف بررسی شدت تغییرپذیری مؤلفه‌های جهت‌یافتگی نیست و تخمین مقدار میانگین مؤلفه‌های جهت‌یافتگی در یک فضای معینی که ریزبلوک نامیده می‌شود، مدنظر است، به‌طور مستقیم از روش کریجینگ استفاده شد.

روند انجام محاسبات به‌منظور تخمین مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها مشابه محاسبات چگالی شکستگی‌ها است (شکل ۱)، ولی در چند مرحله از شبیه‌سازی متفاوت عمل می‌شود. در مرحله اول به‌جای اینکه مرکز ریزبلوک هدف تخمین قرار گیرد، مرکز شکستگی که موقعیت آن در هر ریزبلوک با فرآیند پواسون مشخص شده لحاظ می‌شود. در مرحله دوم و همان‌گونه که قبلاً نیز بحث شد، برنامه همان مقداری که روش کریجینگ معمولی تخمین می‌زند را به‌عنوان مقدار نهایی در نظر می‌گیرد و مانند محاسبات چگالی شکستگی‌ها از توزیع محلی ایجادشده اطراف آن نقطه مجهول (مرکز شکستگی) استفاده نمی‌کند. اما مرحله سوم و آخرین مرحله‌ای که برنامه به‌منظور محاسبه

می‌شود. پارامتر دیگر که جهت مدل‌سازی متوازی‌الاضلاع نیاز است زوایای داخلی شکستگی است به همین سبب کاربر می‌بایست زاویه تند داخلی را ارائه نماید، اما از آنجا که تعیین این زاویه از روی داده‌های صحرایی مشکل و همراه با خطاست، در برنامه زاویه نود درجه به‌صورت پیش‌فرض قرار داده می‌شود. در تولید نقاط این متوازی‌الاضلاع فرض دیگری نیز می‌شود، از جمله اینکه قاعده متوازی‌الاضلاع در راستای شکستگی قرار داده می‌شود.

۳-۵- فلوچارت برنامه توسعه داده شده

برنامه توسعه داده شده ابتدا داده‌های مورد نیاز خود را به‌عنوان ورودی از کاربر دریافت می‌کند. این داده‌ها شامل یک مختصات محلی خاص، ابعاد ریزبلوک‌ها، تعداد دسته درزه‌ها، داده‌های چگالی و مؤلفه‌های جهت‌داری هر دسته و شکل شکستگی‌های هر دسته می‌باشند. لازم به ذکر است که داده‌های چگالی و مؤلفه‌های جهت‌داری باید دارای موقعیت هر داده در فضای سه‌بعدی و مقدار متغیر مورد نظر در موقعیت مذکور باشند. سپس به روش شبیه‌سازی گوسین متوالی تعداد شکستگی‌های موجود در هر ریزبلوک تخمین زده می‌شود. با مشخص شدن تعداد شکستگی‌ها در یک ریزبلوک خاص باید مرکزشان با به‌کارگیری روش پواسون در هر ریزبلوک تعیین شود. حال در این مرحله مؤلفه‌های جهت‌یافتگی هر شکستگی موجود در این ریزبلوک به روش زمین‌آمار تخمین زده می‌شوند. در این هنگام برنامه از کاربر سؤال می‌کند که شکل شکستگی او دیسکی یا چهارضلعی است. اگر شکل شکستگی دیسکی بود شعاع آن محاسبه می‌شود. سپس تا آخرین شکستگی درون این ریزبلوک خاص محاسبات ادامه پیدا می‌کند و با اتمام آن‌ها به سراغ ریزبلوک بعدی می‌رود. در غیر این صورت با مشخص بودن تعداد اضلاع و زوایای داخلی، مختصات رئوس چهارضلعی تعیین می‌شود و تا تولید آخرین شکستگی محاسبات ادامه می‌یابد. فلوچارت برنامه تولید شبکه شکستگی به روش زمین‌آمار در شکل ۵، آورده شده است.

۴- بررسی مدل‌سازی شکستگی‌ها در منطقه

۴-۱- منطقه مورد مطالعه

به‌منظور مطالعه موردی از کد *GFracIUT* داده‌های ۴ گمانه برداشت شد. منطقه مورد بررسی بخشی از میدان

طول شکستگی‌ها وجود دارد. روش اول که پیش‌فرض خود برنامه است، قطر شکستگی را برابر قطر بزرگ ریزبلوک می‌گیرد. این روش زمانی به کار گرفته می‌شود که کاربر اطلاعاتی دقیقی در مورد طول شکستگی‌های منطقه نداشته باشد.

روش دوم این است که کاربر یک طول را به‌عنوان قطر شکستگی به برنامه بدهد. برنامه نیز این طول را به‌عنوان قطر شکستگی‌ها در نظر می‌گیرد.

۳-۴- تولید ابعاد، مساحت و مرزهای شکستگی‌ها

در مدل‌سازی سه‌بعدی شبکه شکستگی نیاز به محاسبه مساحت، ابعاد و رئوس شکستگی داریم که امری بسیار مشکل است. به‌طورکلی شکل و اندازه به عبارتی ابعاد و مرزهای شکستگی مشکل‌ترین پارامترهای هندسی شکستگی‌ها در مدل‌سازی هستند. زیرا روش معتبر و مستقیمی جهت تعیین آنها، حتی با فرضیات زیاد هم وجود ندارد. در عمل شکل شکستگی‌ها پیچیده است ولی با تقریب‌زنی می‌توان برخی اشکال هندسی از قبیل دایره، بیضوی و مربع یا مستطیل را بر آن برازش کرد.

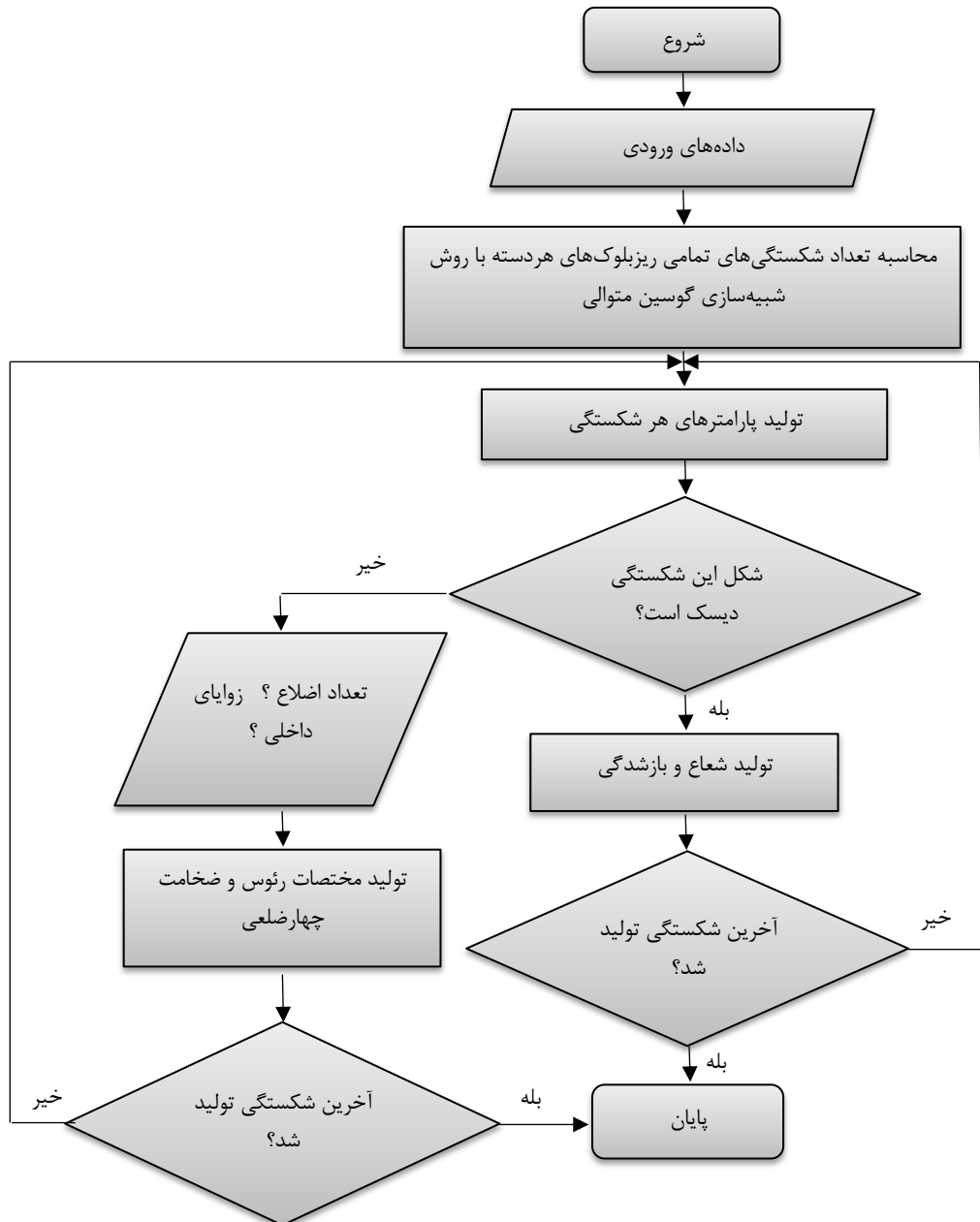
در برنامه توسعه داده شده شکستگی‌ها به دو شکل مدل می‌شوند. روش اول مدل دیسکی یا به عبارتی دایره‌ای شکل و روش دوم مدل متوازی‌الاضلاع اعم از مربع و لوزی یا مستطیل است.

در هر دو مدل دایره و متوازی‌الاضلاع، جهت تولید به برخی پارامترها نیاز است. در مدل متوازی‌الاضلاع برای تولید رئوس آن نیاز به داشتن مساحت شکستگی است که می‌توان با داشتن طول هر شکستگی و محاسبه مساحت آن در مدل دایروی این مساحت به‌دست‌آمده را برابر مساحت در حالت متوازی‌الاضلاع قرار داد.

اما در مدل متوازی‌الاضلاع پس از اینکه مساحت از روی مدل دوار محاسبه شد می‌توان با برابر نهادن مساحت با مدل متوازی‌الاضلاع قاعده و ارتفاع آن را محاسبه کرد. که در این مورد کاربر باید نسبت تقریبی بین قاعده و ارتفاع متوازی‌الاضلاع شکستگی را ارائه کند در مواقعی که کاربر اطلاعاتی از نسبت ارتفاع به قاعده متوازی‌الاضلاع نداشته باشد و یا اینکه محاسبه آن برایش پر خطا و غیرممکن باشد، به‌صورت پیش‌فرض از نسبت طلایی (۱٫۶۱۸) استفاده

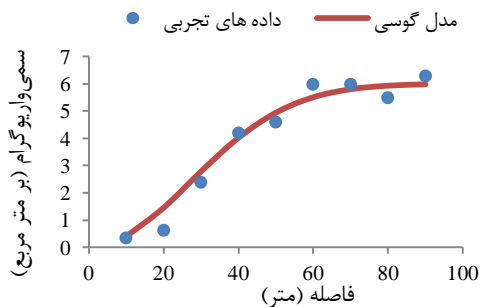
و عرض ۶ تا ۱۵ کیلومتر است. شکل ۶-الف ترتیب قرارگیری و موقعیت گمانه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که داده‌های برداشت‌شده مربوط به منطقه‌ای به وسعت 1000×1000 مترمربع و اعماق بین ۲۵۰۰ تا ۲۶۰۰ متر می‌باشند.

نفی گچساران است که در فاصله ۲۲۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز قرار گرفته و شامل سازندهای شکاف‌دار کربناتی آسماری و بنگستان بوده که در جهت عمومی شمال غربی- جنوب شرقی طاق‌دیس‌های میداین نفتی جنوب ایران واقع شده است. این میدان طاق‌دیزی به طول حدود ۷۰ کیلومتر



شکل ۵- فلوچارت تولید شکستگی‌ها به منظور ساخت مدل هندسی با GFractIUT

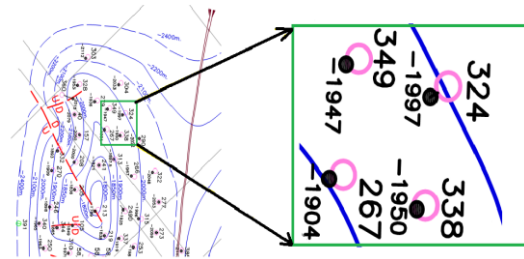
راستای گمانه‌ها محاسبه گردید. انتخاب این واحد طول بسیار بااهمیت است چراکه بر روی نتایج مدل‌سازی واریوگرام تجربی داده‌ها تأثیرگذار است. روش انتخاب واحد طول بهینه به این صورت است که ابتدا باید تابع توزیع چگالی شکستگی‌ها را برای واحد طول‌های گوناگون به دست آورده و آن‌ها را با افزایش واحد طول با هم مقایسه کرد. زمانی که تابع توزیع به ازای یک واحد طول مشخصی تغییر کرد، روند افزایش واحد طول متوقف می‌شود. آخرین واحد طولی که به ازای آن تابع توزیع برازش شده به داده‌ها تغییر نکرد را به‌عنوان واحد طول بهینه انتخاب می‌کنیم. پس از محاسبات ذکرشده واحد طول بهینه برای داده چگالی شکستگی‌های برگرفته‌شده از گمانه‌ها ۱۰ متر انتخاب گردید. شکل ۷، نمودار تغییرات واریوگرام بافاصله را برای چگالی شکستگی‌های دسته درزه دوم به تصویر می‌کشد.



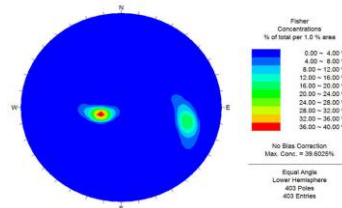
شکل ۷- نتایج تغییرات واریوگرام بافاصله برای چگالی شکستگی‌های دسته درزه دوم و مدل تئوری برازش شده

جدول ۲، نتایج واریوگرافی و مدل‌سازی برای داده‌های چگالی شکستگی‌ها در راستای گمانه‌ها را برای دو دسته درزه نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳، نتایج واریوگرافی و مدل‌سازی داده‌های چگالی شکستگی‌ها در سه راستای اصلی ناهمسانگردی را نشان می‌دهد.

برای هر دسته درزه سه شعاع تأثیر که معرف بیضوی ناهمسانگردی می‌باشند، به همراه مدل واریوگرام داده‌ها و پارامترهای مدل برای محاسبات کریجینگ ذخیره می‌شوند. محاسبات چگالی شکستگی‌ها با استفاده از شبیه‌سازی گوسین متوالی درون ریزیلوکی‌هایی به ابعاد 50×50 مترمربع در راستای افقی و ۱۰ متر در راستای قائم انجام شد. پارامترهای مختلفی بر انتخاب بهینه این ابعاد تأثیر



الف) ترتیب قرارگیری و موقعیت گمانه‌های مورد بررسی



ب) نمایش تقسیم‌بندی شکستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه

شکل ۶- منطقه مورد مطالعه

شکل ۶- ب نتایج دسته‌بندی شکستگی‌های برداشت‌شده از داده‌های گمانه‌ای مورد بررسی را نشان می‌دهد. همچنان که از این شکل برمی‌آید شکستگی‌ها به دو دسته کلی از لحاظ جهت‌داری تقسیم‌بندی می‌شوند. پردازش بر روی داده‌های اولیه چگالی، مقدار شیب و جهت‌شیب این دو دسته درزه صورت گرفت و نتایج آن در جدول ۱، آورده شد.

جدول ۱- نتایج مربوط به پارامترهای مدل توزیع برازش شده به داده‌های تجربی برگرفته از گمانه‌ها برای دودسته درزه

دسته درزه	خصوصیت درزه	مدل توزیع	میانگین	واریانس
۱	چگالی	نرمال	۶,۳۷	۲,۴۱
	جهت‌شیب	نرمال	۶۹,۵۹	۶۶,۲۱
۲	شیب	نرمال	۲۵,۱۳	۷۰,۷۱
	چگالی	نرمال	۴,۶۹	۱,۵۹
۳	جهت‌شیب	لاگ‌نرمال	۵,۶۴	۰,۰۲۴۲
	شیب	نرمال	۶۸,۵	۳۹,۴۹

۴-۲- واریوگرافی و مدل‌سازی داده‌های چگالی و

مؤلفه‌های جهت‌داری

داده‌های چگالی شکستگی‌ها از طریق تعداد بر واحد طول در

ریزبلوک‌ها تغییرات واریانس تخمین با حجم ریزبلوک‌ها است. در حالت کلی هرچه تعداد ریزبلوک‌ها بیشتر و به عبارتی حجم ریزبلوک‌ها کمتر شود باید واریانس تخمین کمتر گردد. به منظور بررسی پارامتر اخیر تغییرات واریانس چگالی شکستگی‌ها با افزایش حجم ریزبلوک‌ها محاسبه و نتایج آن در شکل ۸، آورده شد.

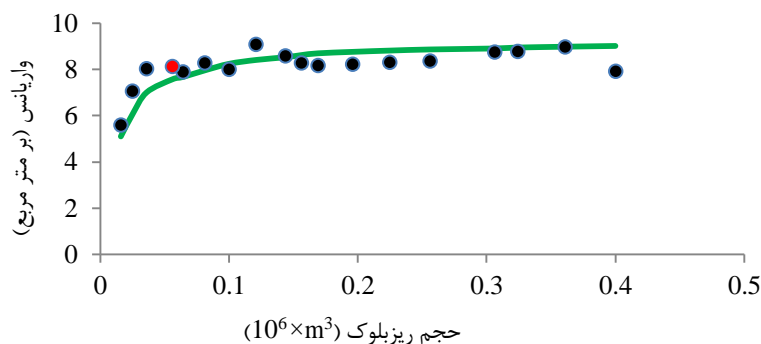
می‌گذارند. از جمله این پارامترها فاصله گمانه‌ها از هم و واحد طولی می‌باشد که چگالی شکستگی‌ها در آن برداشت شده است (Koike, et al., 2015). این دو پارامتر به ترتیب بر روی انتخاب ابعاد شبکه سلولی در دو راستای x و y (صفحه افقی) و در راستای محور z (راستای قائم) تأثیر می‌گذارند. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر ابعاد

جدول ۲- نتایج مدل‌سازی واریوگرام داده‌های چگالی شکستگی‌ها برای دو دسته درزه

دسته درزه	اثر قطعه‌ای	شعاع تأثیر (متر)	حد آستانه	مدل تئوری برازش شده به داده‌ها
۱	$5,149 \times 10^{-8}$	۵۴,۸۳	۶,۲۱۰,۳	گوسین
۲	$8,54 \times 10^{-2}$	۴۸,۲۷	۵,۰۰۰,۷	گوسین

جدول ۳- نتایج واریوگرافی و مدل‌سازی داده‌های چگالی شکستگی‌ها در سه راستای اصلی

دسته درزه	اثر قطعه‌ای	شعاع تأثیر (متر)	حد آستانه	مدل تئوری برازش شده به داده‌ها
۱	۱,۰۹۰,۳	۵۴۹,۷۵	۵,۰۵	موجی
	۰,۶۶۵۱	۵۴۹,۷۵	۵,۵۸	موجی
	$1,48 \times 10^{-8}$	۷۰,۳۳	۷,۲۵	گوسین
۲	۱,۰۵۳۹	۵۴۹,۷۵	۴,۳۳	موجی
	۰,۶۹۸۵	۵۴۹,۷۵	۳,۴۱	موجی
	$5,36 \times 10^{-7}$	۶۰,۹۲۴	۴,۹۲	گوسین

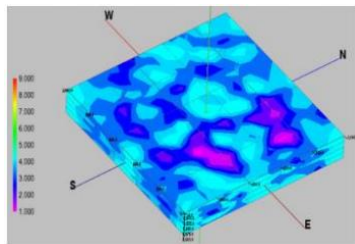


شکل ۸- چگونگی تغییرات واریانس چگالی شکستگی‌ها با افزایش حجم ریزبلوک‌ها

حجم ریزبلوک‌ها دارد. بنابراین نقطه قرمز رنگ بر روی شکل نماینده حجم ریزبلوکی است که می‌تواند بر روی ابعاد بهینه ریزبلوک‌ها تأثیر بسزایی بگذارد. همان‌طور که قبلاً بیان شد واحد طول انتخاب‌شده برای برداشت چگالی شکستگی‌ها ۱۰ متر است، بنابراین ابعاد ریزبلوک‌ها در راستای محور z ، ۱۰

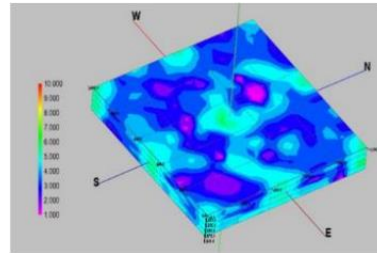
همچنان که شکل ۸ نشان می‌دهد واریانس تخمین با افزایش حجم ریزبلوک‌ها افزایش می‌یابد. اما این افزایش واریانس در موقعیتی بر روی شکل که با رنگ قرمز مشخص شده تقریباً متوقف می‌شود و از این نقطه به بعد دچار تغییر شدید نمی‌شود و یک روند تقریباً ثابت با افزایش

شکستگی‌ها انتخاب شد. شکل‌های ۹- الف و ۹- ب به ترتیب مدل میانگین برای تمام آرایش‌های مربوط به دسته درزه اول و دوم را نشان می‌دهد. از مدل میانگین در شکل ۹- الف می‌توان نتیجه گرفت که چگالی شکستگی‌ها در دسته درزه اول در نواحی سطحی دچار دامنه تغییرات زیادی می‌شود. بررسی نتایج در شکل ۹- ب نشان می‌دهد که چگالی شکستگی‌ها در دسته درزه دوم در نیمه‌ی غربی نسبت به نیمه‌ی شرقی بیشتر است.



ب) دسته درزه دوم

متر اتخاذ شد. همان‌گونه که در شکل ۶، مشخص است فاصله گمانه‌ها در دو راستای x و y تقریباً با هم برابرند. بنابراین ابعاد ریزبلوک‌ها در این دو راستا یکسان انتخاب شد. در نهایت با بررسی تأثیر پارامتر سوم یعنی تغییرات واریانس با حجم ریزبلوک‌ها (نقطه قرمز رنگ بر روی شکل ۸) طول ریزبلوک‌ها در دو راستای x و y ۵۰ متر انتخاب شد. محاسبات شبیه‌سازی گوسین متوالی برای ۲۰ آرایش مختلف تکرار و مدل میانگین آن‌ها به‌عنوان نقشه چگالی



الف) دسته درزه اول

شکل ۹- مدل میانگین چگالی شکستگی‌های شبیه‌سازی شده برای تمام آرایش‌های مربوط به دو دسته درزه

می‌شوند. شعاع همه‌ی این شکستگی‌ها با هم برابر و معادل ۱۰ متر در نظر گرفته شد. به‌منظور تفکیک و نمایش گرافیکی بهتر، پس از تولید، شکستگی‌ها به بازه‌های کوچک‌تری از لحاظ جهت‌داری تقسیم‌بندی و با رنگ‌های مختلف نمایش داده شد. شکل‌های ۱۰- الف و ۱۰- ب به ترتیب نمونه‌ای از مدل‌سازی شبکه شکستگی‌های چهارضلعی و دیسک دوار را برای محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهند. شکل ۱۰- پ یک مدل سه‌بعدی محدود را برای محدوده‌ای به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ مترمکعب و مختصات محلی (۰ و ۴۵۰ و ۴۵۰) نشان می‌دهد. شکل ۱۰- ت، یک مقطع دوطرفه از مدل سه‌بعدی شکستگی‌های دیسکی شکل را نشان می‌دهد. ابعاد این مقطع 200×200 مترمربع بوده و به‌موازات صفحه مقطع زده شده است.

به‌منظور بررسی رفتار فضایی مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها، واریوگرام تجربی داده‌های شیب و جهت‌شیب برای دو دسته درزه در راستای گمانه‌ها محاسبه و مدل‌سازی شد. همچنین بهترین مدل تئوری برازش شده و پارامترهای آن برای داده‌های شیب و جهت‌شیب دو دسته درزه انتخاب و نتایج آن در جدول ۴، آورده شد. جدول ۵، نتایج واریوگرافی و مدل‌سازی داده‌های جهت‌داری شکستگی‌ها در سه راستای اصلی ناهمسانگردی را نشان می‌دهد. برای هر دسته درزه سه شعاع تأثیر، مدل تئوری برازش شده به داده‌های مؤلفه‌های جهت‌داری و پارامترهای مدل برای محاسبات بعدی در حافظه برنامه ذخیره می‌شوند.

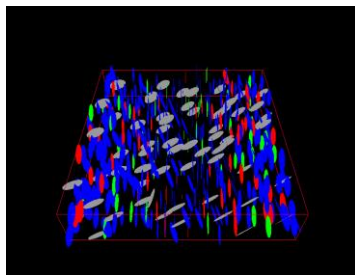
شکستگی‌های تولیدشده با *GFracIUT*، با دو شکل مختلف هندسی از قبیل دیسک دوار و چهارضلعی مدل

جدول ۴- نتایج مدل‌سازی واریوگرام داده‌های جهت‌داری شکستگی‌ها

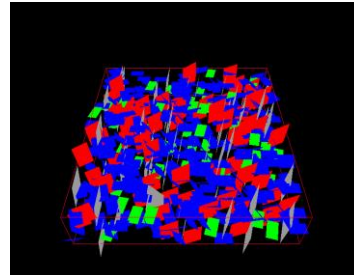
مؤلفه جهت‌داری	دسته درزه	اثر قطعه‌ای	حد آستانه‌ای	شعاع تأثیر (متر)	مدل تئوری برازش شده به داده‌ها
جهت‌شیب	۱	1.1×10^{-7}	۶۷	۵۷،۳۲	گوسین
	۲	2.1×10^{-7}	۵۳	۵۲،۶۷	گوسین
شیب	۱	2.9×10^{-7}	۵۶۳	۵۰،۶۷	گوسین
	۲	7.3×10^{-8}	۵۰۰	۵۳،۹۶	گوسین

جدول ۵- نتایج واریوگرافی و مدل‌سازی داده‌های مؤلفه‌های جهت‌داری شکستگی‌ها در سه راستای اصلی

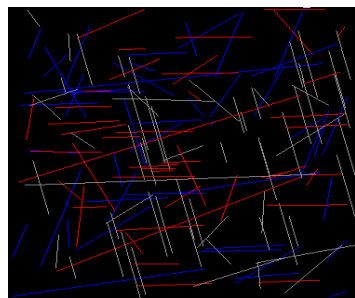
مؤلفه جهت‌داری	دسته درزه	اثر قطعه‌ای	شعاع تأثیر(متر)	حد آستانه‌ای	مدل تئوری برازش شده به داده‌ها
جهت‌شیب	۱	۱٫۰۵	۸۹۴٫۴۳	۱٫۶۵	توانی
		۰٫۴۵	۸۵۴	۳٫۷	موجی
		۰٫۵۵	۸۰۳٫۰۶	۴٫۴۶	موجی
	۲	۱٫۱	۸۵۰	۱٫۷۳	کروی
		۰٫۴۱	۸۰۳٫۰۶	۲٫۶	موجی
		۰٫۵۸	۸۰۳٫۰۶	۴٫۰	موجی
شیب	۱	۱٫۱	۹۱۲٫۴	۱٫۷	توانی
		۰٫۴۳	۸۰۳٫۰۶	۴٫۵	موجی
		۰٫۴۲	۸۰۳٫۰۶	۴٫۵	موجی
	۲	۱٫۱۴	۸۷۵٫۱۳	۱٫۶۷	کروی
		۰٫۵۶	۸۰۳٫۰۶	۳٫۴۸	موجی
		۰٫۳۱۳	۷۳۹٫۱۶	۱٫۳۶	موجی



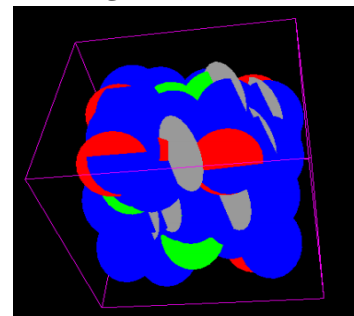
ب) مدل دیسکی



الف) مدل چهارضلعی



ت) مقطع دوبعدی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ مترمربع و به موازات صفحه افقی

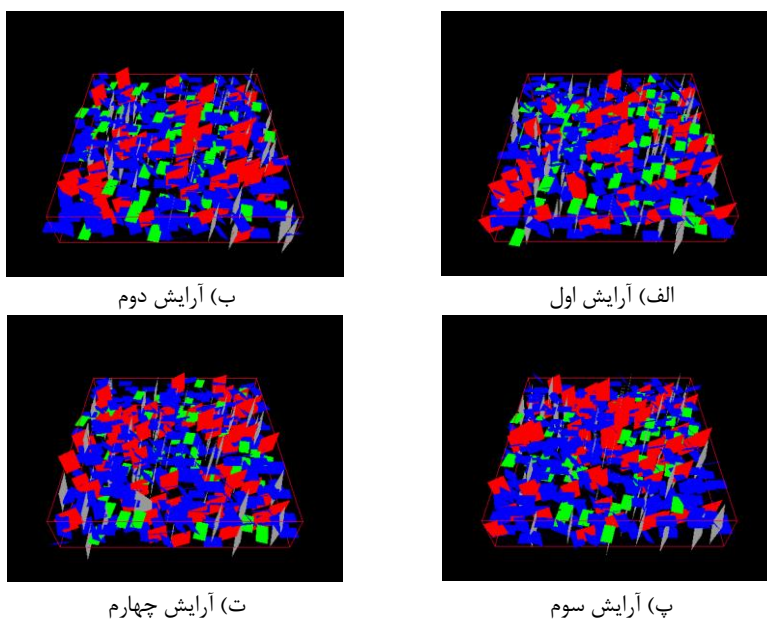


پ) محدوده‌ای به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ مترمکعب

شکل ۱۰- مدل شبکه شکستگی‌های تولیدشده با *GFracIUT*

شبکه شکستگی را برای چهار آرایش مختلف نمایش می‌دهد.

در این برنامه این امکان دیده شده که کاربر بتواند چندین حالت ممکن از شبکه شکستگی مجزا را با ایجاد آرایش‌های گوناگون تولید کند. شکل ۱۱ مدل چهارضلعی



شکل ۱۱- نمایش چهار آرایش مختلف از شبکه شکستگی‌ها مدل چهارضلعی

مقایسه نتایج اولیه با شبیه‌سازی‌شده از میانگین جذر مجموع مربعات خطای سه پارامتر اثر قطعه‌ای، شعاع تأثیر و حد آستانه‌ای استفاده شد. فرض کنید E_r ، E_s و E_n به ترتیب خطای شعاع تأثیر، حد آستانه‌ای و اثر قطعه‌ای باشند. آنگاه خطای کل از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$E_{total} = \frac{\sqrt{E_r^2 + E_s^2 + E_n^2}}{3} \quad (13)$$

لازم به ذکر است که هر یک از این سه خطا نیز جداگانه محاسبه می‌شوند. برای مثال E_r از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$E_r = \frac{|r_{in} - r_{si}|}{r_{in}} \quad (14)$$

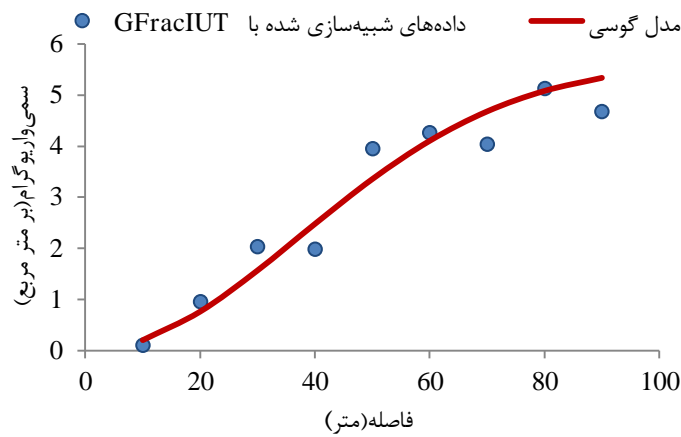
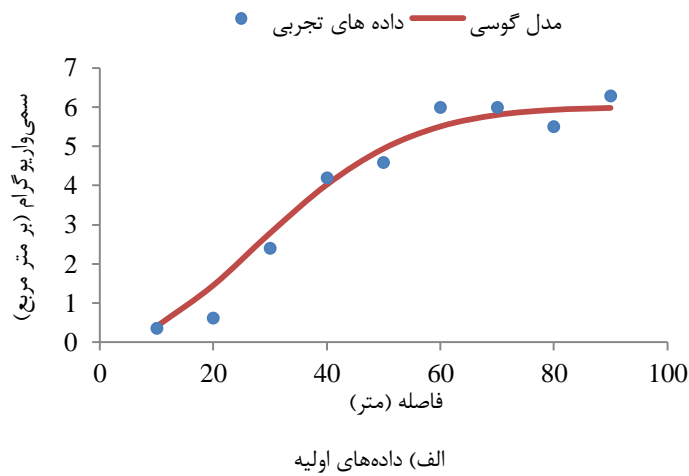
در رابطه (۱۴) r_{in} و r_{si} به ترتیب شعاع تأثیر اولیه و شبیه‌سازی‌شده با روش پیشنهادی می‌باشند. همچنین | | اشاره به علامت قدرمطلق دارد. با توجه به جدول ۶ خطای چگالی شکستگی‌ها با روش پیشنهادی برای دسته درزه اول و دوم به ترتیب ۱۰/۷۱ و ۷/۶۱ است. خطای ایجادشده با روش پیشنهادی برای جهت‌شیب شکستگی‌های دسته درزه اول بیشتر از دسته درزه دوم است (جدول ۷). همچنین با توجه به جدول ۸ خطای شیب شکستگی‌ها با روش پیشنهادی برای دسته درزه اول بیشتر از دسته درزه دوم است.

۵- اعتبارسنجی متقابل نتایج مدل‌سازی

به‌منظور بررسی صحت نتایج مدل پیشنهادی و با توجه به حجم محدود داده‌های سایت در ادامه دو روش ارائه می‌گردد.

۵-۱- اعتبارسنجی مدل DFN مورد مطالعاتی

روش اول بررسی میزان تطابق توزیع فضایی داده‌های DFN ساخته‌شده به‌واسطه روش پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری شده است. برای این منظور ابتدا وارپوگرافی از داده‌های DFN تولیدشده گرفته شد. سپس با برازش بهترین مدل تئوری به داده‌ها، پارامترهای مدل استخراج شد. این پارامترها که شامل شعاع تأثیر، حد آستانه و اثر قطعه‌ای می‌باشند، با مقادیر اولیه مقایسه شد. شکل ۱۲ نتایج وارپوگرام چگالی شکستگی‌های دسته درزه دوم برای داده‌های اولیه و شبیه‌سازی‌شده با روش پیشنهادی را به تصویر می‌کشد. با توجه به شکل ۱۲ مدل تئوری برازش شده به داده‌های اولیه و شبیه‌سازی‌شده گوسی است. اما به‌منظور مقایسه پارامترهای مدل تئوری برازش شده به داده‌های اولیه و شبیه‌سازی‌شده برای مؤلفه‌های چگالی، شیب و جهت‌شیب شکستگی‌های هر دو دسته درزه، نتایج به ترتیب در جدول ۶، جدول ۷ و جدول ۸ آورده شد. مطابق جدول ۶، جدول ۷ و جدول ۸ و به‌منظور



شکل ۱۲- واریوگرام چگالی شکستگی‌های دسته درزه دوم

جدول ۶- نتایج مدل‌سازی واریوگرام چگالی شکستگی‌های دو دسته درزه برای داده‌های اولیه و شبیه‌سازی شده با *GFractIUT*

دسته درزه	داده‌ها	اثر قطعه‌ای	شعاع تأثیر (متر)	حد آستانه‌ای	میانگین جذر مجموع مربعات خطای سه پارامتر (درصد)
۱	اولیه	$5,149 \times 10^{-8}$	۵۴,۸۳	۶,۲۱۰,۳	۱۰,۷۱
	شبیه‌سازی شده با <i>GFractIUT</i>	$6,68 \times 10^{-8}$	۵۰,۱۲	۵,۶۷۱,۰	
۲	اولیه	$8,54 \times 10^{-2}$	۴۸,۲۷	۵,۰۰۰,۷	۷,۶۱
	شبیه‌سازی شده با <i>GFractIUT</i>	$7,12 \times 10^{-2}$	۵۲,۶	۵,۶۴۱,۲	

جدول ۷- نتایج مدل سازی واریوگرام جهت شیب شکستگی های دو دسته درزه برای داده های اولیه و شبیه سازی شده با

<i>GFracIUT</i>					
دسته درزه	داده ها	اثر قطعه ای	شعاع تأثیر (متر)	حد آستانه ای	میانگین جذر مجموع مربعات خطای سه پارامتر (درصد)
۱	اولیه	1.1×10^{-7}	۵۷,۳۲	۶,۷	۸,۳۲
	شبیه سازی شده با <i>GFracIUT</i>	1.32×10^{-7}	۶۲,۹۳	۵,۹۴	
۲	اولیه	2.1×10^{-7}	۵۲,۶۷	۵,۳	۴,۷۶
	شبیه سازی شده با <i>GFracIUT</i>	1.94×10^{-7}	۴۹,۶	۵,۸۶	

جدول ۸- نتایج مدل سازی واریوگرام جهت شیب شکستگی های دو دسته درزه برای داده های اولیه و شبیه سازی شده با *GFracIUT*

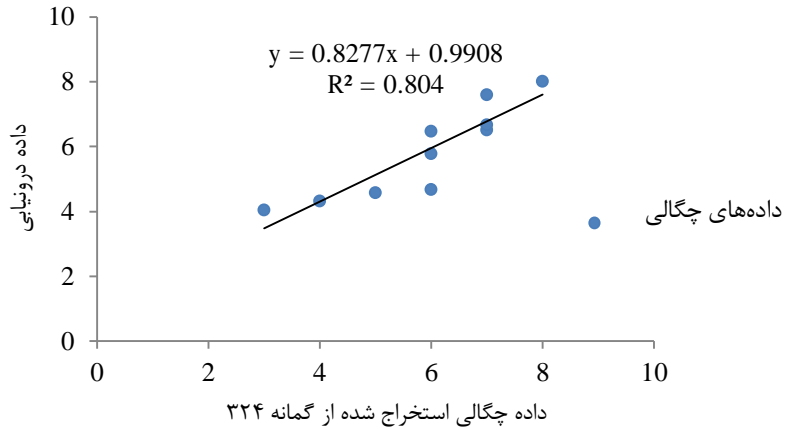
دسته درزه	داده ها	اثر قطعه ای	شعاع تأثیر (متر)	حد آستانه ای	میانگین جذر مجموع مربعات خطای سه پارامتر (درصد)
۱	اولیه	2.9×10^{-7}	۵۰,۶۷	۵,۶۳	۷,۲۱
	شبیه سازی شده با <i>GFracIUT</i>	3.2×10^{-7}	۶۰,۱	۵,۴۲	
۲	اولیه	7.3×10^{-8}	۵۲,۹۶	۵,۰۰	۶,۴
	شبیه سازی شده با <i>GFracIUT</i>	7.06×10^{-8}	۵۰,۲۲	۵,۸۸	

۵-۲- اعتبارسنجی داده های فضایی تولید شده

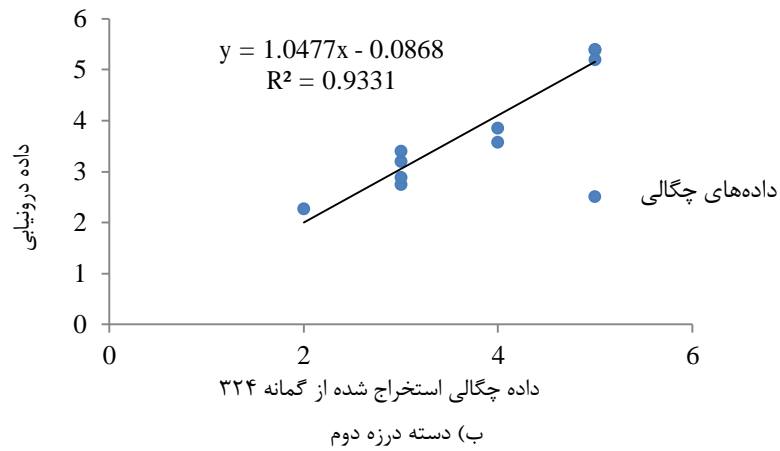
در روش دوم، یکی از داده های واقعی حذف می گردد و سپس بر اساس پارامترهای تخمین دوباره محاسبه می شود. این روند برای داده های معلوم تکرار می شود. پس از انجام محاسبات به دو گروه داده که شامل داده های واقعی و تخمینی است، دست خواهیم یافت سپس ضریب همبستگی بین این دو گروه داده گرفته می شود. اعتبارسنجی چگالی شکستگی ها برای همه ی واحد طول های گمانه ۳۲۴ (شکل ۶) انجام و نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شد. باید یادآور شد که داده های چگالی شکستگی های گمانه برحسب تعداد بر واحد طول و داده های چگالی شکستگی های درون یابی شده

برحسب تعداد بر واحد شبکه سلولی می باشند. ضریب همبستگی به دست آمده برای چگالی شکستگی های دسته درزه اول و دوم به ترتیب ۰/۸ و ۰/۹ است. با مقایسه ضرایب همبستگی می توان نتیجه گرفت که داده های چگالی شکستگی های دسته درزه دوم از عدم قطعیت کمتری برخوردارند. همچنین اعتبارسنجی جهت شیب و شیب شکستگی ها برای تعدادی از داده های گمانه ۳۲۴ (شکل ۶) انجام و نتایج آن ها به ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شد. باید خاطرنشان کرد که داده های شیب و جهت شیب برحسب درجه می باشند. ضریب همبستگی به دست آمده برای جهت شیب شکستگی های دسته درزه اول و دوم به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۹ است. با مقایسه ضرایب همبستگی

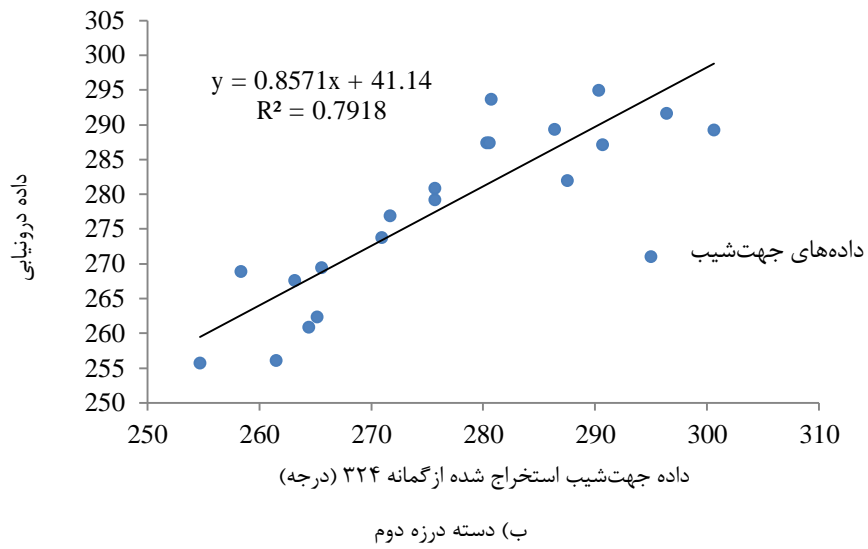
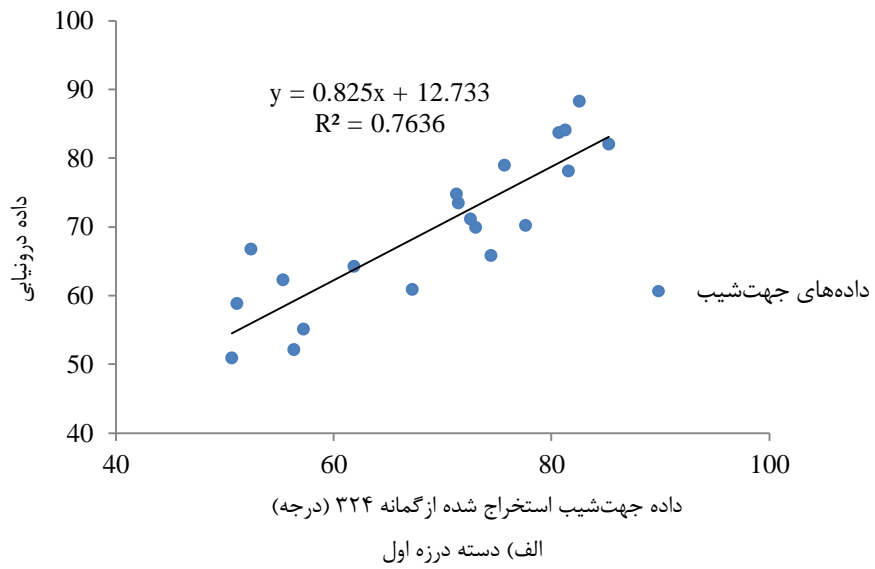
می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های جهت‌شیب شکستگی‌های دسته درزه دوم از عدم قطعیت کمتری برخوردارند. ضریب همبستگی به‌دست‌آمده برای شیب دسته درزه اول و دوم به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۷۶ است. با مقایسه ضرایب همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های شیب شکستگی‌های دسته درزه اول از عدم قطعیت کمتری برخوردارند.



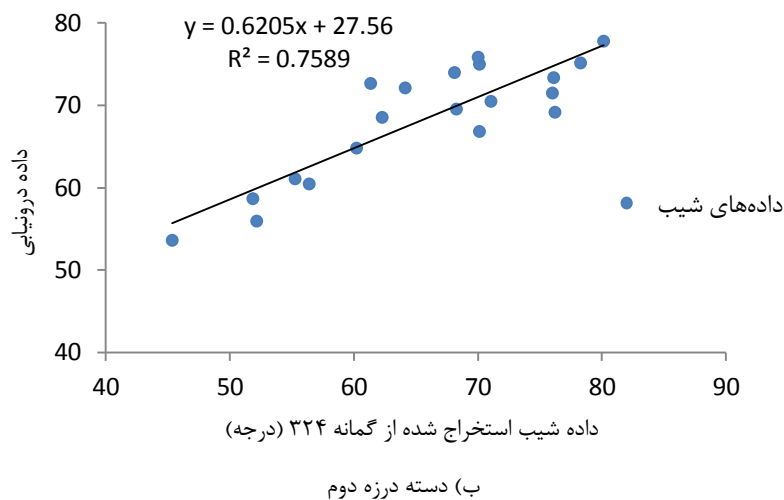
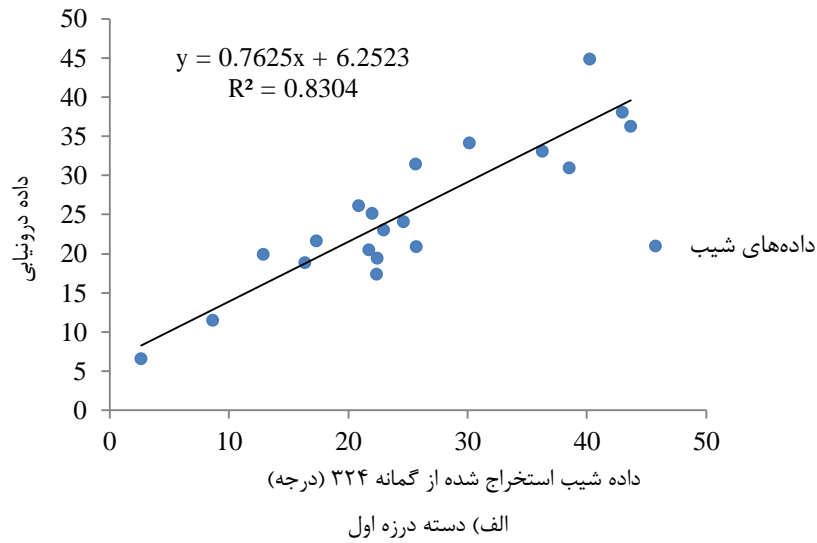
الف) دسته درزه اول



شکل ۱۳- نتایج اعتبارسنجی برای داده‌های چگالی شکستگی‌های گمانه ۳۲۴



شکل ۱۴- نتایج اعتبارسنجی برای داده های جهت شیب شکستگی های گمانه ۳۲۴



شکل ۱۵- نتایج اعتبارسنجی برای داده‌های شیب شکستگی‌های گمانه ۳۲۴

۶- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی یکی سیستم سنگی دارای شکستگی اهمیت زیادی در بسیاری از زمینه‌های مهندسی سنگ دارد. استفاده از شبیه‌سازی‌هایی با روش‌های به‌روز می‌تواند هرچه بیشتر راه را برای مطالعات دقیق‌تر در زمینه‌هایی مانند پیش‌بینی هجوم آب به درون فضای زیرزمینی باز نماید و پس از آن می‌توان برای هر سناریویی آماده بود و چاره‌هایی درخور اندیشید. در بسیاری از سایت‌های مهندسی سنگ مانند تونل کوهرنگ با پدیده هجوم آب به درون تونل رو به رو است.

این تجربه اهمیت مدل‌سازی جریان سیال در محیط‌های دارای شکستگی را به ما یادآور می‌شود. در صورتی‌که اگر داده‌های مناسب قبل از شروع عملیات برداشت می‌شد و شبیه‌سازی‌ها و تخمین‌هایی هرچند با فرضیات ساده‌سازی شده اعمال می‌گشت امکان داشت که با صرف هزینه‌های بسیار کمتر و صرفه‌جویی زمانی بیشتر پروژه را به‌پیش برد.

اعمال خصوصیات فضایی سیستم شکستگی‌ها نیازمند به‌کارگیری روشی است تا بتواند به‌واسطه آن بین مقادیر مختلف و موقعیت‌های متفاوت از یک پارامتر مورد نیاز برای

واریانس، ابعاد ریزبلوک های تخمین $10 \times 50 \times 50$ مترمکعب انتخاب گردید.

بررسی نقشه های چگالی شکستگی های دو دسته درزه نشان می دهد که تمرکز شکستگی های دسته اول در نواحی سطحی دچار دامنه تغییرات زیادی شده در صورتی که در دسته درزه دوم نیمه ی غربی نسبت به نیمه ی شرقی دارای تمرکز بیشتری است.

شکستگی های تولید شده برای این ناحیه با شکل های مختلف هندسی از قبیل دیسک دوار و چهارضلعی مدل شدند. به این برنامه امکان ارائه و نمایش مدل کوچک از درون مدل بزرگ افزوده شده است. به دلیل عدم دستیابی به اطلاعات بسیاری از شکستگی ها به خصوص در زون های خرد شده، این امکان دیده شده که کاربر بتواند از هر مکان و با هر جهتی یک مقطع دوبعدی از مدل سه بعدی خود بزند. اعتبارسنجی متقابل چگالی، جهت شیب و شیب داده های برداشت شده برای یک گمانه انجام شد. نتایج به دست آمده از ضرایب همبستگی بین داده های واقعی (گمانه ای) و درون یابی شده نشان می دهد که مدل ارائه شده در این مقاله تطابق خوبی با داده های میدانی دارد.

۷- فهرست نمادها

در جدول ۹ فهرست نمادها آورده شده است. باید به این نکته توجه کرد که واحدها برای متغیر ناحیه ای چگالی شکستگی ها نوشته شده است.

تولید سیستم شکستگی ها ارتباط برقرار کند. از جمله این روش ها، روش های زمین آماری هستند که با استفاده از داده های یک کمیت در مختصات معلوم، می تواند مقدار همان کمیت را در نقطه دیگری با مختصات معلوم واقع در درون دامنه ای که ساختار فضایی حاکم است، تخمین بزند. در این تحقیق یک روش شبیه سازی سه بعدی برای توزیع شکستگی ها با رویکرد زمین آماری پیشنهاد شده است. به منظور اعمال روش پیشنهاد شده کد *GFracIUT* توسعه داده شد. این برنامه ابتدا به روش شبیه سازی گوسین متوالی نقشه چگالی شکستگی ها را مشخص می کند. در مرحله بعد موقعیت مرکز شکستگی ها با فرآیند پواسون تعیین می شود. سرانجام با به کارگیری روش زمین آمار مؤلفه های جهت داری شکستگی ها را باز تولید می کند. برای کاربرد عملی این برنامه یک مطالعه موردی بر روی ناحیه ای از منطقه نفتی گچساران در جنوب غربی ایران صورت گرفت و مهم ترین نتایج آن به طور مختصر در چند بند آورده شده است:

پردازش اولیه داده ها برای ناحیه ای به ابعاد 1000×1000 مترمربع و اعماق بین ۲۵۰۰ تا ۲۶۰۰ متر نشان می دهد که این منطقه دارای دو دسته درزه غالب است. همچنین واحد طول بهینه برای محاسبات چگالی شکستگی ها ۱۰ متر انتخاب شد. نتایج مدل سازی واریوگرام تجربی داده ها نشان می دهد که چگالی شکستگی های هر دو دسته درزه از مدل تئوری گوسی تبعیت می کنند. با اعمال سه پارامتر فاصله گمانه ها از هم، واحد طولی برداشتی چگالی شکستگی ها و تغییرات حجم ریزبلوک ها با

جدول ۹- سیاهه نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
Q	-	متغیر با توزیع محلی	z_i^c	m	مرکز ریزبلوک i ام در راستای Z
U	-	متغیر با توزیع نرمال استاندارد	x_j	m	موقعیت داده j ام در راستای x
p	-	عددی بین صفر و یک	y_j	m	موقعیت داده j ام در راستای y
h	m	طول گام	z_j	m	موقعیت داده j ام در راستای Z
$\gamma(h)$	$1/m^2$	نیم واریوگرام داده های تجربی	p_x^j	m	نقطه انتقال یافته j ام در راستای x
$N(h)$	-	تعداد زوج نمونه ها	p_y^j	m	نقطه انتقال یافته j ام در راستای y
p_k	m	موقعیت یک داده خاص در فضا	p_z^j	m	نقطه انتقال یافته j ام در راستای Z
N	-	تعداد ریزبلوک ها	r_{min}	m	شعاع کوچک بیضوی ناهمسانگردی
X	m	ابعاد بلوک اصلی در راستای x	r_{mean}	m	شعاع متوسط بیضوی ناهمسانگردی
Y	m	ابعاد بلوک اصلی در راستای y	r_{max}	m	شعاع بزرگ بیضوی ناهمسانگردی

ادامه جدول ۹- سیاهه نمادها

شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
مقدار مجهول	1/m	Z_v^*	ابعاد بلوک اصلی در راستای z	m	Z
وزن (تأثیر) مقادیر معلوم بر مجهول	-	ω	ابعاد ریزبلوک در راستای x	m	ΔX
مقدار واقعی	1/m	Z_v	ابعاد ریزبلوک در راستای y	m	ΔY
امید ریاضی	-	E	ابعاد ریزبلوک در راستای z	m	ΔZ
میانگین تخمین	1/m	m	ماتریس دوران	-	R
میانگین کوواریوگرام در نقطه مجهول	1/m2	$C_m(v, v)$	تصویر بردار h در راستای محور x	m	x_i
میانگین کوواریوگرام بین نقطه مجهول و معلوم	1/m2	$C_m(v, v_i)$	تصویر بردار h در راستای محور y	m	y_i
میانگین کوواریوگرام بین دو نقطه معلوم	1/m2	$C_m(v_i, v_j)$	تصویر بردار h در راستای محور z	m	z_i
میانگین واریوگرام در نقطه مجهول	1/m2	$\gamma_m(v, v)$	کوواریوگرام داده‌های تجربی	1/m2	c_i
میانگین واریوگرام بین نقطه مجهول و معلوم	1/m2	$\gamma_m(v, v_i)$	زاویه آزیموت	Deg	α
میانگین واریوگرام بین دو نقطه معلوم	1/m2	$\gamma_m(v_i, v_j)$	زاویه شیب	Deg	β
ضریب لاگرانژ	1/m2	μ	زاویه میل	Deg	θ
واریانس کریجینگ معمولی	1/m2	σ_{OK}^2	مرکز ریزبلوک i ام در راستای x	m	x_i^c
			مرکز ریزبلوک i ام در راستای y	m	y_i^c

۸- پیوست

۸-۱- کریجینگ معمولی

مبنای تخمین یک نقطه مجهول بر اساس داده‌های موجود روش کریجینگ معمولی است. بنابراین در این بخش تحقیق محاسبات مربوط به این روش تشریح می‌شود. در این روش تخمین دو شرط عاری بودن از خطای سیستماتیک و حداقل شدن مقدار میانگین باید برقرار شود. معادله اصلی روش کریجینگ به صورت رابطه (۱) است:

$$Q_v^* = \sum_{i=1}^N \omega_i Q_i \quad (1)$$

جهت برقراری شرط عاری بودن از خطای سیستماتیک باید میانگین خطای تخمین صفر شود که به صورت زیر عمل می‌شود:

$$E(Q_v - Q_v^*) = 0 \quad (2)$$

با ترکیب دو رابطه (۱) و (۲) رابطه (۳) به دست

می‌آید:

$$E\left(Q_v - \sum_{i=1}^N \omega_i Q_i\right) = 0 \quad (3)$$

با بسط رابطه (۳) و در نظر گرفتن شرط $E(Q_v) = E(Q_v^*) = m$ رابطه ساده‌شده (۴) به دست خواهد آمد:

$$m - \sum_{i=1}^N \omega_i m = 0 \quad (4)$$

m میانگین در نقطه تخمینی است و چون مقدار آن مخالف صفر است رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (5)$$

برای بررسی شرط دوم ابتدا باید واریانس تخمین را محاسبه کرده و آن را به حداقل رساند. بر این اساس رابطه (۶) به دست خواهد آمد:

$$E[(Q_v - Q_v^*)^2] = E[Q_v^2] - 2E[Q_v Q_v^*] + E[Q_v^{*2}] \quad (6)$$

از طرفی چون:

$$\sigma_{OK}^2 = \sum_{i=1}^N \omega_i \gamma_m(v, v_i) - \gamma_m(v, v) + \mu \quad ۱۴$$

با بسط رابطه (۱۳)، یک دستگاه معادلات خطی ایجاد می‌شود. با نوشتن این دستگاه معادله خطی حاصل شده به صورت حاصل ضرب ماتریسی، رابطه (۱۵) به دست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_m(v, v_1) \\ \gamma_m(v, v_2) \\ \vdots \\ \gamma_m(v, v_N) \\ 1 \end{bmatrix} \quad ۱۵$$

۸-۲- لونیبرگ مارکوارت

کاربرد الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت در مسئله برازش منحنی حداقل مربعات است. اگر فرض شود که از پارامترها که باید پس از برازش تخمین زده شوند و $f(x, p)$ منحنی مدل باشند آنگاه باید مجموع اختلاف مربعات حداقل شود:

$$S(p) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, p)]^2 \quad ۱۶$$

که در رابطه (۱۶): m جفت داده تجربی است. مانند سایر الگوریتم‌های کمینه‌سازی عددی، الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت یک رویه تکراری است. لذا برای شروع کمینه‌سازی، کاربر باید یک حدس آغازین برای بردار p مربوط به پارامترها ارائه کند. در بسیاری مواقع یک حدس ناآگاهانه استاندارد مانند $p = (1, 1, \dots, 1)$ به خوبی کار می‌کند. در جاهای دیگر، الگوریتم تنها وقتی کار می‌کند که حدس آغازین تا حدی به جواب نهایی نزدیک باشد. در هر گام تکرار بردار p با یک مقدار جدید $p + \delta$ جایگزین می‌شود. برای دستیابی به δ باید توابع به فرم $f(x_i, p + \delta)$ به شکل زیر خطی‌سازی شوند:

$$f(x_i, p + \delta) \approx f(x_i, p) + J_i * \delta \quad ۱۷$$

که در رابطه (۱۷): J : ژاکوبین تابع f است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E[Q_v^2] = C_m(v, v) + m^2 \quad ۷$$

$$E[Q_v Q_v^*] = \sum_{i=1}^N \omega_i C_m(v, v_i) + m^2 \quad ۸$$

$$E[Q_v^{*2}] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j C_m(v_i, v_j) + m^2 \quad ۹$$

با جایگزینی سه رابطه (۷)، (۸) و (۹) در رابطه (۶)، رابطه (۱۰) به دست خواهد آمد:

$$E[(Q_v - Q_v^*)^2] = C_m(v, v) - 2 \sum_{i=1}^N \omega_i C_m(v, v_i) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j C_m(v_i, v_j) \quad ۱۰$$

با جایگزین کردن مقدار واریوگرام به جای کوواریوگرام رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sigma_E^2 = 2 \sum_{i=1}^N \omega_i \gamma_m(v, v_i) - \gamma_m(v, v) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j \gamma_m(v_i, v_j) \quad ۱۱$$

مقدار واریانس تخمین کریجینگ باید به گونه‌ای حداقل شود که شرط اول نیز در آن لحاظ گردد در واقع برقراری شرط دوم منجر به حل مسئله بهینه‌سازی زیر می‌شود:

$$\text{Min } \sigma_E^2 = 2 \sum_{i=1}^N \omega_i \gamma_m(v, v_i) - \gamma_m(v, v) \quad ۱۲$$

$$- \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j \gamma_m(v_i, v_j), \quad \sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

در نهایت با حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از ضرایب لاگرانژ به نتیجه زیر به دست خواهد آمد:

$$\sum_{j=1}^N \omega_j \gamma_m(v_i, v_j) + \mu = \gamma_m(v, v_i) \quad ۱۳$$

$$, \quad \sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad i = 1, 2, 3 \dots N$$

حداقل واریانس که واریانس کریجینگ نامیده می‌شود نیز از رابطه (۱۴)، حاصل می‌شود:

که در رابطه (۲۰): I ماتریس همبستگی است و μ ضریب میرایی نامیده می‌شود که مقدار آن مثبت بوده و در هر تکرار نیز تنظیم می‌شود. اگر S سریع کاهش یافت مقدار کوچک‌تری به آن می‌دهیم اما اگر یک تکرار کاهش ناکافی در باقی‌مانده نشان داد μ را افزایش داده و یک گام به جلو جهت کاهش گرادیان برمی‌داریم. اگر یک طول گام بازیابی شده یا کاهش مجموع مربعات برای آخرین مجموعه پارامترهای p از مقادیر از پیش تعیین‌شده کمتر باشند تکرار پایان می‌یابد و آخرین بردار پارامتر p به‌عنوان جواب در نظر گرفته می‌شود.

$$J_i = \frac{\partial f(x_i, p)}{\partial p} \quad 18$$

با خطی‌سازی رابطه (۱۸)، معادله زیر نتیجه می‌شود:

$$(J^T J) * \delta = J^T [y - f(p)] \quad 19$$

حال اگر طرفین رابطه (۱۹) را در معکوس $(J^T J)$ ضرب کنیم می‌توان به‌سادگی δ را به دست آورد. اما می‌توان گفت کلید الگوریتم لوببرگ مارکوارت جایگزین کردن این رابطه با نسخه میرا شده آن است:

$$(J^T J + I\mu) * \delta = J^T [y - f(p)] \quad 20$$

۹- مراجع

- Adler, P., & Thovert, J. (1999). *Fractures and fracture networks: theory and applications of transport in porous media*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Andersson, J., & Dverstorp, B. (1987). *Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures*. *Water Resources Research*, 23(10), 1876-1886.
- Andersson, J., & Thunvik, R. (1986). *Predicting mass transport in discrete fracture networks with the aid of geometrical field data*. *Water Resources Research*, 22(13), 1941-1950.
- Andersson, J., Shapiro, A. M., & Bear, J. (1984). *A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information*. *Water Resources Research*, 20(1), 79-88.
- Billaux, D., Chiles, J., Hestir, K., & Long, J. C. (1989). *Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass: an example from the Fanay-Augères mine*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(3), 281-299.
- Cacas, M., Ledoux, E., Marsily, G. d., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., et al. (1990). *Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation: 2. The transport model*. *Water Resources Research*, 26(3), 491-500.
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1998). *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide (Vol. 119)*. London: Oxford University Press.
- Fereshtenejad, S., Afshari, M. K., Bafghi, A. Y., Laderian, A., Safaei, H., Song, J.-J., et al. (2016). *A discrete fracture network model for geometrical modeling of cylindrically folded rock layers*. *Engineering Geology*, 215, 81-90.
- Gattinoni, P., Scesi, L., & Terrana, S. (2009). *Water Flow in Fractured Rock Masses: Numerical Modeling for Tunnel Inflow Assessment*. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 11, p. 468.
- Hadjigeorgiou, J., Esmaili, K., & Grenon, M. (2009). *Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 296-308.
- Hassani pak, A., & Sharafoldin, M. (2002). *Exploratory Data Analysis*. Tehran: University of Tehran Press.
- Joolaei, A., & Baghbanan, A. (2013). *Three Dimensional Fluid Flow Modeling in Fractured Rocks using Numerical Pipe Network Approach*. *9th International Congress on Civil Engineering (pp. 1-6)*. Isfahan : Isfahan

University of Technology.

- Koike, K., Komorida, K., & Ichikawa, Y. (2001). Fracture-distribution modeling in rock mass using borehole data and geostatistical simulation. *Proceedings of International Association for Mathematical Geology Conference* (pp. CD-ROM). Mexico: Cancun.
- Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., et al. (2015). 3D geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. *Tectonophysics*, 660, 1-16.
- Koike, K., Liu, C., & Sanga, T. (2012). Incorporation of fracture directions into 3D geostatistical methods for a rock fracture system. *Environmental Earth Sciences*, 66(5), 1403-1414.
- Krige, D. G. (1999). The use of the principal component technique to define anisotropy details for spatial structures. *Proceedings, APCOM '99, Computer Application in the Minerals Industries, 28th International Symposium* (pp. 557-564). Colorado: Colorado School of Mines.
- Kulatilake, P., Um, J., Wang, M., Escandon, R., & Narvaiz, J. (2003). Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA. *Engineering Geology*, 70(1-2), 131-155.
- Long, J. C., & Billaux, D. M. (1987). From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure. *Water Resources Research*, 23(7), 1201-1216.
- Long, J. C., Gilmour, P., & Witherpoon, P. A. (1985). A model for steady fluid flow in random three dimensional networks of disc-shaped fractures. *Water Resour Research*, 21(8), 1105-1115.
- Noroozi, M., Kakaie, R., & Jalali, S. (2015). 3D geometrical-stochastical modeling of rock mass joint networks: case study of the right bank of Rudbar Lorestan Dam plant. *Journal of Geology and Mining Research*, 7(1), 1-10.
- Priest, S., & Hudson, J. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135-148.
- Riley, M. S. (2004). An algorithm for generating rock fracture patterns: mathematical analysis. *Mathematical Geology*, 36(6), 683-702.
- Rouleau, A., & Gale, J. (1987). Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(2), 99-112.
- Snow, D. T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, 5(6), 1273-1289.

3D Generation of Discrete Fracture Network by Geostatistical Approach

R. Lotfi¹; A. Baghbanan²; H. Hashemolhosseini³; S. Namdari⁴

1. MSc Student in Rock Mechanics; Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran
2. Associate Professor; Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran
3. Associate Professor; Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Iran
4. PhD Candidate. In Rock Mechanics; Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

Received: 25 Mar 2017; Accepted: 7 Apr 2019
DOI: 10.22044/TUSE.2019.5539.1307

Keywords

Spatial Modeling
Fracture
Density
Orientation
Sequential Gaussian Simulation
GFracIUT

Extended Abstract

Summary

Simulating a rock fracture distribution is an important issue, which is common in various fields of geosciences. This issue is of particular importance in determination of hydraulic conductivity of rock mass and forecasting the amount of water entering the underground spaces. Theoretical studies has been demonstrated that the result of three-dimensional (3D) modeling discrete fracture network is closer to reality than other models. One of the limitations of the statistical methods for modeling fracture network is the lack of spatial behavior considerations of modeling fracture network parameters. In other words, based on Monte Carlo algorithm in statistical methods, generation of fracture network parameters are based on probability distribution functions, and are carried out randomly. In this study, a computational GFracIUT code is developed. In order to generate the 3D discrete fracture network and considering geometrical parameters of the fractures surveyed from the outcrops and boreholes, probability density functions are developed using geostatistical methods. In the mentioned code, initially the density of micro-fractures are conjectured using sequential Gaussian simulation. Then, the locations of the centres of the micro-fractures are determined by Poisson's process. When the center locations of the micro-fractures are determined orientation components estimated using geostatistical approaches. The developed program is capable of modeling fractures with various geometrical shapes according to operator's desired specifications. As examples in this regard, disc and quadrilateral shapes have been considered in this paper. In order to practically apply the program, an area in Gachsaran oil field has been considered as a case study.

Introduction

Fracture is one of the main characteristics of the rock mass. Fracture network modeling by statistical method has some limitations. One of the limitations of the statistical methods for modeling fracture network is the lack of spatial behavior considerations of modeling fracture network parameters. Geostatistical methods can be employed to spatially characterize fracture network.

Methodology and Approaches

First, using the GFracIUT code, we obtain the fracture density map by employing sequential Gaussian simulation method. Then, the location of the centre of each micro-fracture by Poisson's process is determined using the software. Finally, the micro-fractures orientation component is estimated by geostatistical methods.

Results and Conclusions

In this study, a computational GFracIUT code is developed. The GFracIUT code is composed of two steps: positioning the centers of fractures using the fractures density data by sequential Gaussian

simulation, and assigning the directions (strikes and dips) of the fractures. In order to practically apply the software, an area in Gachsaran oil field has been considered as a case study.
