

## بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر مدلسازی تغییرات هدایت هیدرولیکی در محیط شکسته با استفاده از روش المان مجزا

سجاد علیزاده کاکلر<sup>۱</sup>، فرامرز دولتی ارده جانی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک-دانشگاه صنعتی شاهرود، s\_alizadeh\_k@shahroodut.ac.ir

<sup>۲</sup> آستاد؛ عضو هیأت علمی دانشکده فنی-دانشگاه تهران، fdoulati@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۸-۱۲-۱۳۹۶، پذیرش: ۲۱-۰۱-۱۳۹۸)

### چکیده

یکی از کلیدی‌ترین و پرچالش‌ترین مسایل پیش‌روی فضاهای زیرزمینی از جمله تونل‌ها و مغارها بررسی میزان نشت آب به این فضاهاست. برآورد واقعی میزان نشت عاملی بسیار موثر بر روند رو به جلو در یک پروژه عملیاتی است. اصلی‌ترین عامل بر میزان نشت، هدایت هیدرولیکی است. یکی از مهم‌ترین راه‌های بررسی و برآورد میزان هدایت هیدرولیکی و به تبع آن نشت آب به فضاهای زیرزمینی، آزمایشات میدانی لوژان و لوفران است. در این تحقیق با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا سعی شده است که بتوان میزان هدایت هیدرولیکی را مورد ارزیابی و بررسی قرار داد. بدین منظور در ابتدا پیش‌پردازشی بر روی اطلاعات دسته درزه‌های برداشت شده انجام شده است. این درزه‌ها بر اساس شیب به سه دسته درزه‌های شبه‌افقی، درزه‌های شبه‌عمودی و درزه‌های سنگ بستر تقسیم‌بندی شدند. در ادامه برای به دست آوردن توزیع مناسب با درزه‌ها از سه توزیع پواسون، توانی و لگاریتمی استفاده شد. نتایج، بیشترین انطباق را با توزیع توانی از خود نشان دادند. با در نظر گرفتن شرایط اولیه مربوط به مدل، DFN مربوط به درزه‌ها با نرم‌افزار 3DEC ساخته شد. در روند حل مساله DFN با فیلترهای حذف‌کننده مختلف در نظر گرفته شد که از میان آن‌ها فیلتر ۶ متر به بالا به عنوان فیلتر مناسب برای حذف شکستگی‌های کوچک انتخاب شد. صحت‌سنجی DFN با استفاده از نتایج آزمون واتسون و ویلیامز و تست Pvalue مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه با ساخت مدل REV و تعیین ابعادی که بتواند گویای منطقه باشد، ابعاد ۷ متر در نظر گرفته شد. در نهایت جواب‌های به دست آمده با داده‌های حاصل از آزمایش لوژن صحت‌سنجی شد و انطباق نسبتاً بالایی را از خود نشان داد.

### کلمات کلیدی

شبکه شکستگی‌های مجزا، مغار، المان مجزا، هدایت هیدرولیکی، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، سد رودبار لرستان.

## ۱- مقدمه

در طول حفر فضاهای زیرزمینی برای استفاده‌های مختلف، مانند ذخیره‌سازی هیدروکربن و پروژه‌های برق آبی، کنترل آب زیرزمینی در طول مرحله حفاری و در طی انجام عملیات، نقش مهمی در هزینه‌های ساخت و ساز، زمان انجام پروژه و همچنین امنیت ساخت و ساز دارد. در بسیاری از پروژه‌های زیرزمینی، مشکلات مربوط به نشت آب از جمله مشکلات غالب، در زمینه مسایل مربوط به زمین‌شناسی است. نشت آب باعث به وجود آمدن عواملی مانند وخامت و بحرانی شدن شرایط کار (حتی تهدید ایمنی کارگران)، نشست ساختمان‌های روی زمین، طولانی شدن زمان ساخت و هزینه بالا می‌شود.

واژه نشت مشخص‌کننده جریان آب در زیرسازه‌ها مانند سدهای کور و آب‌بندها و یا جریان آب از داخل بدنه و زیر سدخاکی است. در کاربردهای مهندسی، آنالیز آب زیرزمینی و نشت یکی از مراحل مهم پروژه‌های اساسی مانند طرح‌های تامین آب، سدها و سازه‌های هیدرولیکی، سیستم‌های آبیاری و زهکشی و آبکشی از محل‌های پروژه است. کاربرد مهندسی آب زیرزمینی و مدیریت نشت به طور کلی با توسعه تئوریک حرکت آب زیرزمینی و به طور خاص با آغاز طراحی چاه‌های آب توسط موسسات [۳] و تاپس [۵] مطرح شد.

لین [۶] از آزمایشات میدانی و قوانین تجربی برای طرح طول کف آب‌بندها استفاده کرد. الگوی جریان در خاک‌ها به وسیله روش گرافیکی توسط کاشف [۷،۸] توسعه داده شد. روش‌های نشت در مهندسی آبیاری نیز به طور وسیعی توسط لیلوسکی [۹] مورد استفاده قرار گرفت.

شبکه شکستگی‌ها، ساختارهای پیچیده‌ای دارد و ساخت مدل‌های معین و کلی برای آن‌ها به آسانی امکان‌پذیر نیست. اغلب مدل‌هایی که برای توصیف شبکه شکستگی‌ها به کار می‌روند دارای برخی نواقص عمومی‌اند. مهم‌ترین این نواقص فرض طول نامحدود برای تمامی شکستگی‌ها و موازی بودن آن‌ها است [۱۰،۱۱]. این دو فرض باعث عدم انطباق این مدل‌ها با شبکه شکستگی‌های موجود در طبیعت می‌شود، بنابراین مدل‌های شبکه شکستگی مجزا که اجازه ورود شکستگی‌های با طول محدود را نیز می‌دهند، انطباق بیشتری با نتایج تجربی دارند. همچنین مدل شبکه شکستگی مجزا، مفیدترین روش برای مطالعات جریان در توده‌های شکسته است که تعیین یک مدل پیوسته برای آن‌ها مشکل است [۱۲]. نخستین مدل‌سازی دوبعدی شبکه شکستگی مجزا حدود سی سال پیش توسط

لانگ و همکارانش انجام شد. بهینه‌سازی و توسعه این مدل‌ها تا به امروز نیز ادامه داشته است [۱۳].

محدودیت اصلی مدل‌های دوبعدی، در نظر نگرفتن بعد سوم شکستگی‌ها است که در بعضی مواقع شکستگی‌هایی که در مدل دوبعدی فاقد نقطه برخورد بوده‌اند، در عمل در جایی خارج از صفحه نمایش، متقاطع‌اند. از این رو معمولاً مدل‌های دوبعدی نفوذپذیری را کمتر از حد واقعی تخمین می‌زنند. بنابراین نخستین بار در سال ۱۹۸۵ لانگ و همکارانش [۱۴] مدل دوبعدی جریان را به شبکه سه‌بعدی گسترش دادند. آن‌ها در نخستین گام اقدام به ساخت مدل توصیفی کردند که ویژگی‌های هندسی برداشت شده از زمین را در بر گیرد. با اینکه بر اساس مشاهدات میدانی، شکل واقعی شکستگی‌ها در طبیعت شبیه به دیسک بیضوی است [۱۵] اما برای ساده‌سازی مساله، شکل شکستگی‌ها را به صورت دیسک دوار مدل کردند. نرم‌افزارهای تجاری فرکا و فرکمن [۱۶] و نپساک [۱۷،۱۸]، از جمله کدهای کامپیوتری استوار بر پایه مدل شبکه شکستگی مجزا است. این نرم‌افزارها، در مطالعات مکانیک سنگ به ویژه در زمینه مدل‌سازی جریان و تعیین نفوذپذیری در شکسته سنگ‌ها، کاربردهای گسترده‌ای دارند.

جیان و بنگ‌پن در سال ۲۰۱۰ با انتشار مقاله‌ای به ساخت یک مدل سه‌بعدی ۱۰ متر در هر بعد به بررسی رویکردی برای توسعه یک مدل کاربردی از شبکه شکستگی‌های مجزا پرداختند. در این مدل DFN، ۱۶۰۵ شکستگی که با یکدیگر دارای ارتباطات پیچیده‌ای بودند ایجاد شد. این محققان چگالی شکستگی‌ها و تاثیر آن را بر روی میزان شدت جریان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که چگالی شکستگی‌ها تاثیر بسزایی را بر میزان بردارهای جریان و به تبع آن میزان نشت و جریان آب در مدل دارد [۱۹].

روش‌های مختلفی برای تخمین نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته وجود دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش‌های تحلیلی اسنو و اودا اشاره کرد [۱۰]. از آنجایی که در روش‌های تحلیلی باید ساده‌سازی‌های زیادی در نظر گرفته شود و همچنین امکان در نظر گرفتن بسیاری از فرضیات حاکم بر مساله وجود ندارد از این رو کاربرد این روش‌ها محدود و با خطای زیادی همراه است. به علت پیچیدگی شبکه‌های واقعی، در تحلیل آن‌ها عموماً از روش‌های عددی استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی سه‌بعدی جریان سیال در توده سنگ، مدل‌های مختلفی ارائه شده است که همگی در راستای ساده‌سازی این فرآیند پیچیده‌اند. مدل‌های شبکه شکستگی مجزا، شکستگی‌ها

داده‌های به دست آمده به ساخت یک مدل آبی زمین‌شناسی قابل اعتماد پرداختند [۲۷].

ژيانگ سون و همکاران در سال ۲۰۱۱ تحقیقی ارائه دادند که در آن با استفاده از ترکیبی از روش‌های تحلیلی و شبکه‌های مصنوعی مقادیر هدایت هیدرولیکی را با استفاده از ۶ گمانه حفر شده به دست آوردند. این محققان ارتباط میان درزه‌ها و شکستگی‌ها را در فواصل بین گمانه‌ها با استفاده از روش شبکه عصبی به دست آوردند و در ادامه به محاسبه نشت پرداختند [۲۸].

کوبین گوا لی و همکاران با انتشار مقاله‌ای مروری و جامع در سال ۲۰۱۷ به بررسی کاربرد شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) برای مدل‌سازی کپوله ژئومکانیکی و هیدرولوژیکی در سنگ‌های شکسته پرداختند. این محققان در نهایت و بعد از بررسی‌های گسترده انجام شده توصیه‌ها و راهکارهایی را برای مدل‌سازی پیچیده مدل‌های هیدرومکانیکی در سنگ‌های شکسته ارائه می‌کنند که بر مبنای ساخت و شبیه‌سازی فیزیکی مدل DFN است [۲۹].

در این تحقیق با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی‌های مجزا و همچنین با به کارگیری روش المان مجزا در نرم‌افزار 3DEC مقدار نشت جریان آب به توده سنگ درزه‌دار تعیین می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است بررسی تاثیر عوامل مختلف در نتایج و همچنین مدت زمان اجرای مدل شبکه شکستگی‌های مجزا و REV است. از این رو عوامل تاثیرگذار بر اجرای فرآیند به دست آوردن میزان نشت مطالعه و نتایج حاصل از آن‌ها به تفصیل بیان شده است.

پارامترهای موثر بر میزان تغییرات هدایت هیدرولیکی، زاویه و جهت شکستگی‌ها، طول شکستگی‌ها، چگالی شکستگی‌ها، میزان زبری و بازشدگی است. از این میان چگالی شکستگی‌ها، طول شکستگی، شیب شکستگی و بازشدگی درزه‌ها با استفاده از تابع توزیع‌های متفاوت و مخصوص به خود به صورت متغیر در نظر گرفته شده است. همچنین توده سنگ مورد نظر صاف در نظر گرفته شده است.

## ۲- معرفی مدل مورد استفاده و معادلات حاکم

3DEC نرم‌افزاری بر مبنای روش المان مجزا است. این نرم‌افزار مناسب برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته است. در این نرم‌افزار، ساختمان محیط ناپیوسته به صورت مجموعه‌ای از

را تنها محل عبور سیال در نظر گرفته‌اند و از تخلخل و نفوذپذیری احتمالی خود ماتریکس سنگ چشم‌پوشی می‌کنند. البته در بسیاری موارد، نفوذناپذیری ماتریکس سنگ که در ساده‌سازی مسیر انتقال سیال نقش مهمی ایفا می‌کند، به وسیله نتایج تجربی هم به تایید رسیده است.

ضرایب هدایت هیدرولیکی معادل توده سنگ شکسته در یک محل خاص می‌تواند به دو روش گمانه‌زنی و تست هیدرولیکی تعیین شود. روش گمانه‌زنی، بر اساس شبیه‌سازی دقیق جریان در بلوک‌های سنگ شکسته است [۲۰،۲۱]. در این روش، شبکه شکستگی بلوک سنگ با استفاده از داده‌های گمانه‌ها ایجاد شده است، شرایط مرزی هیدرولیکی به بلوک سنگ اعمال و با استفاده از تحلیل عددی، شار جریان از مرزها محاسبه می‌شود. بی‌فنگ چن و همکاران با استفاده از روش گمانه‌زنی مقادیر مربوط به هدایت هیدرولیکی در اطراف یک مغار برقی‌آبی را به دست آوردند. آن‌ها همچنین توزیع‌های بازشدگی‌های ناشی از حفاری، منطقه پلاستیک و تغییر نفوذپذیری در سنگ‌های اطراف را با استفاده از یک مدل الاستو-پلاستیک معادل و مدل هدایت هیدرولیکی وابسته به فشار با ملاحظات الگوهای توسعه و رفتارهای تغییر شکل بحرانی شکستگی‌ها در توده سنگ مدل کردند [۲۲]. در نهایت، ضرایب هدایت هیدرولیکی معادل با استفاده از نتایج شار جریان به دست می‌آید [۲۳]. در روش دوم که ساده‌تر است، ضرایب هدایت هیدرولیکی مستقیماً و با انجام آزمایش‌های تزریق تعیین می‌شود [۱۱،۲۴]. هونگ ای لین و همکاران در سال ۲۰۰۹ در بررسی میزان هدایت هیدرولیکی در تونل سوشیان تایوان از روش تست هیدرولیکی استفاده کردند. همچنین این محققان با بررسی اثر تنش بر میزان هدایت هیدرولیکی در شکستگی‌ها و توزیع این تنش در اطراف تونل به معرفی رابطه هذلولی بین تنش نرمال و بسته شدن دیافراگم پرداخته‌اند [۲۵].

یکی دیگر از روش‌های محاسبه مقادیر مربوط به هدایت هیدرولیکی آنالیز برگشتی است. ژئی پنگ ژو و همکاران از یک روش نیمه‌تحلیلی برای آنالیز برگشتی مقادیر هدایت هیدرولیکی در اطراف مغار سنگی بر اساس داده‌های برداشت شده در محل استفاده کرده‌اند [۲۶]. همچنین این محققان در سال ۲۰۱۵ با انتشار مقاله‌ای به بررسی داده‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی در سه مرحله امکان‌سنجی، مرحله ساخت و ساز و بعد از ساخت و ساز پرداختند. آن‌ها سپس با استفاده از

## ۳- مبانی شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)

هدف از ساخت شبکه شکستگی مجزا، ایجاد یک مدلسازی هندسی از شکستگی‌هاست که در مقیاس دوبعدی و یا سه-بعدی معرف مشخصات و تعداد شکستگی‌های موجود در توده سنگ باشد [۳۱]. داده‌های لازم برای ایجاد یک شبکه شکستگی معمولاً از طریق برداشت مستقیم شکستگی‌ها از روی سطوح قابل دسترسی مانند رخنمون‌ها و یا گمانه حفاری و با استفاده از روش پنجره برداشت و یا خط برداشت ثبت و به صورت توزیع‌های آماری توصیف می‌شوند [۳۱، ۳۲]. در این روش، برای هر دسته شکستگی اصلی، تعدادی شکستگی مجزا با استفاده از توابع توزیع مربوط به ویژگی‌های هندسی ساخته می‌شود. مشخصات هندسی لازم برای ساخت هر شکستگی، با استفاده از نمونه‌گیری مونت کارلو از تابع چگالی احتمال ویژگی‌های هندسی مربوط به دسته درزه‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه (توزیع طول رخ نمون، جهت‌داری و دهانه) انتخاب می‌شود. فرآیند تولید شکستگی‌ها در داخل دامنه مورد نظر به صورت تک به تک و برای هر دسته شکستگی به طور مستقل انجام می‌شود. تولید شکستگی‌ها در دامنه تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد شکستگی ایجاد شده در دامنه به حد قابل انتظار برسد [۱۴].

محدود بودن طول شکستگی‌های موجود در دامنه باعث می‌شود که تعدادی از شکستگی‌ها به صورت غیرهادی ظاهر شوند و در محاسبات جریان نقشی نداشته باشند. وجود شکستگی‌های غیرهادی باعث افزایش پیچیدگی و زمان محاسبات می‌شود به همین دلیل برای افزایش سرعت و کارایی محاسبات لازم است که شکستگی‌های غیرهادی از شبکه حذف شوند. این شکستگی‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۳۲]:

- شکستگی‌هایی که هیچ فصل مشترکی با مسیرهای جریان (شبکه جریان) و مرزهای خارجی و داخلی ندارند. این شکستگی‌ها ممکن است به صورت تکی و یا در زیر شبکه‌های ایزوله شده ظاهر شوند.
- شکستگی‌هایی که فقط یک فصل مشترک با شبکه جریان دارند که در اصطلاح به آن‌ها مسیرهای مرده گفته می‌شود.
- شکستگی‌هایی که در یک شبکه متصل به هم ظاهر می‌شوند ولی بین مرزهای داخلی و خارجی ارتباط ندارند (زیرشبکه میانی) و یا فقط یک اتصال با یکی از مرزهای داخلی یا خارجی دارند که به اصطلاح به زیر شبکه‌های

بلوک‌های جداگانه تعریف و ناپیوستگی‌ها به صورت شرایط مرزی میان بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شود.

آهنگ جریان در 3DEC در اثر اختلاف فشار بین نواحی مجاور به وجود می‌آید. برای یک تماس نقطه‌ای (مانند F در شکل ۱) آهنگ جریان از یک ناحیه با فشار P1 و P2 از رابطه ۱ به دست می‌آید [۲۹]:

$$Q = K_c \Delta p \quad (1)$$

که در آن:

$K_c$  ضریب نفوذپذیری تماس نقطه‌ای

$\Delta P$  اختلاف فشار (پاسکال) که از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2)$$

که در آن:

$\rho_w$  دانسیته سیال (کیلوگرم/مترمکعب)

$g$  شتاب ثقل ( $m/s^2$ )

$y_1$  و  $y_2$  مختصات مرکز نواحی در دو  $y$  مختلف (متر)

در مورد تماس لبه به لبه، یک طول تماس تعریف می‌شود (برای مثال در شکل ۱،  $ID$  و  $IE$  به ترتیب طول تماس‌های  $D$  و  $E$  را نشان می‌دهد). این طول‌ها به صورت نصف فاصله به نزدیک‌ترین تماس در سمت راست به علاوه نصف فاصله به نزدیک‌ترین تماس در سمت چپ به دست می‌آید. در این مورد قانون دارسی در یک درزه صفحه‌ای به کار برده می‌شود و آهنگ جریان از رابطه ۳ به دست می‌آید [۲۹]:

$$Q = -K_f a^3 \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

که در آن:

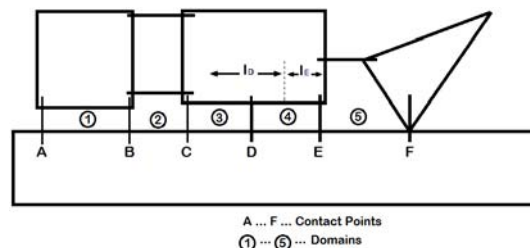
$K_f$  ضریب نفوذپذیری ناپیوستگی (به طور تئوری برابر  $1/12\mu$

( $\mu$  ویسکوزیته دینامیک سیال) است.)

$a$  بازشدگی هیدرولیکی تماس (میلی‌متر)

$L$  طول تماس (متر)

$\Delta P$  اختلاف فشار (پاسکال) است.



شکل ۱- جریان درون درزه‌ها که به صورت بین نواحی مدل شده است [۲۴].

شعاع دیسک است که شعاع دایره در حقیقت تابعی از تصویر طول شکستگی‌های برداشت شده از صحرا است، روش شبکه شکستگی‌های مجزا بر مبنای درک و فهم و ارایه دو عامل کلیدی شبکه هندسی شکستگی‌ها و قابلیت انتقال درزه‌ها به وجود می‌آید [۳۴ و ۳۵].

### ۳-۲- پیش‌پردازش داده‌های منطقه

یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش رو در کار با نرم‌افزارهای محیط گسسته از جمله 3DEC پیچیدگی ساخت مدل و جزئیاتی است که در کار با آن‌ها وجود دارد. ساخت مدلی مورد اعتماد که با منطقه مورد بررسی بیشترین انطباق را داشته باشد اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه از داده‌های درزه‌نگاری تونل اکتشافی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان استفاده شده است.

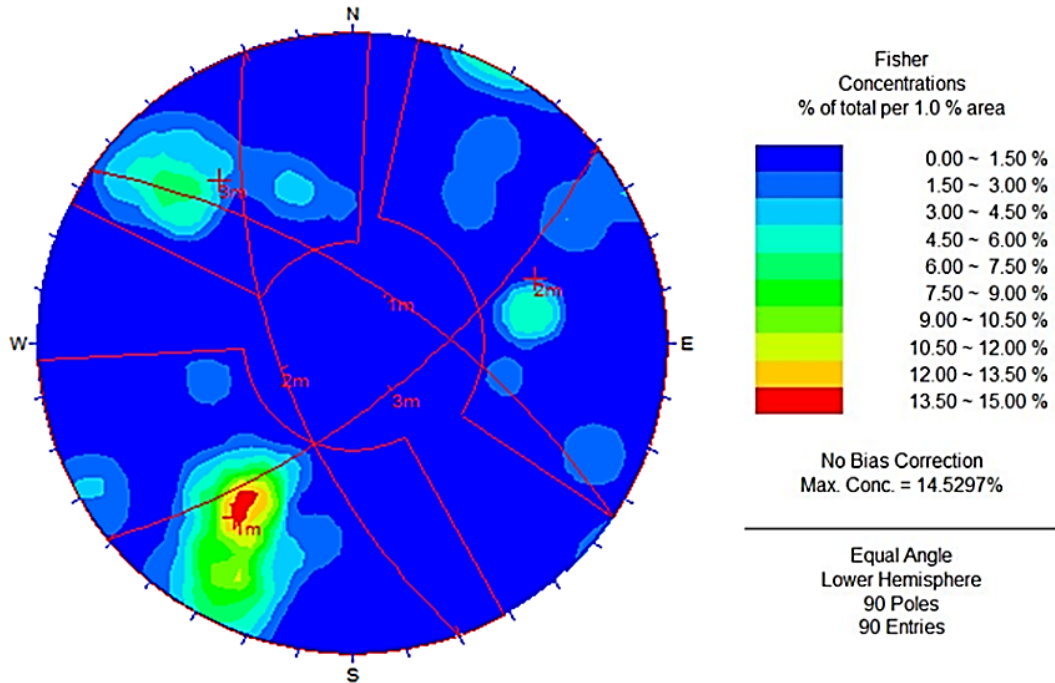
برای ساخت مدل DFN، ابتدا ویژگی‌های مربوط به داده‌های درزه‌نگاری اعم از بازشدگی، فاصله‌داری، چگالی درزه‌ها و نظایر آن حاصل از منطقه پیش‌پردازش شدند. در مرحله اول کل درزه‌های موجود در منطقه به سه دسته، درزه‌های با شیب بیشتر از ۴۵ درجه به عنوان درزه‌های شبه عمودی، درزه‌های با شیب کمتر از ۴۵ درجه به عنوان درزه‌های شبه افقی و درزه‌های لایه‌بندی تقسیم‌بندی می‌شوند، سپس با استفاده از نرم‌افزار Dips این دسته‌درزه‌ها هر کدام به دسته‌های مجزا تقسیم‌بندی شده و در نهایت درزه‌های شبه افقی به سه دسته، درزه‌های شبه عمودی به دو دسته درزه و دسته درزه لایه‌بندی دارای یک دسته درزه است که در شکل‌های ۲ تا ۴ دیده می‌شود.

مرده تعبیر می‌شوند [۳۲]. فیلتر کردن شکستگی‌های غیرهادی که عمدتاً بسیار کوچک‌اند و در خلال مدل‌سازی DFN به وجود می‌آیند به علت نبود ارتباط موثر میان آن‌ها منتقل‌کننده جریان نیستند. یکی از مهم‌ترین مراحل محاسباتی در مدل‌سازی جریان با استفاده از روش DFN حذف این شکستگی‌ها است.

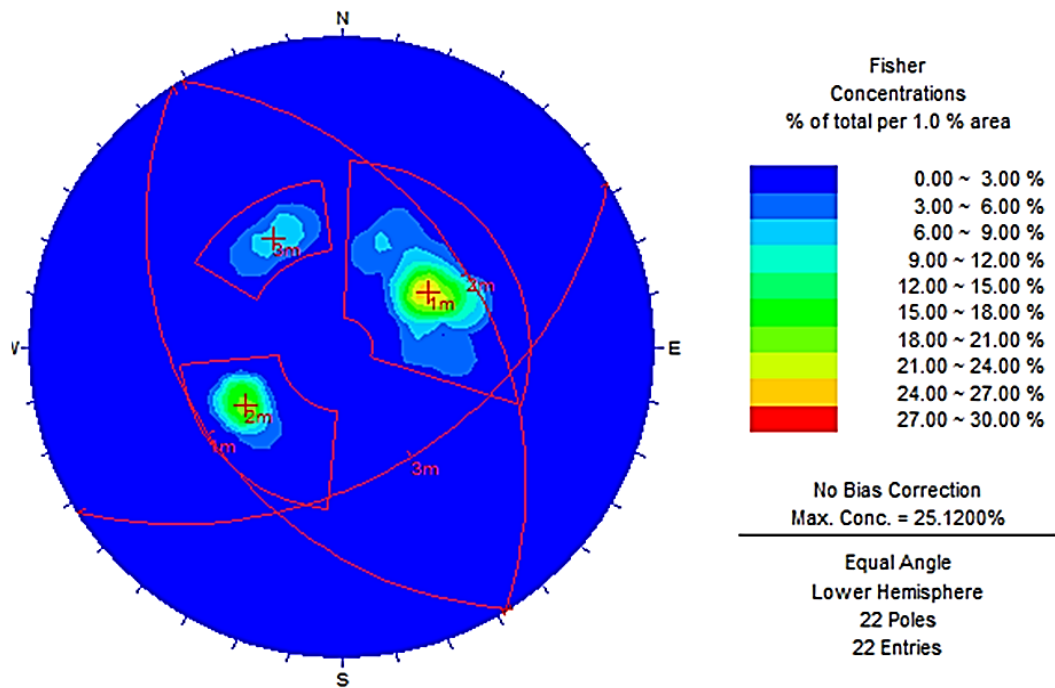
### ۳-۱- انواع شبکه شکستگی

یک شبکه شکستگی مجزا گروهی از صفحات (سه‌بعدی) یا خطوط (دو‌بعدی) است که معرف شکستگی‌ها است. هر شبکه شکستگی شامل حداقل یک دسته شکستگی است اما می‌تواند تعداد بیشتری نیز داشته باشد [۱۳]. به طور کلی شبکه شکستگی به صورت دو‌بعدی و سه‌بعدی ایجاد می‌شود. برای نمایش شبکه شکستگی دو‌بعدی معمولاً از یک سری خطوط ناپیوسته متقاطع بر روی صفحه استفاده می‌شود. مدل‌های سه‌بعدی با انواع مختلفی از شکل‌های هندسی شکستگی تولید شده است. شکل شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی ممکن است به صورت متعامد نامحدود، صفحات نامحدود، صفحات چند ضلعی، دیسک‌های دایره‌ای، صفحات بیضوی باشد که ساده‌ترین این مدل‌ها صفحات نامحدود متعامد است. مدل دیسک‌های دایره‌ای به طور گسترده‌ای در مدل‌سازی هیدرولیکی توده سنگ استفاده می‌شود [۳۳].

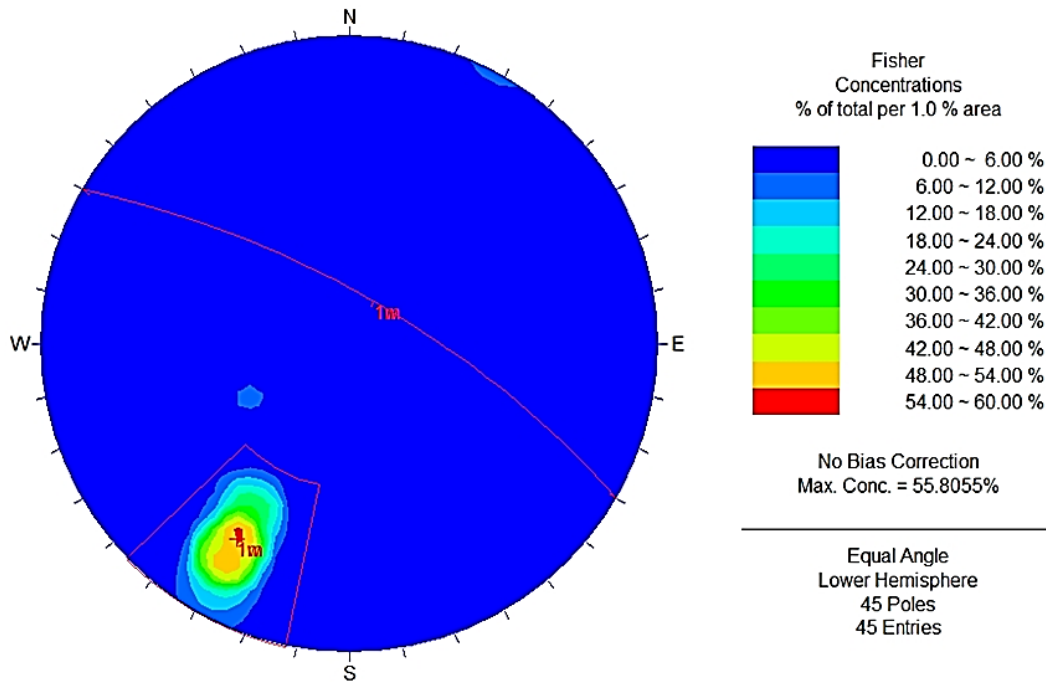
(a) در شبیه‌سازی سه‌بعدی شبکه شکستگی‌های مجزا، عموماً شکستگی به صورت دیسک‌های دایره‌ای شکل همراه با یک نقطه به عنوان مرکز آن شکستگی مدل می‌شود که این دیسک‌ها حامل ویژگی‌هایی از شکستگی‌ها، از قبیل بازشدگی، جهت‌گیری که خود شامل شیب نسبت به افق و جهت شیب و همچنین



شکل ۲- نمودار منحنی تراز دسته درزه‌های شبه عمودی



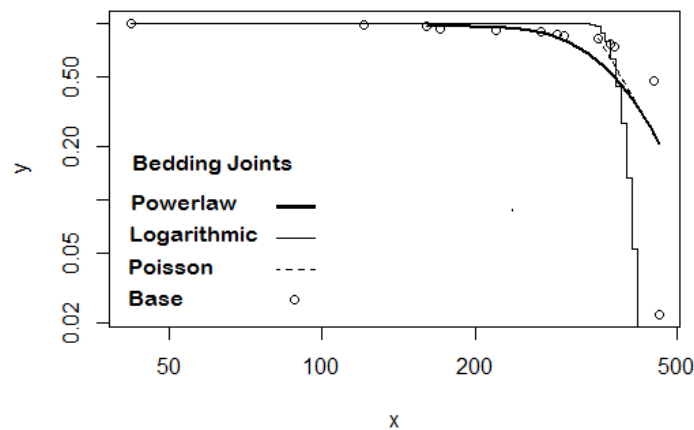
شکل ۳- نمودار منحنی تراز دسته درزه‌های شبه افقی



شکل ۴- نمودار منحنی تراز دسته درزه‌های لایه‌بندی.

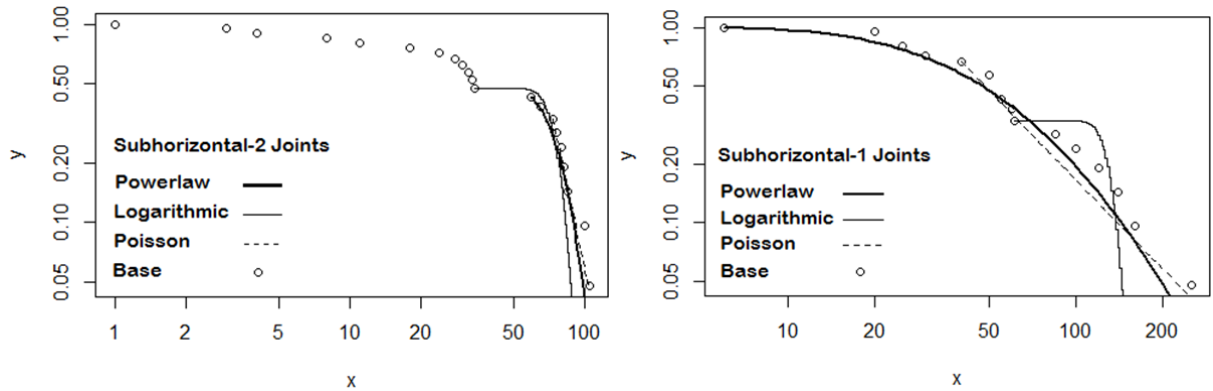
پواسون، توانی و لگاریتمی بر روی داده‌ها استفاده شده است. نتایج مربوط به مطابقت آن‌ها در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

بعد از استخراج تعداد دسته درزه‌ها، توزیع احتمال مربوط به درزه‌ها برای مدلسازی در DFN تعیین شده است. بدین منظور از نرم‌افزار آماری R استفاده شده است. برای تعیین بهترین و سازگارترین توزیع آماری بر روی داده‌ها از سه توزیع

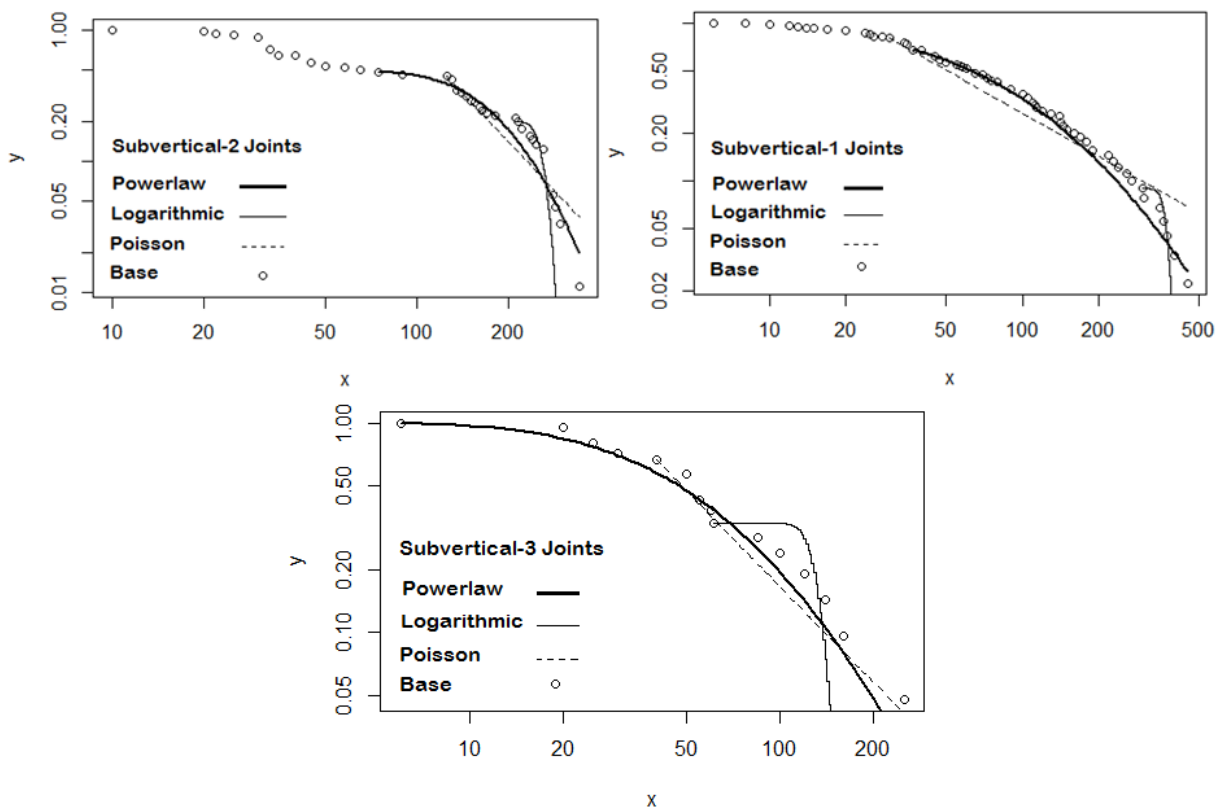


شکل ۵- نتایج تطبیقی پایایی طول درزه‌ها با توزیع‌های آماری (توانی<sup>۱</sup>، لگاریتمی<sup>۲</sup> و پواسون<sup>۳</sup>) برای درزه‌های لایه‌بندی.

<sup>1</sup>Poisson distribution  
<sup>2</sup>Logarithmic distribution  
<sup>3</sup>Power law distribution



شکل ۶- نتایج تطبیقی پایایی طول درزه‌ها با توزیع‌های آماری (توانی، لگاریتمی و پواسون) برای درزه‌های شبه افقی.



شکل ۷- نتایج تطبیقی پایایی طول درزه‌ها با توزیع‌های آماری (توانی، لگاریتمی و پواسون) برای درزه‌های شبه عمودی.

ترین قسمت‌های کد مربوط به DFN، فیلتر شکستگی‌های کوچکتر از ۱ متر است. اساس این فیلتر بر پایه تاثیر بسیار کم نقش شکستگی‌های کوچک در انتقال جریان است. همواره در تولید شکستگی‌ها در مدل تعداد زیادی شکستگی‌های با ابعاد بسیار کوچک ایجاد می‌شود که از طرفی جریان سیال، به دلیل نبود ارتباط بین آن‌ها در این نواحی اتفاق نمی‌افتد و از طرف دیگر باعث بالا رفتن قابل توجه حجم و زمان محاسبات می-

همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود عمدتاً بیشترین مطابقت بین داده‌ها و توزیع‌های رسم شده مربوط به توزیع توانی ماست. پیشنهاد خود نرم‌افزار 3DEC برای داده‌های سنگی و محیط شکسته برای مدلسازی نیز توزیع توانی است [۲۹].

### ۳-۳- ساخت شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)

بعد از پیش‌پردازش بر روی داده‌های منطقه، شبکه شکستگی‌های مجزا یا همان DFN تولید می‌شود. یکی از مهم-

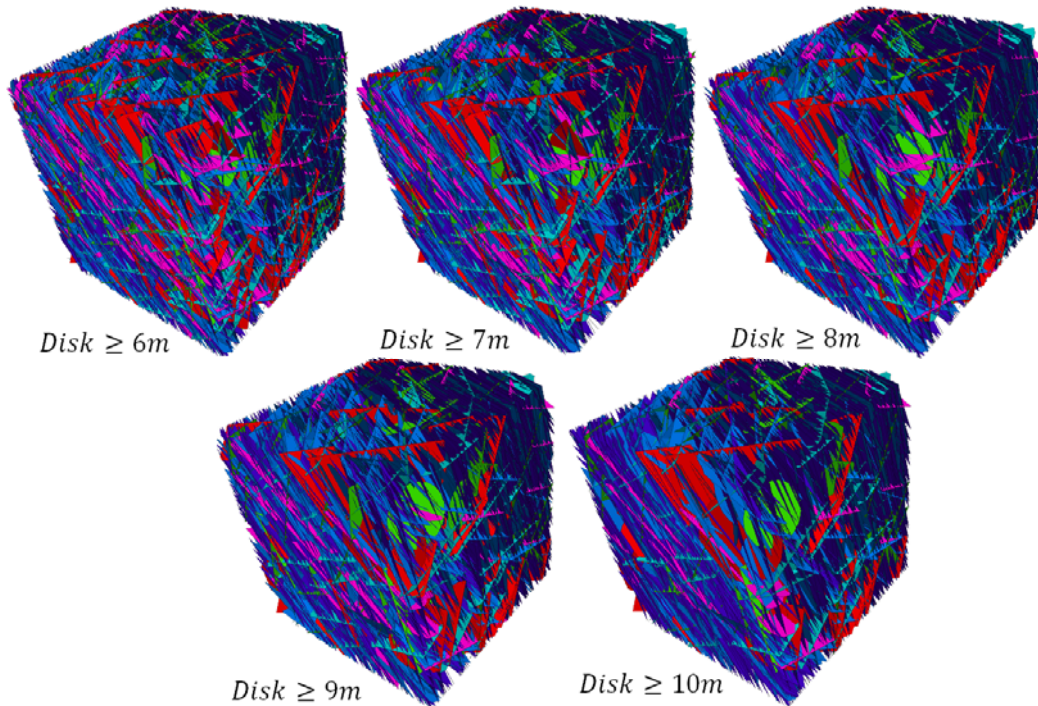


وارد کدهای DFN شده است [۳۰]. همچنین میزان سطح کاملاً صاف در نظر گرفته شده است. بازشدگی درزه‌ها به صورت متغیر و از ۲ میلی‌متر تا ۲ سانتی‌متر با استفاده از توزیع پواسون در نظر گرفته شده است.

پنج DFN سه‌بعدی با ابعاد ۱۰۰ متر در هر بعد در شکل ۸ دیده می‌شود که در هر کدام فیلترهایی با اندازه‌های مختلف برای حذف شکستگی‌های کوچک اعمال شده است. در شکل ۸ به عنوان مثال منظور از عبارت  $Disk \geq 6$  به این معنی است که در ساخت این dfn دیسک‌های کوچکتر از ۶ متر حذف شده‌اند که این مساله به این دلیل است که به این طریق می‌توان شکستگی‌های کوچک را حذف کرد و حجم انجام محاسبات را به طرز قابل توجهی کاهش داد بدون اینکه به نتایج حاصل خدشه‌ای وارد شود.

شود. از این رو بعد از ایجاد شکستگی‌ها در مدل فیلتری اعمال شده است که شکستگی‌های کوچک از مدل بلوکی حذف شوند.

برای ساخت DFN، یکی از عوامل تاثیرگذار بر روند به دست آوردن هدایت هیدرولیکی، چگالی شکستگی است. تابع توزیع توانی به عنوان تابع توزیع استفاده شده است [۳۰]. مقدار طول شکستگی‌ها به اندازه ۰٫۲ تا ۵۰ متر در نظر گرفته شده است زیرا در مرحله ساخت DFN صرفاً هدف ایجاد شبکه‌ای از شکستگی‌ها بوده است که در ادامه با استفاده از مدل REV این ابعاد و طول شکستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شیب شکستگی‌ها در حالت کلی به سه دسته: شکستگی‌های مربوط به سنگ بستر، شکستگی‌های شبه عمودی و شبه افقی در نظر گرفته شده است که عدد فیشر آن با استفاده از نرم‌افزار Dips به دست آمده و با استفاده از توزیع لگاریتمی



شکل ۸- مدل بلوکی DFN با فیلترهای مختلف برای شکستگی‌های با اندازه‌های مختلف.

بیشترین انطباق را با محیط و از طرف دیگر تا حد امکان کمترین شکستگی را داشته باشد بسیار مهم است. در این مطالعه و در ادامه سعی شده است مدلی سه‌بعدی از بلوک معرفی شود که در عین حال که بیشترین انطباق با محیط را دارد، کمترین زمان اجرای محاسبات و کمترین شکستگی را داشته باشد و بدین طریق مدلی از REV تعیین شود که بهینه باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود به تناسب فیلتر اعمال شده تعداد شکستگی‌های موجود در DFN کم و یا زیاد می‌شود به گونه‌ای که فیلتر ۶ متری شکستگی‌های بیشتری را در مدل ایجاد می‌کند. با بالا رفتن عدد فیلتر تعداد شکستگی‌ها کاهش می‌یابد. یکی از مسایل مهم در این رابطه زمان اجرای کد مربوط به جریان در مدل است که با تعداد شکستگی‌ها رابطه مستقیم دارد. از این رو اعمال فیلتری که بتواند از طرفی

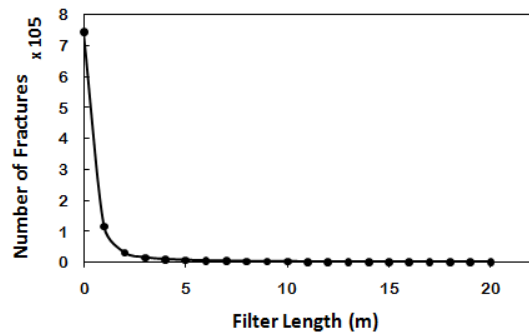
#### ۴- اندازه حجم نماینده

بعد از تحلیل اولیه بر روی داده‌های خام و ساخت شبکه شکستگی‌های مجزا نوبت به ساخت اندازه حجم المان نماینده یا همان REV می‌رسد. در این تحقیق سعی شده است، آنالیز حساسیت بر روی چند پارامتر مختلف که بر روی نتایج و زمان انجام محاسبات تاثیر به سزایی دارند مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت بهترین مدل و اندازه حجم نماینده ارایه شود، به گونه‌ای که از هر لحاظ قابل قبول و بهینه باشد.

شکل ۱۰ نموداری را نشان می‌دهد که در آن زمان مربوط به اجرای نرم‌افزار (برحسب ثانیه) به ازای ۱ میلیون سیکل برای بلوک‌های با ابعاد ۲ تا ۱۰ متر رسم شده است. هر منحنی مربوط به فیلترهای مختلف شکستگی‌ها از ۶ تا ۱۰ متر است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش عدد فیلتر (کاهش تعداد شکستگی‌ها) زمان اجرای مدل نیز کاهش می‌یابد. از آنجایی که تعداد شکستگی‌های در فیلترهای ۵ متر به بالا تفاوت قابل توجهی ندارند از این رو میزان زمان اجرای نرم‌افزار نیز به کندی کاهش می‌یابد زیرا از فیلتر ۶ متر به بعد عملاً شکستگی‌های بسیار کوچک حذف شده و شکستگی‌های اصلی باقی می‌مانند که می‌توانند بیشترین تاثیرگذاری را در جریان داشته باشند.

یکی از مسایلی که در ساخت REV بسیار مهم است، اشکالاتی است که در کار با نرم‌افزار المان مجزای 3DEC پیش می‌آید. در نرم‌افزارهای محیط پیوسته، پیوستگی مدل، به تنهایی باعث می‌شود که بسیاری از اشکالات به وجود نیاید، در حالی که محیط گسسته اینچنین نیست. یکی از مهم‌ترین مسایل، ابعاد مدل است که بسیار مهم است زیرا با افزایش ابعاد بلوک و همچنین تعداد شکستگی‌ها میزان اشکالات به وجود آمده در اجرای نرم‌افزار به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. این اشکالات در مراحل، ایجاد شکستگی‌ها، مش‌بندی، ساخت مدل بلوکی، نمایش DFN و REV ایجاد می‌شوند و باعث می‌شوند روند حل مساله با سختی‌هایی همراه شود. در این تحقیق از میان مدل‌های قابل طرح و بر اساس تجربه کاری پیشین بر روی نرم‌افزارهای محیط گسسته و به ویژه 3DEC سعی شده است که با استفاده از فیلترهای اعمال شده از ۶ تا ۱۰ متر و برای ابعاد ۲ تا ۱۰ متر بهترین و بهینه‌ترین REV استخراج شود.

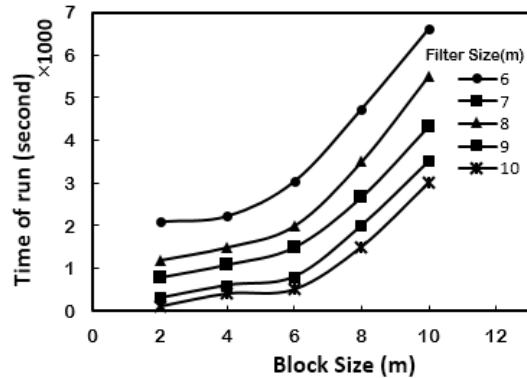
با استفاده از تحلیل بر روی داده‌های حاصل از مدلسازی در این مطالعه، در شکل ۹ نموداری رسم شده است که در آن تعداد شکستگی‌ها به ازای اعمال فیلترهای متعدد از صفر تا ۲۰ متر نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود هنگامی که فیلتری اعمال نشده است، تعداد شکستگی‌ها حدود ۷۴۳۴۷۷ است. با اعمال فیلتر یک متری تعداد شکستگی‌ها به عدد ۱۱۵۳۷۵ می‌رسد. مهم‌تر اینکه بعد از استفاده از فیلترهای ۲، ۳ و ۴ متری تعداد شکستگی‌ها به شدت کاهش یافته است به گونه‌ای که با اعمال فیلتر ۴ متری تعداد شکستگی‌ها به اندازه ۹۸/۸ کاهش یافته است و فقط ۱/۲ آن‌ها باقی می‌ماند. کاهش قابل توجه تعداد شکستگی‌ها با اعمال فیلترهای حذف‌کننده کوچک مانند یک، دو تا چهار متری نشان‌دهنده تعداد بسیار زیاد شکستگی‌های کوچک و افزایش سرعت حل مساله در صورت حذف این شکستگی‌ها است. این مساله زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که این تعداد شکستگی بدون اینکه تاثیر قابل توجهی در نتایج محاسبات داشته باشد (به دلیل عدم ارتباط موثر بین آن‌ها) باعث افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات شود به گونه‌ای که برای انجام محاسبات مربوط به جریان نیاز به سخت‌افزار بسیار قوی‌تر و زمان بسیار بیشتری است. بنابراین یکی از رویه‌های عادی در ساخت هر DFN اعمال فیلتر برای حذف شکستگی‌های بسیار کوچک بعد از ایجاد آن است. در این مطالعه برای ساخت مدل بلوکی REV از DFN های با فیلترهای ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ متری استفاده شده است و تحلیل‌ها بر روی آن‌ها انجام شده است که در آن‌ها شکستگی‌ها بعد از اعمال فیلتر از ۷۴۳۴۷۷ کاهش یافته و به ترتیب به اعداد ۴۳۱۲، ۳۱۹۶، ۲۴۲۸، ۱۸۹۴ و ۱۵۰۰ تقلیل یافته است. از نزدیکی تعداد شکستگی‌ها در فیلترهای با اندازه‌های بزرگتر پیداست که تعداد شکستگی‌های بزرگ در مدل ساخته شده به تدریج کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.



شکل ۹- فیلترهای اعمال شده بر روی مدل بلوکی DFN و تعداد شکستگی‌های باقیمانده بعد از اعمال آن.

مدل بلوکی است، به گونه‌ای که با افزایش هر یک از آن‌ها به ویژه تعداد شکستگی‌ها، تعداد سیکل مورد نیاز برای اشباع مدل افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند.

نمونه‌ای از یک مدل بلوکی سه‌بعدی در اندازه‌های مختلف ۴، ۶ و ۷ متر و با حذف شکستگی‌های کمتر از ۶ متر در سیکل ۱۰۰ هزار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. منظور از سیکل تعداد حل مساله است که به ازای آن و طی سیکل‌های بالاتر مدل در هر مرحله به سمت اشباع‌شدگی بیشتری حرکت می‌کند تا در نهایت در سیکل حل مشخصی مدل کاملاً اشباع از آب می‌شود. همان‌طور دیده می‌شود مدل ۲ متری در سیکل ۱۰۰ هزار اشباع از آب شده است و این بدین معنی است که می‌توان خواص هیدرولیکی محیط را از آن استخراج کرد، این در حالی است که مدل‌های با اندازه‌های دیگر در این سیکل، آب به درون آن‌ها نفوذ نکرده است و این اتفاق برای آن‌ها در سیکل‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. طی کردن سیکل بیشتر به معنی زمان بیشتر است.



شکل ۱۰- زمان محاسبه جریان به ازای ۱ میلیون سیکل و برای فیلترهای ۶ تا ۱۰ متری

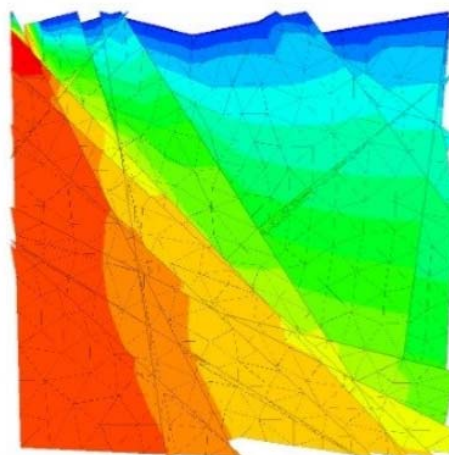
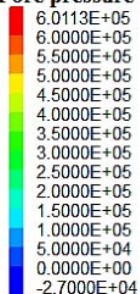
#### ۴-۱- تاثیر تعداد شکستگی‌ها بر سیکل اشباع

یکی از مهم‌ترین عوامل در استخراج مدلی که بتواند به بهترین شکل گویای خواص هیدرولیکی باشد، سیکل اشباع است. سیکل اشباع بیان‌کننده سیکلی از اجرای مدل است که به ازای آن سیکل، مدل REV به صورت کامل اشباع از آب می‌شود. در این حالت می‌توان خواص هیدرولیکی محیط اشباع از جمله هدایت هیدرولیکی را به درستی استخراج کرد. دو عامل مهم و تاثیرگذار بر سیکل اشباع تعداد شکستگی‌ها و ابعاد

**3DEC DP 5.00**  
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 100000  
8/19/2018 7:48:45 AM

**Pore pressure**

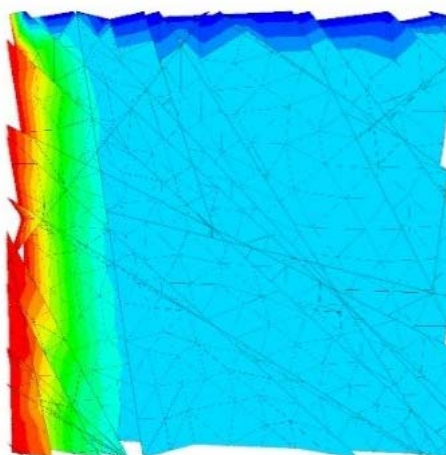
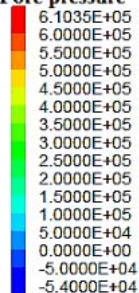


(ف)

**3DEC DP 5.00**  
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 100000  
8/19/2018 8:13:30 AM

**Pore pressure**

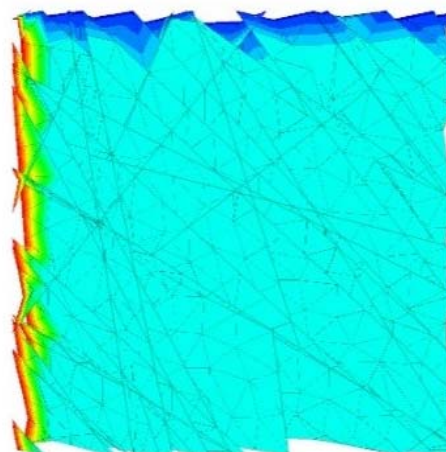
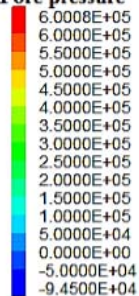


(ب)

**3DEC DP 5.00**  
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 100000  
8/19/2018 8:05:38 AM

**Pore pressure**



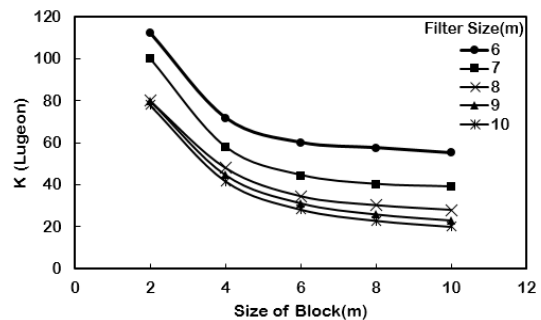
(پ)

شکل ۱۱- نحوه اشباع مدل بلوکی سه بعدی با ابعاد الف- ۲ متر، ب- ۴ متر و پ- ۷ متر و فیلتر حذف شکستگی‌های کمتر از ۶ متر در سیکل ۱۰۰ هزار

بلوک‌هایی با اندازه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر ساخته شد. بعد از رسیدن به سیکل یک میلیون در بلوک وقتی که بلوک به صورت محیطی اشباع از آب تبدیل شد، خواص هیدرولیکی

برای بررسی بیشتر تاثیر ابعاد بلوک‌ها و تاثیر میزان شکستگی‌ها و به دست آوردن مدل بلوکی بهینه از میان آن‌ها بعد از ساخت DFN برای ۵ فیلتر با ابعاد یاد شده، در هر DFN

مربوط به محیط مورد نظر استخراج شد. برای تحلیل هر چه بهتر نتایج، نمودار مربوط به شکل ۱۲ با استفاده از خروجی نرم افزار رسم شد.



شکل ۱۲- هدایت هیدرولیکی مربوط به مدل بلوکی با فیلترهای ۶ تا ۱۰ متر برای بلوک‌های با اندازه‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر.

در نمودار شکل ۱۲ چند نکته مورد توجه است که به ترتیب زیر بیان می‌شود:

۱- با افزایش مقدار فیلتر حذف‌کننده شکستگی‌های کوچک مقدار هدایت هیدرولیکی نیز کاهش می‌یابد. این مساله به این دلیل است که وقتی شکستگی‌های واقعی در بلوک ساخته شده باقی می‌ماند، باعث می‌شود که جریان واقعی که در طبیعت اتفاق می‌افتد در مدل نیز به وقوع بپیوندد. توضیح اینکه در طبیعت در اعماق زیاد شکستگی‌های بسیار ریز که اغلب ناشی از فرسایش سنگ است، دیده نمی‌شود و این مساله باعث می‌شود، شکستگی‌های واقعی که عمدتاً نیز بزرگ‌اند، حامل جریان آب باشند. در مدل بلوکی‌های ساخته شده در این تحقیق نیز این مساله با اعمال فیلترهای مختلف حذف‌کننده شکستگی‌های کوچک به دست می‌آید.

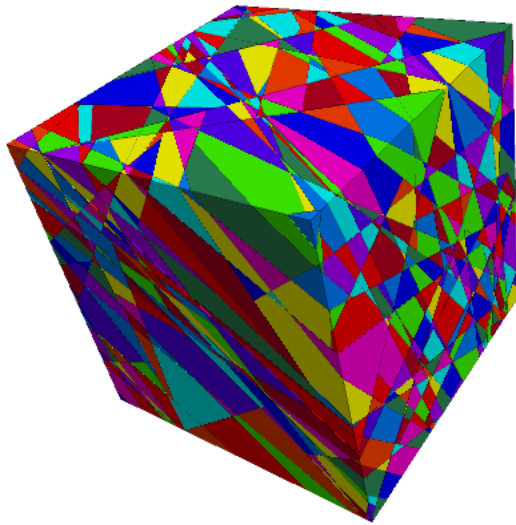
۲- با بزرگ شدن مقدار فیلتر رفته رفته کار به جایی می‌رسد که بزرگی فیلتر تقریباً تأثیری بر روند میزان تثبیت هدایت هیدرولیکی و نزدیک شدن آن به مقدار واقعی ندارد. در شکل ۱۲ مشهود است که در فیلترهای ۸ متر به بعد تقریباً شرایط به سمت حالتی پایا حرکت می‌کند که می‌توان گفت که از بین مقادیر ۸ تا ۱۰ متر می‌توان هر سه را به عنوان فیلتر انتخاب کرد. از آنجایی که کار با فیلتر ۱۰ متر هم از نظر زمان هم از نظر مشکلات کار در محیط گسسته آسان‌تر است از این رو فیلتر ۱۰ متری به عنوان بهینه انتخاب می‌شود.

۳- چنانچه فیلتر شکستگی‌ها بیش از حد بزرگ انتخاب شود، باعث می‌شود که تعداد شکستگی‌ها بیش از حد کاهش یابد

و همین مساله باعث عدم انطباق مدل با محیط واقعی می‌شود (این عدم انطباق با استفاده از مقایسه نتایج خروجی نرم افزار و برداشت‌های برج و دید مهندسی نسبت به مساله مورد نظر فهمیده می‌شود) زیرا هنگامی که شکستگی‌ها کاهش چشمگیری داشته باشد، باعث می‌شود که شکستگی‌های موجود در بلوک حتی از محیط واقعی زمین-شناسی نیز کمتر شود و بنابراین هدایت هیدرولیکی به دست آمده دیگر منطبق با محیط واقعی نباشد. از طرف دیگر مدل با فیلتر ۸ تا ۱۰ متر هم از نظر کار با 3DEC آسان است و هم از نظر مدت زمان اجرا کاملاً توجیه‌پذیر است و زمان کمی صرف اجرای آن می‌شود.

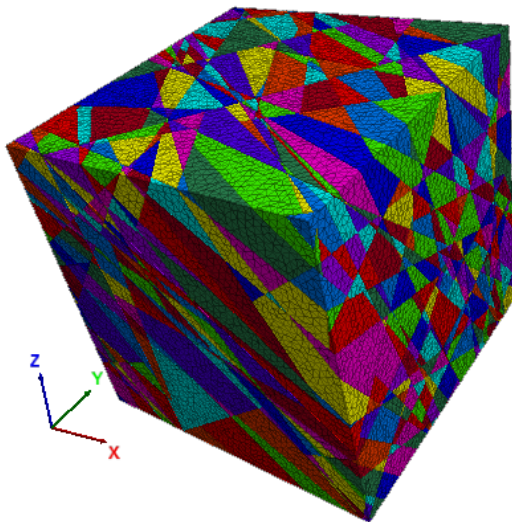
۴- با افزایش ابعاد بلوک‌ها، مقدار هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این مساله ناشی از لامینار شدن جریان در ابعاد بزرگتر به دلیل طولانی شدن مسیر عبور است. در این برای حذف اثر ابعاد بلوک در مقدار هدایت هیدرولیکی باید عددی به عنوان اندازه مورد قبول در نظر گرفته شود که مقادیر بیشتر از آن تأثیر آنچنانی بر مقدار K نداشته باشد (اصطلاحاً نتایج مستقل از اندازه بلوک باشند). در این نمودار وقتی ابعاد بلوک از ۷ متر عبور می‌کند، تقریباً K به حالت پایا نزدیک می‌شود. از آنجایی که هدف این تحقیق به دست آوردن مقدار بهینه‌ای برای بلوک است، بلوک با ابعاد ۷ یا ۸ به عنوان نماینده و مقدار مورد قبول تعیین می‌شود.

برای بررسی بیشتر روند هدایت هیدرولیکی نمودار شکل ۱۳ رسم شده است. این نمودار به تفکیک اندازه بلوک‌ها رسم شده است، به گونه‌ای که نمودارها به ترتیب از بالا به پایین بیان‌کننده هدایت هیدرولیکی متناسب با اندازه بلوک‌ها به ترتیب از ۲ تا ۱۰ متر است. مشهود است در بلوک‌های با اندازه ۲ متر و برای فیلترهای ۶ تا ۱۰ متر مقدار هدایت هیدرولیکی تقریباً ثابت و تغییرات مربوط به آن نامحسوس است. این مساله برای بلوک‌های با اندازه ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر نیز دیده می‌شود. نکته حایز اهمیت که در بخش قبل هم دیده می‌شد، کارایی نداشتن بلوک‌های با اندازه ۲ متر در تعیین هدایت هیدرولیکی واقعی است زیرا این بلوک‌ها دیدگاهی غیرواقعی از هدایت هیدرولیکی را ارائه می‌دهند (به عبارت دیگر K مستقل از ابعاد نیست) ولی با افزایش ابعاد بلوک مقادیر K به مقدار پایا نزدیک‌تر می‌شود.



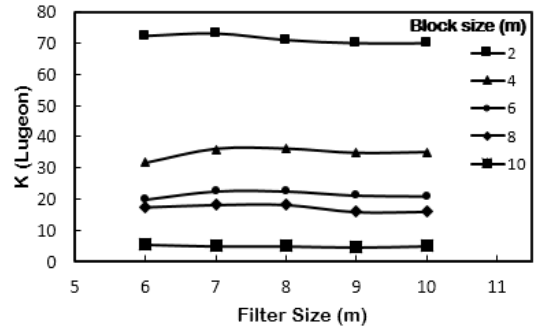
شکل ۱۵- مدل بلوکی شکستگی‌ها با ابعاد ۷ متر

در شکل ۱۶ نحوه مش‌بندی مدل بلوکی دیده می‌شود.



شکل ۱۶- مدل بلوکی ۷ متری مش‌بندی شده

برای محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی مدل و به دست آوردن مقادیر مولفه‌های تانسور  $K$ ، هد هیدرولیکی به عنوان شرایط مرزی به مدل اعمال می‌شود. به ترتیب در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  مربوط به یک دیواره از بلوک هد هیدرولیکی اعمال و در دیواره مقابل فشار صفر لحاظ می‌شود. نکته مهم در این باره این است که بر طبق روابط جریان هدایت هیدرولیکی یک ویژگی مربوط به فیزیک منطقه است و به مواردی از قبیل فشار و نظایر آن وابسته نیست. از این رو اعمال فشار صفر در بخش خروجی این مدل‌ها لزوماً نباید صفر در نظر گرفته شود و هر عددی را می‌تواند شامل شود، سپس میزان جریان و هدایت

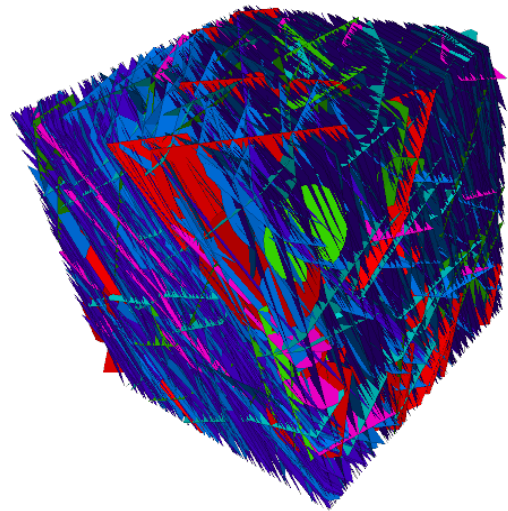


شکل ۱۳- هدایت هیدرولیکی به تفکیک ابعاد بلوک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر) برای فیلترهای ۶ تا ۱۰ متری.

#### ۲-۴- ساخت مدل REV بهینه

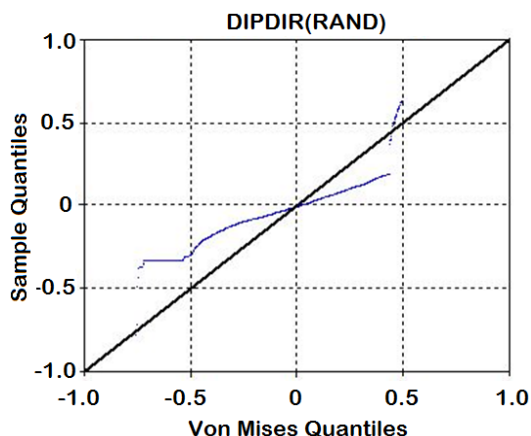
با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این بخش به شبیه‌سازی بهینه‌ترین مدل بلوکی شبکه شکستگی‌های مجزا پرداخته خواهد شد.

ابتدا DFN مربوط به داده‌های منطقه ساخته می‌شود. در این قسمت از مدل DFN ده متری مطابق با شکل زیر استفاده شده است.

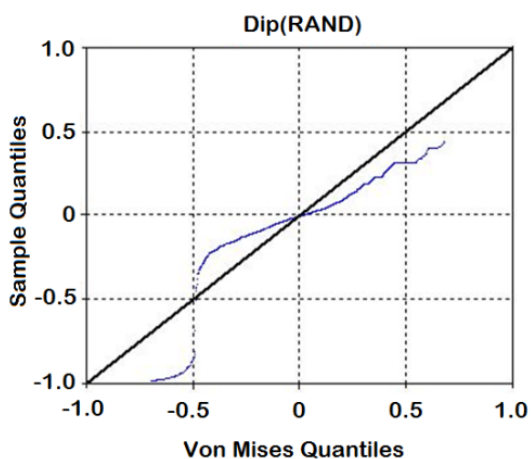


شکل ۱۴- مدل DFN سه‌بعدی با ابعاد ۱۰ متر

در ادامه مدل بلوکی مربوط به شکستگی‌ها با ابعاد ۷ متر که به عنوان ابعاد بهینه انتخاب شده است به صورت شکل ۱۵ حاصل می‌شود.



شکل ۱۷- تطبیق داده‌های جهت شیب تولید شده به صورت تصادفی با توزیع ون مایسز.



شکل ۱۸- تطبیق داده‌های جهت شیب تولید شده به صورت تصادفی با توزیع ون مایسز

پس از بررسی صحت استفاده از آزمون واتسون- ویلیامز نوبت به ارزیابی داده‌های تولید شده با روش DFN و داده‌های برداشت شده از منطقه است. جدول ۱ نتایج این آزمون را نشان می‌دهد. انحراف معیار نمونه‌های آزمایش شده مقادیر بسیار پایینی دارد. در جدول ۱، F مقدار انحراف معیار از توزیع فیشر را نشان می‌دهد، df مقدار درجه آزادی دو نمونه‌ای است که با هم مقایسه می‌شوند و P مقداری است که باید بیشتر از ۰/۰۵ باشد تا دو دسته داده قابل انطباق با هم باشند.

در واقع در این تحقیق از آزمون واتسون- ویلیامز و نرم‌افزار Oriana برای بررسی میزان تطابق داده‌ها با داده‌های واقعی استفاده شده است که این بررسی با شکل‌های ۱۷ و ۱۸ و جدول ۱ به اثبات می‌رسد. بنابراین می‌توان به راحتی از نتایج خروجی این نرم‌افزار برای بررسی وضعیت منطقه استفاده کرد. نکته مهم اینکه داده‌های منطقه مورد بررسی با استفاده از تست لوژان در نواحی مختلف برداشت شده‌اند. این داده‌ها با

هیدرولیکی محیط شکسته با استفاده از روابط یاد شده به دست آمده است. اعمال هد در یک دیواره از مدل، در هر سه راستا جریان را نتیجه خواهد داد. بنابراین به ترتیب اعمال هد هیدرولیکی در راستای x، مولفه‌های Kxx، Kxy و Kxz از تانسور K را تعیین می‌کند. به طور مشابه، اعمال هد هیدرولیکی در راستای y منجر به محاسبه مولفه‌های Kyx، Kyy و Kyz از تانسور ضرایب هدایت هیدرولیکی می‌شود. در نهایت سه مولفه باقیمانده از ضرایب هدایت هیدرولیکی از اعمال هد هیدرولیکی در راستای z و محاسبه جریان در سه راستای x، y و z نتیجه می‌شود.

مولفه‌های مربوط به تانسور هدایت هیدرولیکی بر حسب لوژن به شکل رابطه ۴ حاصل می‌شود.

$$K = \begin{bmatrix} 17 & 5.5 & 6.5 \\ 6.9 & 12.3 & 6.7 \\ 7.5 & 6.5 & 9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

رابطه تبدیل این مولفه‌ها از متر بر ثانیه بر حسب لوژن طبق رابطه ۵ انجام می‌شود [۳۱]:

$$1Lu = 1.3 \times 10^{-5} \text{ m/s} \quad (5)$$

#### ۴-۲-۱- صحت‌سنجی نتایج

برای ارزیابی نتایج و صحت‌سنجی مدل DFN و به تبع آن REV ساخته شده و انتخاب بهترین نتیجه، از آزمون واتسون- ویلیامز استفاده شده است. آزمون واتسون ویلیامز، آزمونی آماری است که با استفاده از آمار و احتمالات و روش مطابقت دادن با تست ون مایسز به بررسی صحت داده‌های ورودی و خروجی می‌پردازد. در واقع اساس این روش با مطابقت دادن و تغییر داده‌ها طی فرآیند تولید است [۳۵ و ۳۶]. استخراج اطلاعات مربوط به درزه‌ها در نرم‌افزار 3DEC بعد از ساخت هر DFN انجام شد. با استفاده از آزمون واتسون- ویلیامز، از میان دوازده DFN ساخته شده که مورد ارزیابی قرار گرفت، یک DFN که بیشترین انطباق را با نتایج داده‌ها داشت در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آورده شده است. شرط استفاده از آزمون واتسون- ویلیامز این است که داده‌های آماری مورد آزمون بر یکی از دو توزیع ون مایسز و یا یکنواخت منطبق باشد. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودار تطبیق داده‌ها بر توزیع ون مایسز نشان داده شده است. این شکل‌ها به ترتیب مربوط به تطبیق داده‌های جهت شیب و جهت شیب تولید شده با نرم‌افزار 3DEC است.

در محل باشد را با استفاده از آن بیان می‌کنند. نکته مهم اینکه با استفاده از روش‌های عددی مانند DFN می‌توان بدون انجام آزمایش لوژان و تنها با داشتن خواص فیزیکی منطقه میزان هدایت هیدرولیکی را به دست آورد و این نقطه عطف و تفاوت چشمگیر این روش با برداشت‌های برجاست.

حفر گمانه‌های عمیق تا عمق ۴۰۰ متر در بعضی نواحی تست شده‌اند و نتایج این آزمایش در جای جای اطراف مغار برداشت انجام گرفته است. اساساً در آزمایش لوژان داده‌ها با انجام تست های برجا در محل برداشت شده و با استفاده از یک تقریب مهندسی میزان لوژان کلی موجود در منطقه که بیانگر واقعیت

جدول ۱- نتایج آزمون واتسون- ویلیامز

متغیرهای آزمایش شده با نرم‌افزار Oriana	F	P	df1	df2	میانگین تخمین زده شده
DIP(Rand)&DIP(20610&157)	۰٫۳۷۱	۰٫۵۴۳	۱	۱۷۱۸	۳۸٫۸۷۲
DIPDIR(Rand)&DIPDIR(20610&157)	۱٫۲۱۵	۰٫۲۷	۱	۱۷۱۸	۶۷٫۹۹۱

شکستگی‌ها و ابعاد مدل بلوکی از جمله عواملی است که تاثیر بسزایی بر نشت و در روند شبیه‌سازی دارد. سایر عوامل مانند بازشدگی درزه‌ها، میزان زبری درزه‌ها، طول و شعاع درزه‌ها به صورت تحلیل حساسیت در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند ولی با استفاده از توزیع توانی به مدل وارد شده و در مدل DFN اعمال شده‌اند. بعد از ساخت مدل‌های متنوع با شکستگی‌های گوناگون از نظر تعداد و همچنین ابعاد، در نهایت نتیجه گرفته شد که مدلی که دارای ابعاد ۷ متر در سه بعد باشد و همچنین شکستگی‌های کوچکتر از ۱۰ متر در آن‌ها حذف شده باشد، می‌تواند به خوبی بیانگر خواص محیط شکسته باشد. این مساله زمانی اهمیت پیدا می‌کند که حجم عملیات محاسباتی در 3DEC نسبت به حالتی که این دو پارامتر اعمال نشود، از لحاظ زمانبر بودن و اشکالاتی که در حین اجرا پیش می‌آید، بیش از ۹۵ درصد متفاوت باشد. در طی روند مدلسازی از قابلیت‌های نرم‌افزار آماری R و همچنین Oriana نهایت استفاده شده است به گونه‌ای که مسایل آماری و همچنین صحت‌سنجی‌های لازم با استفاده از آن‌ها حل شده است. نکته مهم اینکه برای مدلسازی هر محیط دارای درزه و شکاف می‌توان از این روش استفاده کرد بدون اینکه به آزمایش لوژان با سختی‌های خاص آن متکی بود. این روش دیدی واقع-گرایانه از هدایت هیدرولیکی و به تبع آن نشت منطقه ارایه می‌دهد که به کمک آن می‌توان پروژه‌های بزرگ را به اجرا در آورد.

یکی از راه‌های بررسی صحت نتایج حاصل شده، مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های واقعی حاصل از منطقه است. در اطراف گمانه اکتشافی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد رودبار لرستان که از داده‌های آن در این تحقیق استفاده شده است، عمدتاً مقادیر هدایت هیدرولیکی بین ۱۰ تا ۲۰ لوژن حاصل شده است. داده‌ها شامل ۴ گمانه اصلی در کل منطقه است و یک تونل اکتشافی در بخش فوقانی مغار حفر شده است. داده های اصلی در این بخش برداشت شده‌اند. میانگین مقادیر لوژان در کل منطقه مورد برداشت شده بین ۱۰ تا ۲۰ استو به جز نواحی که اعداد غیر عادی مانند ۱۰۰ لوژان ارایه دادند. در بررسی‌های بیشتر مشخص شد این اعداد در مناطق به شدت خرد شده و بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی بوده‌اند. نکته‌ای که حایز اهمیت است این است که اساساً در تست لوژن نمی‌توان مقادیر هدایت هیدرولیکی را به صورت تانسور به دست آورد ولی مزیت استفاده از این روش این است که می‌توان با برداشت اطلاعات مربوط به درزه‌ها مقادیر آن را به صورت تانسور تبدیل کرد. در گالری اکتشافی یکی دو ناحیه از نظر هدایت هیدرولیکی غیرعادی بودند که طی بررسی‌های بیشتر میدانی این نتیجه حاصل شد که این افزایش غیرعادی لوژن ناشی از ضعف ساختاری در محدوده کوچکی از منطقه است. در نهایت اینکه نتایج حاصل از تحقیق مطابق با برداشت‌های منطقه بوده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل بر میزان نشت یعنی هدایت هیدرولیکی پرداخته شده است. مدل کردن یک محیط به عوامل مختلفی وابسته است که هر کدام به تنهایی می‌تواند تاثیر جداگانه‌ای داشته باشد. از این رو در این تحقیق به دو عامل مهم پرداخته شده است. تعداد

## ۶- نمادها

جدول ۲- نمادها.

نماد	واحد	شرح
$Q$	$m^3/s$	حجم آب ورودی به داخل یک متر از تونل
$K$	$m/s$	هدایت هیدرولیکی



۱۳. باغبان. ع، جولای. الف، ۱۳۸۹؛ "تولید شبکه شکستگی مجزا در فضای سه بعدی"، چهاردهمین همایش انجمن زمین شناسی، ارومیه.

14. Long, J., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A., 1985. *A Model for Steady Fluid Flow in Random Three-Dimensional Networks of Disc-Shaped Fractures*. *Water Resources Research*, 21(8), pp.1105-1115.
15. Pollard, D.D., 1976. *On the form and stability of open hydraulic fractures in the Earth's crust*. *Geophysical Research Letters*, 3(9), pp.513-516.
16. Dershowitz, W.S., Lee, G., Geier, J., Hitchcock, S. and La Pointe, P., 1993. *User documentation: Fracman discrete feature data analysis, geometric modelling*.
17. Stratford, R.G., Herbert, A.W. and Jackson, C.P., 1990. *A parameter study of the influence of aperture variation on fracture flow and the consequences in a fracture network*. *Rock joints*. Rotterdam: Balkema, pp.413-22.
18. Herbert, A.W., 1996. *Modelling approaches for discrete fracture network flow analysis*. *Developments in Geotechnical Engineering*, 79, pp.213-229.
19. Pan, J.B., Lee, C.C., Lee, C.H., Yeh, H.F. and Lin, H.I., 2010. *Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock*. *Engineering Geology*, 116(1-2), pp.166-177.
20. Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A., 1982. *Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures*. *Water Resources Research*, 18(3), pp.645-658.
21. Wang, M. and Kulatilake, P.H.S.W., 2008. *Understanding of hydraulic properties from configurations of stochastically distributed fracture networks*. *Hydrological Processes*, 22(8), pp.1125-1135.
22. Chen, Y.F., Zheng, H.K., Wang, M., Hong, J.M. and Zhou, C.B., 2015. *Excavation-induced relaxation effects and hydraulic conductivity variations in the surrounding rocks of a large-scale underground powerhouse cavern system*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, pp.253-267.

فشار هیدرولیکی	Pa	$P$
طول شکستگی	m	$L$
شتاب گرانش	$m/s^2$	$g$
چگالی آب	$Kg/m^3$	$\rho_w$

#### منابع و مراجع

1. Tolman, C.F., 1937. *Ground water: New York, McGraw-Hili Book Co*.
2. Meinzer, O.E., 1934. *The history and development of ground-water hydrology*. *Washington Academy of Sciences*.
3. Muskat, M., 1937. *The Flow Of Homogeneous Fluids Through Porous Media: Analogies With Other Physical Problems*.
4. Jacob, C.E., 1950. *Flow of ground water, Engineering Hydraulics H. Rouse*, 321–386.
5. Theis, C.V., 1935. *The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), pp.519-524.
6. Lane, E.W., 1935. *Security from under-seepage-masonry dams on earth foundations*. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), pp.1235-1272.
7. Kashef, A.A.I., Touloukian, Y. and Fadum, R.E., 1951. *Numerical Solutions of Steadystate and Transient Flow Problems*. *Engineering Bulletin*, (117).
8. Kashef, A.A.I., 1981. *The Nile-one river and nine countries*. *Journal of Hydrology*, 53(1), pp.53-71.
9. Leilavsky, S., 1955. *Irrigation and hydraulic design*.
10. Snow, D.T., 1969. *Anisotropie permeability of fractured media*. *Water Resources Research*, 5(6), pp.1273-1289.
11. Oda, M., 1985. *Permeability tensor for discontinuous rock masses*. *Geotechnique*, 35(4), pp.483-495.
12. Jing, L. and Hudson, J.A., 2002. *Numerical methods in rock mechanics*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), pp.409-427.

- hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 85, pp.151-176.
30. Itasca 3DEC manuals Minneapolis: Itasca Consulting group Inc, Version 5 Users, Manual, 2014.
31. Rasmussen, T.C., Huang, C.H. and Evans, D.D., 1985. Numerical experiments on artificially generated, three-dimensional fracture networks: An examination of scale and aggregation effects. In *Proc. Int. Assoc. of Hydrologists Conf Hydrogeology of Rocks of Low Permeability* (pp. 676-682).
32. Selvadurai, A.P.S., 2012. Fluid leakage through fractures in an impervious caprock embedded between two geologic aquifers. *Advances in Water Resources*, 41, pp.76-83.
۳۳. "گزارش زمین شناسی مهندسی، مطالعات مرحله دوم، طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان"، شرکت مهتاب قدس، مرداد ۹۳.
۳۴. کفایتی، ص؛ ۱۳۸۹؛ "تحلیل احتمالاتی عددی پایداری استاتیکی و دینامیکی شیروانی سنگی تکیه گاه سمت راست سد و نیروگاه کارون ۴" دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
35. Winter, T.C., 2001. Ground water and surface water: the linkage tightens, but challenges remain. *Hydrological Processes*, 15(18), pp.3605-3606.
36. van der Kamp, G., 2001. Methods for determining the in situ hydraulic conductivity of shallow aquitards—an overview. *Hydrogeology Journal*, 9(1), pp.5-16.
23. Sun, J., Zhao, Z. and Zhang, Y., 2011. Determination of three dimensional hydraulic conductivities using a combined analytical/neural network model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), pp.310-319.
24. Zhou, C.B., Sharma, R.S., Chen, Y.F. and Rong, G., 2008. Flow–stress coupled permeability tensor for fractured rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(11), pp.1289-1309.
25. Lin, H.I. and Lee, C.H., 2009. An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syueshan tunnel, Taiwan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), pp.222-230.
26. Xu, Z., Zhao, Z., Sun, J., He, L. and Nie, W., 2015. Back-analysis approach for the determination of hydraulic conductivity in rock caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47, pp.233-238.
27. Xu, Z., Zhao, Z., Sun, J. and Lu, M., 2015. Determination of hydraulic conductivity of fractured rock masses: A case study for a rock cavern project in Singapore. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2), pp.178-184.
28. Sun, J., Zhao, Z. and Zhang, Y., 2011. Determination of three dimensional hydraulic conductivities using a combined analytical/neural network model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), pp.310-319.
29. Lei, Q., Latham, J.P. and Tsang, C.F., 2017. The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and