

مستقیم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

تحقیق دوره دکتری مهندسی معدن - مکانیک سنگ

مدل سازی هیدرومکانیکی تراوایی مخازن کربناته شکافدار

مطالعه موردی: یکی از چاه های نفت جنوب ایران

نگارنده

علی آریین فر

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان زاده

استاد مشاور

مهندس محمد خلیلی

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۴۱۴-۱۴۲۱۹
تاریخ: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳
ویرایش:

باسمه تعالی



فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای علی آریین فر دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۱۰۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۹۹/۱۱/۳۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: مدل سازی هیدرومکانیکی تراوایی مخازن کربناته شکاف دار مطالعه موردی: یکی از چاه های نفت جنوب ایران دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۷۵ به درجه خیلی خوب نائل گردید.
جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیهای ۹۴ و ماقبل

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) مردود: کمتر از ۱۵

جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیهای ۹۵ و مابعد

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶	<input type="checkbox"/> د) مردود: کمتر از ۱۶

ردیف	نام و نام خانوادگی	سعت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر کورش شهریار	دور خارجی	استاد	
۲	دکتر مجید نیکخواه	دور داخلی	استادیار	
۳	دکتر مرتضی جوادی	دور داخلی	استادیار	
۴	دکتر احمد رمضانزاده	استاد راهنما	دانشیار	
۵	دکتر اصغر عزیزی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای علی آریین فر بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اینک که به مدد لطف بی‌کران الهی مقطعی از تحصیل به پایان می‌رسد بر خود لازم می‌دانم که از تمامی کسانی که مرا در این امر یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

بدینوسیله از زحمات و تلاش بی‌دریغ استاد محترم جناب آقای دکتر رمضانزاده که در تهیه این مجموعه با این جانب همکاری داشته‌اند، تشکر و مراتب سپاس قلبی خود را اعلام نموده و موفقیت ایشان را از خداوند متعال خواهانم.

از مشاور محترم جناب آقای مهندس محمد خلیلی به لحاظ مشاوره‌ها و پیگیری‌های لازم جهت تامین اطلاعات میدانی بسیار سپاس‌گذار و قدردان هستم.

از آقای دکتر زیاری و مهندس عباسیان کارشناسان محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ و آزمایشگاه سنگ‌وسیال دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین جناب آقای مهندس احمدی‌شیخانی مسئول محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت‌مدرس که با صبر و بردباری در فعالیت‌های آزمایشگاهی اینجانب را یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

و در پایان از همه دوستان عزیزم که در انجام این مهم مرا یاری نمودند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

تقدیم به پدرم

کوهی استوار و حامی من در طول تمام زندگی

تقدیم به مادرم

سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت

تقدیم به همسرم

که در سایه همیاری و همدلی او به این منظور نائل شدم.

تعهد نامه

اینجانب علی آرین فر دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله با موضوع مدل سازی هیدرومکانیکی تراوایی مخازن کربناته شکافدار-مطالعه موردی: یکی از چاه های نفت جنوب ایران تحت راهنمایی دکتر رمضانزاده و مهندس خلیلی متعهد می شوم:

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

تاریخ:

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

مخازن کربناته شکافدار یکی از مهم‌ترین منابع هیدروکربن در جهان به شمار می‌رود. در مخازن کربناته شکسته شده، محیط متخلخل و درزه‌ها، مسیرهای اصلی انتقال سیال به سمت چاه هستند، این درحالیست که عمدتاً هیدروکربن در محیط متخلخل قرار داشته و حجم ناچیزی از سیال در درزه‌ها ذخیره می‌شود.

به منظور بررسی مسیر جریان سیال در مخازن شکافدار و همچنین تخمین قابلیت گذردهی سیال درون درزه در مجاورت سنگ تراوا، ضروریست که نحوه حرکت سیال درون شکستگی‌های زبر به طور دقیق درک شود. عموماً تراوایی شکستگی از قانون مکعب تخمین زده می‌شود که در شرایط جریان آرام (Laminar) و سطوح درزه کاملاً صاف معتبر است. اما توپوگرافی واقعی درزه و شکستگی‌ها خیلی پیچیده بوده و صفحات درزه به صورت غیرمنظم دارای اتصال با وجه مقابل است. این عوامل باعث می‌شود مسیر حرکت سیال درون درزه و شکستگی‌ها به صورت پیچ‌وخم‌دار بوده و در نتیجه مقدار تراوایی متفاوت از آن مقداری است که از قانون مکعب بدست می‌آید.

مدل‌سازی عددی مخازن شکافدار طبیعی یکی از موضوعات مهم در تخمین حرکت سیال در مخازن کربناته می‌باشد که چندین روش برای آن ارائه شده است. یکی از روش‌های مرسوم در مدل‌سازی مخازن شکافدار، استفاده از مدل پیوسته معادل برای مخزن است. در این مدل‌سازی، درزه با المان‌هایی مشابه ماتریکس سنگ مدل‌سازی می‌شود، با این شباهت که خصوصیات هیدرولیکی آن‌ها معادل با خصوصیات درزه انتخاب می‌گردد. از نقاط ضعف این نوع مدل‌سازی، عدم در نظر گرفتن هندسه درزه و اثر آن بر مسیر حرکت سیال می‌باشد. شاید بتوان مهم‌ترین نقطه ضعف این نوع مدل‌سازی را ثابت نگه‌داشتن تراوایی درزه در طول زمان معرفی نمود. با تخلیه هیدروکربن از مخزن، تنش اولیه برهم خورده و باز توزیع تنش رخ می‌دهد. احتمال باز و بسته شدن درزه‌هایی که قبلاً بسته یا باز بوده‌اند، در شرایط توزیع تنش جدید وجود دارد. تغییر بازشدگی درزه معادل با تغییر تراوایی درزه‌های مخزن می‌باشد. لذا ثابت فرض نمودن مقدار تراوایی درزه مشکلاتی در طراحی مخزن از نظر تعیین موقعیت چاه‌ها و اولویت حفر چاه‌ها خواهد داشت.

به منظور رفع مشکلات ارائه شده در نحوه مدل‌سازی مخازن شکافدار، در این مطالعه ابتدا اثر تنش محصورکننده بر تراوایی محیط متخلخل بررسی شده است. سپس با ایجاد درزه‌های مصنوعی اثر زبری و فشار جانبی بر رفتار سیال درون درزه بسته (matted joint) بررسی گردیده‌است که نشان از رفتار غیرخطی (معادله فورچمیر) سیال در درزه زبر دارد. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان بررسی رفتار سیال درون درزه با محیط متخلخل مجاور وجود نداشته و ناگزیر این مهم با روش عددی بررسی شده است.

نتایج این مطالعه نشان داد در صورتی که محیط اطراف درزه زبر، متخلخل تراوا باشد؛ همچنان رفتار سیال درون درزه غیرخطی می‌باشد. اثر محیط متخلخل تراوا بر رفتار سیال درون درزه با تغییر تراوایی مشهود است بنحوی که افزایش تراوایی محیط جانبی باعث افزایش میزان عبور سیال از درزه می‌شود. این موضوع در مقادیر بازشدگی مکانیکی کم بسیار موثر می‌باشد بنحوی که در یک مقدار بازشدگی مکانیکی ثابت، اگر مقدار تراوایی محیط جانبی از ۱ میلی‌داریسی به ۱۰۰ میلی‌داریسی افزایش یابد، مقدار جریان عبوری تنها از درزه ۵۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر خواهد شد. همچنین بازشدگی هیدرولیکی درزه با افزایش تراوایی محیط مجاور تغییر نموده و به مقدار بازشدگی مکانیکی نزدیک‌تر می‌شود.

در فصل آخر نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در یک مدل سه‌بعدی با رفتار توامان هیدرومکانیکی در نرم‌افزار 3DEC که قابلیت مدل‌سازی رفتار تراوایی دوگانه (Leak Off) را دارد پیاده‌سازی شده است. در مدل عددی، دو عدد چاه در یک مخزن به صورت مجزا مدل‌سازی شده و رفتار سیال در آنها بررسی شده است. نتایج این مدل‌سازی مؤید رفتار تراوایی دوگانه است. همچنین اثر بسته‌شدن درزه با خروج سیال در ارتباط با مشخصات هندسی درزه‌ها، رفتار تراوایی دوگانه مخزن و رفتار توامان هیدرومکانیکی محیط اطراف چاه را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: مخازن کربناته شکافدار، محیط متخلخل، تخلخل دوگانه، تراوایی دوگانه، زبری درزه، رفتار

توامان هیدرومکانیک

مقالات مستخرج شده از رساله

ردیف	عنوان مقاله	محل انتشار	تاریخ انتشار	عنوان مجله
۱	Numerical Study Of Limestone Permeability Changes In Terms Of Effective Confining Stress, Case Study: South Pars Reservoir Limestone	Begell House, Inc	2020	Special Topics & Reviews in Porous Media, An International Journal
۲	Numerical Modeling Of Closure Effect Of Natural Fracture Surfaces Of Rock On Behavior Of Fluid Flow	Springer-Verlag	2021	Bulletin of Engineering Geology and the Environment
۳	Numerical study of nonlinear fluid flow behavior in natural fractures adjacent to porous medium	ScienceDirect	2021	Journal of Petroleum Science and Engineering

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
أ	چکیده.....
۱	فصل ۱ کلیات.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۱-۲- ضرورت تحقیق.....
۳	۱-۳- اهداف تحقیق.....
۳	۱-۴- روش انجام تحقیق.....
۴	۱-۵- فرضیات تحقیق.....
۴	۱-۶- ساختار تحقیق.....
۷	فصل ۲ مروری بر مطالعات انجام شده در ارتباط با رفتار سیال در محیط متخلخل درزه‌دار.....
۸	۲-۱- مقدمه.....
۸	۲-۲- طبقه‌بندی مخازن شکافدار.....
۹	۲-۳- درزه و شکستگی.....
۱۰	۲-۳-۱- هندسه بازشدگی درزه.....
۱۴	۲-۳-۲- زبری درزه.....
۱۴	۲-۳-۳- روش‌های کمی‌سازی زبری.....
۱۸	۲-۳-۴- تراوایی تک‌درز.....
۲۰	۲-۴- تراوایی ماتریکس تحت تنش.....
۲۲	۲-۵- مدل‌سازی مخازن شکافدار.....
۲۲	۲-۵-۱- مدل‌سازی تخلخل تکی.....
۲۲	۲-۵-۲- مدل‌سازی تخلخل دوگانه.....
۲۴	۲-۵-۳- مدل‌سازی تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه.....
۲۴	۲-۶- اثر زبری بر جریان سیال درون شکستگی.....
۲۹	۲-۷- رفتار غیرخطی جریان در درزه‌های زبر.....
۳۲	۲-۸- مدل‌سازی مخازن کربناته.....
۳۸	۲-۹- جمع‌بندی.....
۴۱	فصل ۳ مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های عددی.....
۴۲	۳-۱- مقدمه.....
۴۲	۳-۲- اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها.....
۴۴	۳-۳- انجام آزمایش‌های نمونه‌های بدون درزه.....

۵۱	۴-۳- تهیه نمونه‌های درزه‌دار
۵۲	۵-۳- انجام آزمایش‌های نمونه‌های درزه‌دار
۵۷	۶-۳- اندازه‌گیری زبری سطوح درزه
۵۷	۱-۶-۳- تجهیزات
۵۸	۲-۶-۳- کمی‌سازه زبری درزه
۶۶	۷-۳- معرفی نرم‌افزار ANSYS FLUENT
۶۷	۸-۳- ساخت هندسه درزه برای مدل‌های عددی
۶۸	۱-۸-۳- نرم‌افزارهای مورد استفاده
۶۹	۲-۸-۳- فرضیات ساخت هندسه درزه
۷۰	۳-۸-۳- حالات مختلف ساخت هندسه
۷۱	۴-۸-۳- شرایط مرزی
۷۲	۵-۸-۳- خصوصیات هیدرولیکی مصالح
۷۲	۶-۸-۳- اعتبارسنجی مدل
۷۵	فصل ۴ تحلیل و بررسی نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی و مدل‌های عددی
۷۶	۱-۴- مقدمه
۷۶	۲-۴- بررسی زبری درزه‌ها در روش‌های مختلف
۷۷	۳-۴- بررسی تغییرات تراوایی ماتریکس (روش آزمایشگاهی)
۸۰	۴-۴- بررسی تغییرات تراوایی درزه (روش آزمایشگاهی)
۸۳	۵-۴- بررسی تغییرات تراوایی درزه در مجاورت ماتریکس تراوا (روش عددی)
۸۹	۱-۵-۴- بررسی تغییرات غیرخطی جریان نسبت به مقدار سطح اتصال درزه
۹۴	۲-۵-۴- بررسی تغییرات غیرخطی جریان نسبت به تراوایی ماتریکس مجاور
۹۸	۳-۵-۴- بررسی تغییرات ضرایب رابطه فورچمیر در ارتباط با درصد اتصال سطوح درزه
۱۰۱	۴-۵-۴- بررسی تغییرات ضرایب رابطه فورچمیر در ارتباط با تراوایی محیط جانبی درزه
۱۰۴	۵-۵-۴- بررسی تغییرات مقادیر بازشدگی هیدرولیکی نسبت به بازشدگی مکانیکی درزه در مجاورت ماتریکس تراوا
۱۰۶	۶-۵-۴- بررسی تغییرات بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری درزه
۱۰۹	۶-۴- جمع‌بندی
۱۱۱	فصل ۵ مدل‌سازی توامان هیدرومکانیک چاه‌های منتخب
۱۱۲	۱-۵- مقدمه
۱۱۲	۲-۵- معرفی چاه‌های مورد بررسی
۱۱۳	۳-۵- محاسبه بازشدگی هیدرولیکی در مدل‌سازی
۱۱۴	۴-۵- نحوه مدل‌سازی چاه
۱۱۴	۱-۴-۵- ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی

۱۱۴.....	۲-۴-۵- ساخت مدل عددی سه بعدی
۱۱۵.....	۳-۴-۵- خصوصیات مکانیکی استفاده شده در مدل
۱۱۷.....	۴-۴-۵- شرایط مرزی
۱۱۸.....	۵-۴-۵- معادلات حاکم بر رفتار غیرخطی سیال.....
۱۱۹.....	۶-۴-۵- صحت سنجی کد معادل کننده رفتار غیر خطی سیال
۱۲۲.....	۷-۴-۵- پارامترهای کنترلی
۱۲۴.....	۵-۵- تحلیل و بررسی نتایج
۱۲۴.....	۱-۵-۵- بررسی تغییرات هیدرومکانیکی چاه شماره ۱.....
۱۴۳.....	۲-۵-۵- بررسی تغییرات هیدرومکانیکی چاه شماره ۲.....
۱۵۹.....	۶-۵- جمع بندی
۱۶۳	فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۶۴.....	۱-۶- نتیجه گیری.....
۱۶۶.....	۲-۶- پیشنهادات
۱۶۷	فصل ۷ منابع و مراجع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲) خصوصیات ناپیوستگی‌ها براساس وضعیت هندسه (HAKAMI, 1995).....	۱۱
شکل (۲-۲) پروفیل سطح درزه، بازشدگی E، به‌مراه صفحات مرجع با فاصله D (ZIMMERMAN, ET AL., 1996).....	۱۲
شکل (۳-۲) مفهوم بازشدگی درزه (HAKAMI, 1995).....	۱۲
شکل (۴-۲) روش‌های مختلف اندازه‌گیری بازشدگی درزه (HAKAMI, 1995).....	۱۳
شکل (۵-۲) پروفیل‌های استاندارد بارتن (BARTON, 1973).....	۱۶
شکل (۶-۲) الگوی شماتیک خودتشابهی در اشکال فراکتال (MOHEBBI, ET AL., 2015).....	۱۷
شکل (۷-۲) توصیف پارامترهای هندسی درزه (REISS, 1980).....	۱۸
شکل (۸-۲) مدل‌های تخلخل دوگانه (WARREN, ET AL., 1963) (KAZEMI, 1969) (REISS, 1980).....	۲۳
شکل (۹-۲) شماتیک رفتار تراوایی دوگانه-تخلخل دوگانه (LU, 2009).....	۲۴
شکل (۱۰-۲) تغییرات تراوایی برحسب بازشدگی (JIN, 2017).....	۲۷
شکل (۱۱-۲) مدل‌سازی زبری با استفاده از المان‌های مربعی (JAVADI, ET AL., 2010).....	۳۱
شکل (۱۲-۲) A- تطابق خروجی مدل T و مدل‌سازی واقعی B- درصد خطا بین دو مدل در مقادیر گذردهی مختلف (JAVADI, ET AL., 2010).....	۳۲
شکل (۱۳-۲) روش‌های مدل‌سازی و دقت مورد نظر در هر روش (BERRE , ET AL., 2019).....	۳۳
شکل (۱۴-۲) نحوه حل معادلات جریان سیال در روش‌های مختلف مدل‌سازی ماتریکس و درزه (BERRE , ET AL., 2019) ..	۳۴
شکل (۱۵-۲) شماتیکی از مدل‌سازی رفتار تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه (MANUEL, 2011).....	۳۶
شکل (۱۶-۲) شماتیکی از مقادیر تراوایی و تخلخل تخصیص داده شده به مدل (MANUEL, 2011).....	۳۷
شکل (۱۷-۲) مقادیر بازیابی نفت در حالت‌های مختلف مدل‌سازی (TAREQ , ET AL., 2003).....	۳۷
شکل (۱۸-۲) مدل‌سازی درزه در مدل پیوسته (FUNG, ET AL., 2005).....	۳۸
شکل (۱-۳) نمونه‌های تهیه شده از سنگ‌های آذرین.....	۴۳
شکل (۲-۳) نمونه‌های تهیه شده از سنگ‌های آهکی متراکم.....	۴۳
شکل (۳-۳) نمونه‌های اخذ شده از چاه‌های نفت-سری اول (S1).....	۴۳
شکل (۴-۳) نمونه‌های اخذ شده از چاه‌های نفت-سری دوم (S2).....	۴۳
شکل (۵-۳) تصویر نحوه انجام آزمایش اولتراسونیک.....	۴۴

- شکل (۳-۶) : الف) نمای پشت دستگاه، ۱) محفظه پمپ سیال ۲) لوله‌های انتقال سیال پشت دستگاه - ب) نمای کلی دستگاه
 ۱) پمپ تزریق ۲) پمپ روغن فشار محصورکننده (HPLC) ۳) آون و مغزه نگهدارنده..... ۴۵
- شکل (۳-۷) ۱) سیال تزریق ۲) لوله مکش ۳) پمپ تزریق ۴) شیر ۵) سیال پشت پیستون اکومولاتور ۶) پیستون ۷ و ۸ و ۹) هر سیالی که برای تزریق مد نظر باشد ۱۰ و ۱۱) مسیر تزریق ۱۲) شیر بای پس ۱۳) محفظه مغزه ۱۴) مغزه ۱۵) فشار سنج ۱۶) پمپ روغن ۱۷) آون ۱۸) محفظه خروجی ۱۹) گاز نیتروژن برای تامین BACK PRESSURE..... ۴۵
- شکل (۳-۸) شماتیکی از نحوه انجام آزمایش..... ۴۶
- شکل (۳-۹) تصویر دستگاه و جزئیات مربوطه..... ۵۲
- شکل (۳-۱۰) صفحه شکستگی نمونه S2-1..... ۵۲
- شکل (۳-۱۱) صفحه شکستگی نمونه S2-2..... ۵۲
- شکل (۳-۱۲) صفحه شکستگی نمونه S2-3..... ۵۲
- شکل (۳-۱۳) سیستم ثبت الگوهای نوری به همراه دو دوربین CCD..... ۵۸
- شکل (۳-۱۴) تجهیزات اندازه‌گیری سه‌بعدی سطح. الف) اسکنر نوری سه‌بعدی به همراه سه پایه، ب) شماتیک نحوه قرارگیری نمونه ج) نرم‌افزار تصویر ساز سه‌بعدی متصل به دستگاه..... ۵۸
- شکل (۳-۱۵) تصویری از نمونه‌های اسکن شده و نمونه اصلی (نمونه شماره S2-1)..... ۵۸
- شکل (۳-۱۶) تعیین بعد فراکتال سطح اول نمونه S2-1..... ۶۰
- شکل (۳-۱۷) تعیین بعد فراکتال سطح دوم نمونه S2-1..... ۶۱
- شکل (۳-۱۸) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۱ نمونه S2-2..... ۶۲
- شکل (۳-۱۹) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۲ نمونه S2-2..... ۶۳
- شکل (۳-۲۰) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۱ نمونه S2-3..... ۶۴
- شکل (۳-۲۱) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۲ نمونه S2-3..... ۶۵
- شکل (۳-۲۲) تعیین پروفیل‌های طولی جهت تعیین مقدار Z_2 ۶۶
- شکل (۳-۲۳) تصویری از نرم‌افزار RHINOCEROS..... ۶۸
- شکل (۳-۲۴) تصویری از الگوریتم تعیین نقاط برابر در ابزار GRASSHOPPER..... ۶۹
- شکل (۳-۲۵) A هندسه کلی مدل، B هندسه درزه مدل C مش‌بندی در محدوده درزه D وضعیت یک سمت درزه با لحاظ محیط متخلخل..... ۷۰
- شکل (۳-۲۶) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-1..... ۷۰
- شکل (۳-۲۷) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-2..... ۷۱

- شکل (۲۸-۳) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-3 ۷۱
- شکل (۲۹-۳) شماتیک شرایط مرزی مدل‌های عددی در نرم‌افزار ANSYS FLUENT ۷۲
- شکل (۳۰-۳) تصویری از هندسه مدل‌سازی، ابعاد مش و توزیع فشار در طول مدل ۷۳
- شکل (۱-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-1 ۷۷
- شکل (۲-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-2 ۷۸
- شکل (۳-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-3 ۷۸
- شکل (۴-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-1 ۷۹
- شکل (۵-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-2 ۷۹
- شکل (۶-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-3 ۷۹
- شکل (۷-۴) نمودار تغییرات فشار برحسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-1 ۸۰
- شکل (۸-۴) نمودار تغییرات فشار برحسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-2 ۸۱
- شکل (۹-۴) نمودار تغییرات فشار برحسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-3 ۸۱
- شکل (۱۰-۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-1 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۴۵٪ ۸۵
- شکل (۱۱-۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-2 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۳۰٪ ۸۶
- شکل (۱۲-۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-2 در مقادیر سطوح اتصال ۴۵٪ تا ۶۰٪ ۸۷
- شکل (۱۳-۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-3 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۳۰٪ ۸۸
- شکل (۱۴-۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-3 در مقادیر سطوح اتصال ۴۵٪ تا ۶۰٪ ۸۹
- شکل (۱۵-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی‌داری ۹۰
- شکل (۱۶-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰ میلی‌داری ۹۰
- شکل (۱۷-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داری ۹۰
- شکل (۱۸-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی‌داری ... ۹۱
- شکل (۱۹-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی‌داری ۹۱
- شکل (۲۰-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰ میلی‌داری ۹۱
- شکل (۲۱-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داری ۹۲
- شکل (۲۲-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی‌داری ... ۹۲
- شکل (۲۳-۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی‌داری ۹۲

- شکل (۴-۲۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داری ... ۹۳
- شکل (۴-۲۵) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصد‌های اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی‌داری ... ۹۳
- شکل (۴-۲۶) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪ ۹۴
- شکل (۴-۲۷) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪ ۹۴
- شکل (۴-۲۸) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪ ۹۵
- شکل (۴-۲۹) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪ ۹۵
- شکل (۴-۳۰) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪ ۹۵
- شکل (۴-۳۱) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪ ۹۶
- شکل (۴-۳۲) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪ ۹۶
- شکل (۴-۳۳) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪ ۹۶
- شکل (۴-۳۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪ ۹۷
- شکل (۴-۳۵) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪ ۹۷
- شکل (۴-۳۶) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪ ۹۷
- شکل (۴-۳۷) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪ ۹۸
- شکل (۴-۳۸) تغییرات ضریب A برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-1 ۹۹
- شکل (۴-۳۹) تغییرات ضریب B برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-1 ۹۹
- شکل (۴-۴۰) تغییرات ضریب A برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-2 ۱۰۰
- شکل (۴-۴۱) تغییرات ضریب B برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-2 ۱۰۰
- شکل (۴-۴۲) تغییرات ضریب A برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-3 ۱۰۱
- شکل (۴-۴۳) تغییرات ضریب B برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-3 ۱۰۱
- شکل (۴-۴۴) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-1 ۱۰۲
- شکل (۴-۴۵) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-1 ۱۰۲
- شکل (۴-۴۶) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-2 ۱۰۲
- شکل (۴-۴۷) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-2 ۱۰۳
- شکل (۴-۴۸) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-3 ۱۰۳
- شکل (۴-۴۹) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-3 ۱۰۳

- شکل (۴-۵۰) تغییرات بازشدگی هیدرولیکی برحسب بازشدگی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-1.....۱۰۴
- شکل (۴-۵۱) تغییرات بازشدگی هیدرولیکی برحسب بازشدگی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-2.....۱۰۵
- شکل (۴-۵۲) تغییرات بازشدگی هیدرولیکی برحسب بازشدگی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-3.....۱۰۵
- شکل (۴-۵۳) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱ میلی‌داریسی۱۰۶
- شکل (۴-۵۴) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰ میلی‌داریسی۱۰۶
- شکل (۴-۵۵) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۵۰۰ میلی‌داریسی۱۰۷
- شکل (۴-۵۶) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰۰ میلی‌داریسی...۱۰۷
- شکل (۴-۵۷) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱ میلی‌داریسی۱۰۷
- شکل (۴-۵۸) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰ میلی‌داریسی۱۰۸
- شکل (۴-۵۹) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۵۰۰ میلی‌داریسی۱۰۸
- شکل (۴-۶۰) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰۰ میلی‌داریسی۱۰۸
-
- شکل (۵-۱) هندسه کلی مدل و موقعیت چاه.....۱۱۵
- شکل (۵-۲) هندسه مدل و شرایط مرزی استفاده شده در مدل‌های عددی.....۱۱۸
- شکل (۵-۳) وضعیت فشارمنفذی سیال.....۱۱۹
- شکل (۵-۴) هندسه و شرایط فشار منفذی در نمونه در حالت اختلاف فشار ۲۰ کیلوپاسکال.....۱۲۰
- شکل (۵-۵) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۱۵٪.....۱۲۰
- شکل (۵-۶) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۳۰٪.....۱۲۱
- شکل (۵-۷) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۴۵٪.....۱۲۱
- شکل (۵-۸) مقایسه نتایج مدل 3DEC با نتایج آزمایشات عددی پایه.....۱۲۲
- شکل (۵-۹) نمودار نیروی نامتعادل کننده بعد از تعادل اولیه مدل.....۱۲۳
- شکل (۵-۱۰) نمودار نیروی نامتعادل کننده در حین تولید سیال از چاه.....۱۲۴
- شکل (۵-۱۱) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.....۱۲۶
- شکل (۵-۱۲) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.....۱۲۷
- شکل (۵-۱۳) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.....۱۲۷
- شکل (۵-۱۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.....۱۲۸

- شکل (۵-۱۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل ۱۲۸
- شکل (۵-۱۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل ۱۲۹
- شکل (۵-۱۷) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۲۹
- شکل (۵-۱۸) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۳۰
- شکل (۵-۱۹) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۳۰
- شکل (۵-۲۰) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۳۱
- شکل (۵-۲۱) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۳۱
- شکل (۵-۲۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰ ۱۳۲
- شکل (۵-۲۳) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۲
- شکل (۵-۲۴) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۳
- شکل (۵-۲۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۳
- شکل (۵-۲۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۴
- شکل (۵-۲۷) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۴
- شکل (۵-۲۸) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱ ۱۳۵
- شکل (۵-۲۹) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۵
- شکل (۵-۳۰) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۶
- شکل (۵-۳۱) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۶
- شکل (۵-۳۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۷
- شکل (۵-۳۳) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۷
- شکل (۵-۳۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲ ۱۳۸
- شکل (۵-۳۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۳۸
- شکل (۵-۳۶) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۳۹
- شکل (۵-۳۷) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۳۹
- شکل (۵-۳۸) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۴۰
- شکل (۵-۳۹) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۴۰
- شکل (۵-۴۰) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱ ۱۴۱

- شکل (۴۱-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۲ مگاپاسکال..... ۱۴۱
- شکل (۴۲-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۸ مگاپاسکال..... ۱۴۲
- شکل (۴۳-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۲۱ مگاپاسکال..... ۱۴۳
- شکل (۴۴-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۵
- شکل (۴۵-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۵
- شکل (۴۶-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۶
- شکل (۴۷-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۶
- شکل (۴۸-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۷
- شکل (۴۹-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل..... ۱۴۷
- شکل (۵۰-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۴۸
- شکل (۵۱-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۴۸
- شکل (۵۲-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۴۹
- شکل (۵۳-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۴۹
- شکل (۵۴-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۵۰
- شکل (۵۵-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰..... ۱۵۰
- شکل (۵۶-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۱
- شکل (۵۷-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۱
- شکل (۵۸-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۲
- شکل (۵۹-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۲
- شکل (۶۰-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۳
- شکل (۶۱-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱..... ۱۵۳
- شکل (۶۲-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۴
- شکل (۶۳-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۴
- شکل (۶۴-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۵
- شکل (۶۵-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۵
- شکل (۶۶-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۶

- شکل (۶۷-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از جدل مدل در چاه شماره ۲..... ۱۵۶
- شکل (۶۸-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۲ مگاپاسکال..... ۱۵۷
- شکل (۶۹-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۸ مگاپاسکال..... ۱۵۸
- شکل (۷۰-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۲۱ مگاپاسکال..... ۱۵۹
- شکل (۷۱-۵) وضعیت تنش‌های اصلی نسبت به امتداد درزه‌ها در چاه شماره ۱..... ۱۵۹
- شکل (۷۲-۵) وضعیت تنش‌های اصلی نسبت به امتداد درزه‌ها در چاه شماره ۲..... ۱۶۰

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) طبقه‌بندی مهندسی مخازن شکافدار طبیعی (BELHARCHE, 2005).....	۱۰
جدول (۲-۲) فاکتور FS مدل‌های مخازن شکافدار (REISS, 1980).....	۱۹
جدول (۳-۲) خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی تخصیص داده شده به مدل (MANUEL, 2011).....	۳۶
جدول (۱-۳) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سری اول و دوم.....	۴۴
جدول (۲-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-1.....	۴۷
جدول (۳-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-2.....	۴۸
جدول (۴-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-3.....	۴۸
جدول (۵-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-1.....	۴۹
جدول (۶-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-2.....	۵۰
جدول (۷-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-3.....	۵۱
جدول (۸-۳) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-1.....	۵۴
جدول (۹-۳) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-2.....	۵۶
جدول (۱۰-۳) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-3.....	۵۷
جدول (۱۱-۳) پارامتر Z_2 زبری درزه‌های مورد استفاده.....	۶۶
جدول (۱۲-۳) پارامتر JRC زبری درزه‌های مورد استفاده.....	۶۶
جدول (۱-۴) زبری سطوح نمونه‌های سری دوم.....	۷۶
جدول (۲-۴) معادله فورچمیر برازش شده بر خروجی آزمایش‌های تعیین تراوایی درزه.....	۸۲
جدول (۳-۴) مقادیر تراوایی ماتریکس و مقدار بازشدگی برای هر نمونه.....	۸۳
جدول (۱-۵) مشخصات هندسی درزه‌های محدوده چاه شماره ۱ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۱, ۱۳۹۳).....	۱۱۶
جدول (۲-۵) مشخصات مکانیکی سنگ بکر در محدوده چاه شماره ۱ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۱, ۱۳۹۳).....	۱۱۶
جدول (۳-۵) شرایط تنش اولیه در محدوده چاه شماره ۱.....	۱۱۶
جدول (۴-۵) مشخصات هندسی درزه‌های محدوده چاه شماره ۲ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۲, ۱۳۹۳).....	۱۱۶
جدول (۵-۵) مشخصات مکانیکی سنگ بکر در محدوده چاه شماره ۲ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۲, ۱۳۹۳).....	۱۱۶
جدول (۶-۵) شرایط تنش اولیه در محدوده چاه شماره ۲.....	۱۱۶

جدول (۷-۵) مشخصات آزمایشات صحت سنجی و مقایسه با مقادیر نتایج شکل (۴-۱۹)..... ۱۲۲

فهرست علائم و اختصارات

e_h	باز شدگی هیدرولیکی
e_m	بازشدگی مکانیکی
K	نسبت تنش‌های برجا
k	تراوایی ماتریکس
P	تنش موثر
H	متغیر نمایی بعد فرکتال
φ	تخلخل درزه
A, B	ثابت‌های معادله فورچمیر
Q	نرخ جریان عبوری
ΔP	تغییرات فشار
μ	ویسکوزیته سیال
w	عرض بازشدگی
mD	میلی داریسی
L	طول
E	مدول الاستیک
ν	نسبت پواسون
γ	وزن حجمی
V_p, V_s	سرعت موج برشی و فشار

فصل ۱

کلیات

در مخازن کربناته شکافدار، انتقال سیال از مخزن به چاه از دو طریق ماتریکس سنگ و درزه‌ها انجام می‌شود. طبق مطالعات مختلف، خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی درزه و ماتریکس، در انتقال سیال بسیار حائز اهمیت می‌باشد. اما در نظر گرفتن رفتار معادل برای درزه و مدل‌سازی آن به صورت ماده‌ای با تراوایی بالا باعث می‌شود تا اندرکنش هیدرولیکی - مکانیکی درزه و ماتریکس که در انتقال سیال بسیار مهم است، در مدل‌سازی نادیده گرفته شود.

مطالعات زیادی در ارتباط با رفتار سیال درون درزه زبر و ماتریکس تراوا انجام شده است. اما ارتباط کامل بین پارامترهای درزه و تراوایی، با در نظر گرفتن رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه در تحقیقات اخیر انجام نشده است و عموماً به مدل‌سازی درزه در مخزن با تخصیص مش حجمی^۱ تراوا اقدام شده است. در تحقیقاتی که رفتار سیال درون درزه و در مجاورت محیط متخلخل را بررسی نموده‌اند، معمولاً اثر زبری و اندرکنش بین درزه و ماتریکس را لحاظ ننموده‌اند. لذا در این تحقیق، اثر پارامترهای درزه (بازشدگی، زبری) بر تراوایی با در نظر گرفتن ماده‌سنگ مجاور تراوا در شرایط مختلف بازشدگی و درزه بسته (matted joint) بررسی خواهد شد. بازشدگی درزه و اثر زبری بر انتقال سیال و نیز رفتار خطی یا غیرخطی سیال تأثیر زیادی دارد.

بررسی اثر بازشدگی بر انتقال سیال در درزه‌هایی با زبری‌های متفاوت موضوعی است که محدوده کارایی روش مکعب را به خوبی تعیین می‌کند. افزایش بازشدگی نسبت به زبری می‌تواند باعث کم‌شدن تأثیر زبری شود. در حالت معکوس، میزان اثر بسته‌شدن درزه (کم‌شدن بازشدگی) بر انتقال سیال-در درزه‌هایی با زبری‌های متفاوت- موضوعی است که می‌تواند اثر زبری و اهمیت آن بر انتقال سیال را بیشتر نشان دهد. علاوه بر این بررسی رفتار سیال در درزه‌های زبر در مجاورت ماده‌سنگ تراوا (رفتار تخلخل دوگانه - تراوایی دوگانه) موضوع مهمی است که می‌تواند رفتار سیال درون درزه را تحت تأثیر خود قرار دهد.

در این تحقیق بررسی زبری‌های متفاوت در مجاورت ماده‌سنگ با تراوایی مختلف بررسی شده است. اثر فشارهای منفذی و جانبی مختلف، اثر میزان بازشدگی درزه بر انتقال سیال و تأثیر آن بر رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعیین رفتار سیال درون درزه زبر و در مجاورت ماده‌سنگ تراوا، اثر این رفتار بر بازدهی مخازن با مدل‌سازی عددی بررسی شده است.

1- Element

۱-۲- ضرورت تحقیق

در اوایل بهره‌برداری از چاه، فشار مخزن تقریباً برابر فشار اولیه است. سیال نفت برای رسیدن به چاه با توجه به فشار زیاد و محدود بودن تراوایی درزه‌ها در مجاورت چاه، هم از درزه‌ها و هم از ماتریکس سنگ به سمت چاه حرکت می‌کند.

با کاهش فشارمنفذی در طول بهره‌برداری و افزایش تنش موثر، درزه‌ها شروع به بسته شدن می‌کنند. بسته شدن درزه معادل با کاهش فضای عبوری برای سیال درون درزه است. در این حالت اثر زبری درزه بر جریان سیال بیشتر می‌شود. محدود شدن فضای عبور سیال افزایش فشارمنفذی را در پی خواهد داشت. با افزایش فشارمنفذی و نبود فضای کافی برای عبور سیال، امکان تبادل سیال بین درزه و ماتریکس مجاور وجود دارد. مقدار تراوایی ماتریکس مجاور درزه در این فرایند بسیار موثر می‌باشد بطوریکه می‌تواند در رژیم جریان ورودی به چاه تغییرات اساسی ایجاد کند. در نتیجه شناخت رفتارسیال درون درزه زبر و مجاور به ماتریکس تراوا موضوعی است که باید به دقت بررسی شود.

۱-۳- اهداف تحقیق

- بررسی اثر زبری بر جریان سیال در مجاورت ماده سنگ تراوا
- بررسی اثر اختلاف تنش‌های جانبی و فشارمنفذی بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی درزه با در نظرگیری رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه
- بررسی اثر اختلاف تنش‌های جانبی و فشارمنفذی بر بازدهی مخزن با در نظر گرفتن رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه

۱-۴- روش انجام تحقیق

روش انجام این تحقیق ترکیبی از روش مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی می‌باشد. برای این منظور ابتدا در آزمایشگاه، آزمایش‌های لازم بر نمونه‌های واقعی انجام می‌شود. مهم‌ترین آزمایش آزمایشگاهی بررسی تغییرات تراوایی ماتریکس سنگ در ارتباط با تنش موثر محصورکننده است. همچنین بررسی رفتار سیال درون درزه زبر تحت تنش نرمال در آزمایشگاه بررسی خواهد شد. نظر به محدودیت‌های آزمایشگاهی و عدم امکان تهیه نمونه‌هایی با تراوایی متفاوت و زبری ثابت، این بررسی‌ها به روش مدل‌سازی عددی انجام می‌شود.

به طور کلی در انجام تحقیق حاضر مراحل زیر انجام شده است.

- ۱- مطالعات کتابخانه‌ای
- ۲- گردآوری نمونه‌ها
- ۳- مطالعات آزمایشگاهی
- ۴- تهیه درزه مصنوعی
- ۵- اسکن سطح درزه‌ها
- ۶- تعیین زبری درزه
- ۷- مدل‌سازی عددی هیدرومکانیکی
- ۸- بررسی ارتباط بازشدگی مکانیکی و هیدرولیکی در مجاورت سنگ تراوا
- ۹- مدل‌سازی توامان هیدرومکانیکی اطراف چاه در یک مخزن

۵-۱- فرضیات تحقیق

- قانون مکعب برای تعیین تراوایی درزه مناسب نمی‌باشد.
- رفتار سیال درون ماده‌سنگ از تئوری سیال در محیط متخلخل پیروی می‌کند.
- سیال سیلاب‌زنی در آزمایش‌ها آب مقطر می‌باشد.
- از آنجاکه خصوصیات درزه می‌تواند در طول خط اثر خود تغییر کند، فرض می‌شود زبری کل درزه مشابه زبری بدست‌آمده از نمونه‌هاست. به عبارتی از اثر مقیاس زبری درزه در طول درزه صرف نظر شده است.
- در این مطالعه سیال به صورت تک‌فازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
- در این تحقیق تنها کوپل هیدرومکانیک بررسی می‌شود و از اثر دما، واکنش‌های شیمیایی و غیره صرف نظر شده است.

۶-۱- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر در شش فصل تنظیم شده است. در فصل اول مقدمه‌ای در مورد ضرورت، اهداف و روش تحقیق ارائه می‌شود. در فصل دوم پس از معرفی مخازن شکافدار و ارائه دسته‌بندی‌های مختلف، خلاصه‌ای از نتایج مطالعات انجام شده بر روش‌های تعیین زبری درزه، رفتار سیال در درزه و همچنین اثر تنش‌جانبی بر تراوایی سنگ متخلخل ارائه شده است. در فصل سوم روند تهیه سطوح طبیعی درزه، اندازه‌گیری زبری سطوح درزه و فرآیند آزمایش‌های انجام شده بر درزه‌ها ارائه شده است. در انتهای این فصل نحوه ساخت مدل‌های عددی در مقیاس نمونه‌های آزمایشگاهی شرح داده می‌شود. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته و نهایتاً اثر تراوایی ماتریکس بر رفتار سیال درون درزه، در ارتباط با بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی مشخص شده است. در فصل پنجم رفتار سیال بخشی از محدوده دو چاه نفت در یک مخزن، با لحاظ یافته‌های فصول قبل و

استفاده از مدل‌سازی توامان هیدرومکانیکی مدل‌سازی می‌شود. در انتها در فصل ششم کلیه نتایج این تحقیق به ترتیب ارائه شده و پیشنهاداتی که می‌تواند در جهت ادامه این تحقیق مورد استفاده قرار گیرد به ترتیب اولویت ارائه می‌گردد.

فصل ۲

**مروری بر مطالعات انجام شده در ارتباط با
رفتار سیال در محیط متخلخل درزه‌دار**

رفتار سیال در مخازن کربناته شکافدار به دلیل وجود درزه و شکاف متعدد و ماتریکس تراوا پیچیده است. در رابطه با مدل سازی مخازن شکافدار و در نظر گرفتن اثر درزه بر رفتار سیال در مخزن، در این فصل ابتدا کلیاتی در رابطه با دسته بندی انواع مخازن و مکانیزم انتقال سیال در آنها ارائه می شود. از آنجا که هدف از این تحقیق مدل سازی مخازن شکافدار با در نظر گرفتن رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه است می بایست اثر درزه بر انتقال سیال مورد بررسی قرار گیرد. لذا پس از ارائه کلیاتی در مورد مخازن، پارامترهای زبری درزه و نحوه تعیین کمی و کیفی آن توضیح داده شده است. نکته دیگر اثر تنش جانبی بر تراوایی ماتریکس سنگ می باشد. در مخازن، سیال درون منافذ سنگ ذخیره شده است که در هنگام بهره برداری این سیال به سمت چاه حرکت می کند. با خروج سیال تنش موثر افزایش یافته و باعث بسته شدن منافذ سنگ و درزه ها می شود. این مهم باعث کاهش تراوایی ماتریکس و درزه می گردد. بر این اساس برای بررسی مطالعات پیشین و استفاده از دستاوردهای آنها، تحقیقات انجام شده در این راستا جمع بندی و به صورت تفکیک شده ارائه می شود. در انتها به صورت خلاصه انواع روش های مرسوم مدل سازی مخازن کربناته و فرضیات هر یک توضیح داده خواهد شد.

۲-۲- طبقه بندی مخازن شکافدار

به طور کلی مخازن شکافدار از جنبه های مختلفی قابل بررسی هستند. با در نظر گرفتن شرایط زمین شناسی عمومی، زمین شناسی ساختمانی منطقه و ویژگی های هیدرولیکی سنگ (تخلخل، تراوایی) طبقه بندی های متنوعی برای مخازن شکافدار ارائه شده است. از مهم ترین طبقه بندی های ارائه شده برای مخازن شکافدار می توان به طبقه بندی تیاب و دونالدسون^۱ اشاره نمود که مخازن شکافدار را به چهار دسته زیر طبقه بندی نموده است (Tiab, et al., 2004). از آنجا که موضوع تحقیق در ارتباط با نوع چهارم طبقه بندی ارائه شده می باشد، تنها به توضیح این طبقه بندی پرداخته می شود.

۱. طبقه بندی زمین شناسی مخازن شکافدار
۲. طبقه بندی بر اساس شرایط تنش/اگرنش
۳. طبقه بندی بر اساس شرایط تنش قدیم^۲
۴. طبقه بندی مهندسی مخازن شکافدار

1- Tiab and Donaldson
2- Paleostress

نلسون (Nelson, 1987) مخازن شکافدار طبیعی را بر اساس توسعه شکستگی‌ها، مقادیر تخلخل و تراوایی، به چهار نوع زیر تقسیم‌بندی نموده است:

نوع ۱: شکستگی‌ها کل تراوایی و حجم ذخیره‌کننده مخزن را تشکیل می‌دهند.

نوع ۲: ماتریکس سنگ دارای تراوایی خوبی می‌باشد در نتیجه شکستگی‌ها نیز مقدار تراوایی میانگین را بهبود می‌بخشد.

نوع ۳: ماتریکس سنگ تراوایی بالایی ندارد اما اکثر حجم هیدروکربن در ماتریکس ذخیره شده است.

نوع ۴: شکستگی‌ها با مصالح ثانویه پر شده‌اند به طوری که از نظر اقتصادی امکان توسعه و تولید برای این مخازن تصور نمی‌شود.

بلهارچ (Belharche, 2005) طبقه‌بندی ارائه شده توسط نلسون را طبق جدول (۱-۲) خلاصه نموده است.

در شرایطی که سنگ تراوا باشد، انتقال سیال به سمت چاه از طریق درزه و شکاف و ماتریکس انجام می‌شود. درزه و شکستگی عموماً دارای سطح صاف نبوده و بدین سبب حرکت سیال در آن در مقایسه با درزه‌های صاف متفاوت است. به منظور شناخت زبری و اثر آن بر جریان سیال درون درزه در بخش بعد پارامترهای درزه به تفصیل تشریح می‌شود.

۲-۳- درزه و شکستگی

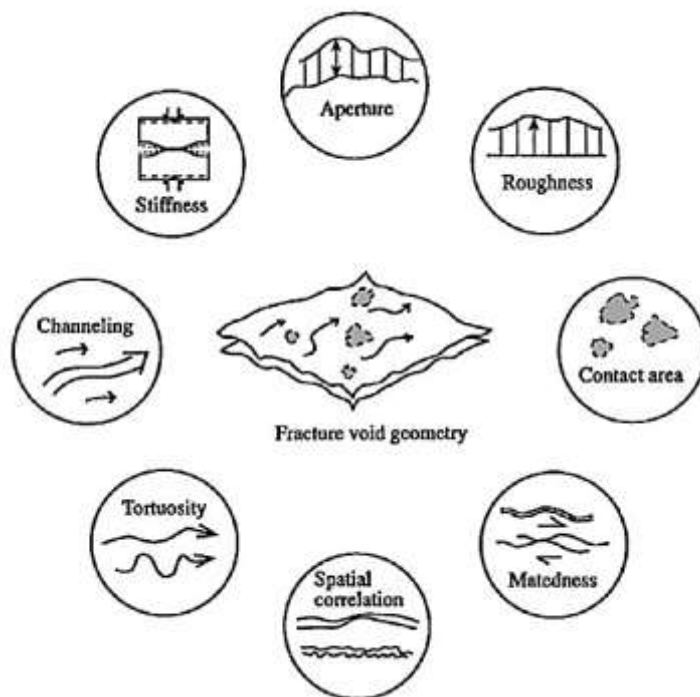
با توجه به اهمیت وجود درزه و شکستگی در مخازن شکافدار و تأثیر آن بر تقسیم‌بندی مخازن و مکانیزم انتقال سیال در ادامه به صورت اجمالی به خصوصیات درزه و محاسبات مربوطه پرداخته می‌شود. از جمله عوامل مهم در این زمینه هندسه بازشدگی و زبری می‌باشد.

مزایا و محدودیت‌ها	نوع مخزن
<ul style="list-style-type: none"> • تراوایی درزه و تخلخل بالای آن برای اقتصادی بودن مخازن ضروری است. • عامل اصلی تولید نفت درزه‌ها می‌باشند. • تعیین تراوایی درزه در مقدار بازیابی ضروری می‌باشد. 	<p>نوع ۱: تخلخل و تراوایی درزه دلیل اصلی تولید می‌باشد</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بازیابی اولیه و ثانویه شدیداً وابسته به ارتباط ماتریکس و شبکه درزه می‌باشد. • روش‌های توسعه تراوایی می‌بایست مشخص شوند. • امکان توسعه تولید توسط درزه‌ها از مخزن ضعیف است. • تعیین تراوایی درزه در دستیابی به پارامترهای موثر و پتانسیل بازیابی بحرانی می‌باشد. 	<p>نوع ۲: درزه، تراوایی اولیه مخزن را فراهم می‌کند. هیدروکربن در درزه و ماتریکس ذخیره شده ولی این درزه‌ها هستند که امکان جریان را فراهم می‌آورند</p>
<ul style="list-style-type: none"> • نواحی زهکشی شده معمولاً بیضوی شکل هستند. • شناسایی و تشخیص سیستم درزه‌ها مشکل است. • درزه‌ها امکان اقتصادی بودن تولید از این ذخایر را فراهم می‌کنند. 	<p>نوع ۳: تولید از ماتریکس تراوا بوسیله درزه‌های تراوا افزایش می‌یابد</p>
<ul style="list-style-type: none"> • به دلیل پرشدگی درزه‌ها، بازیابی بسیار ضعیف است. • در صورت برنامه‌ریزی صحیح توسعه مخزنی اقتصادی می‌شود. 	<p>نوع ۴: درزه سهمی در تراوایی و تخلخل نداشته، بلکه به عنوان موانع جریان نیز عمل می‌کند.</p>

۲-۳-۱- هندسه بازشدگی درزه

هر درزه شامل دو سطح زبر می‌باشد که تحت شرایط تنش و خصوصیات درزه به طور کامل یا جزئی در تماس هستند. زبری درزه موجب ایجاد فضای باز بین سطوح درزه شده و دو سطح در نواحی پراکنده و با هندسه‌ای پیچیده در تماس قراردارند. رفتار مکانیکی ناپیوستگی به مساحت و هندسه سطح تماس وابسته می‌باشد، درحالی‌که رفتار هیدرولیکی آن به ارتباط حفرات و اندازه آن بستگی دارد. تغییر در وضعیت تنش توده‌سنگ، رفتار هیدرومکانیکی ناپیوستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hakami, 1995).

هندسه حفرات درزه (که بوسیله حجم بین دو سطح درزه تعیین می‌شود) به برخی از مشخصات سنگ مانند زبری، مساحت تماس، میزان انطباق سطوح (سطح اتصال) و همبستگی فضایی مرتبط است. هندسه حفرات بوسیله میزان بازشدگی ناپیوستگی تعیین می‌شود و زبری اندازه‌گیری کمی شرایط هندسه سطح درزه است. در شکل (۱-۲) خصوصیات ناپیوستگی بر اساس هندسه درزه نشان داده شده است (Hakami, 1995).



شکل (۱-۲) خصوصیات ناپیوستگی‌ها براساس وضعیت هندسه (Hakami, 1995).

زیمرمن و همکاران (Zimmerman, et al., 1996) ناپیوستگی‌ها را بصورت یک ساختار صفحه‌ای که در صفحه X-Y قرار دارد در نظر گرفته‌اند. دو صفحه مرجع که یکی در قطعه پایین سنگ و دیگری در قطعه بالای سنگ است. فاصله بین دو صفحه مرجع d می‌باشد (شکل (۲-۲)). هندسه سطح پایین توسط تابع $Z_1(x,y)$ (ارتفاع سطح) و هندسه سطح بالا توسط تابع $Z_2(x,y)$ تشریح می‌شود. بازشدگی در راستای عمود بر صفحات مرجع و بصورت زیر تعیین می‌گردد (Zimmerman, et al., 1996).

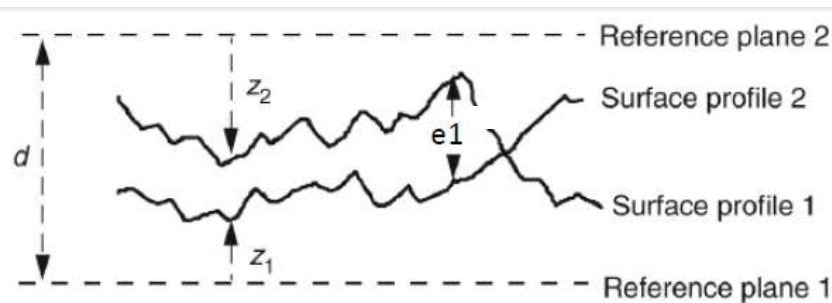
$$e(x, y) = Z_1(x, y) + Z_2(x, y) - d \quad (1-2)$$

در این شرایط، e بازشدگی مکانیکی ناپیوستگی در مختصات (x,y) بوده و مقدار متوسط آن (e_L) بصورت زیر خواهد بود (Zimmerman, et al., 1996):

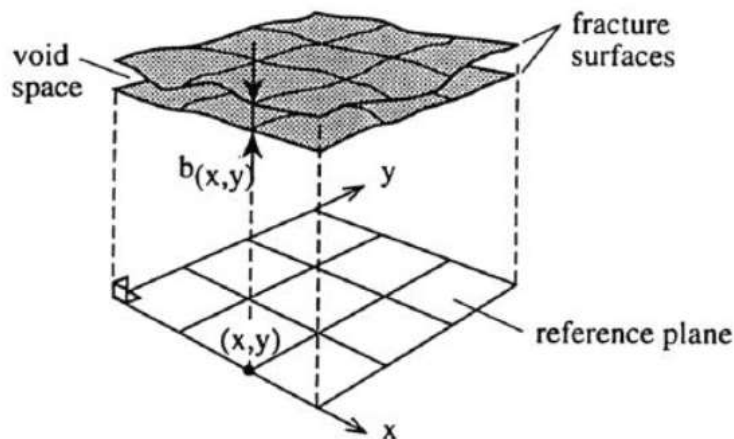
$$e_L = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L e(x, y) dx \quad (2-2)$$

حکمی (Hakami, 1995) بازشدگی $b(x,y)$ را در سه بعد، مطابق شکل (۳-۲) تعریف نموده است. در این حالت، بازشدگی متوسط (e) بصورت معادله (۳-۲) تعیین می‌شود.

$$e = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A} \int_0^A b(x, y) dx dy \quad (3-2)$$



شکل (۲-۲) پروفیل سطح درزه، بازشدگی e ، به همراه صفحات مرجع با فاصله d (Zimmerman, et al., 1996).



شکل (۳-۲) مفهوم بازشدگی درزه (Hakami, 1995).

وقتی ناپیوستگی تحت بارهای نرمال، برشی و یا هر دو بار نرمال و برشی قرار می‌گیرد، دو صفحه ناپیوستگی تحت جابجایی‌های نسبی قرار گرفته و بازشدگی تغییر می‌یابد. لذا بازشدگی فوق‌الذکر، عموماً بازشدگی مکانیکی (e_m) نامیده شده و اثر تنش را بر بازشدگی درزه بیان می‌نماید (Hakami, 1995).

بازشدگی درزه توسط تابع چگالی احتمال (PDF)^۱، چگالی طیف توانی (PSD)^۲ تعیین شده و انحراف استاندارد (σ_e) میزان پراکندگی در توزیع بازشدگی می‌باشد (اشجاری، ۱۳۹۲):

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (e_{ij} - \bar{e})^2}{N}} \quad (4-2)$$

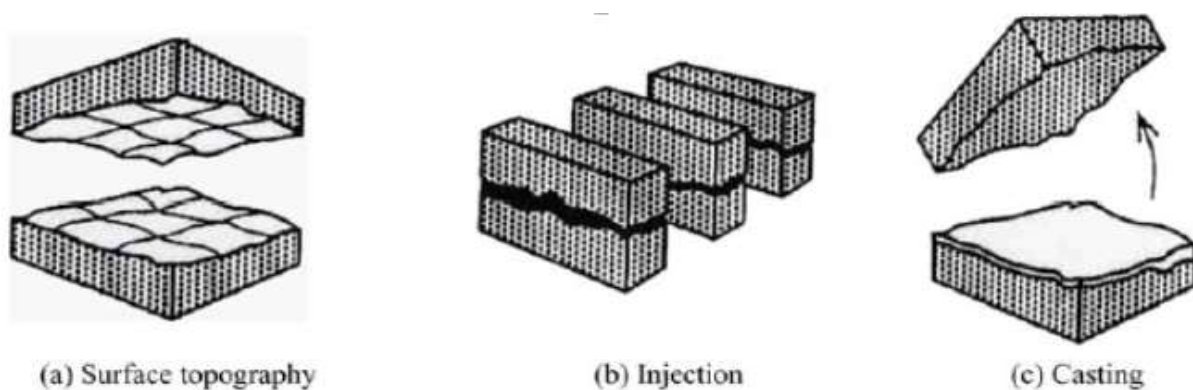
\bar{e} مقدار متوسط بازشدگی اولیه و N تعداد داده‌های بازشدگی است.

1- Probability density function
2- Power spectral density

طبق مطالعات مختلف روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری بازشدگی درزه ارائه شده است. روش‌های مرسوم جهت اندازه‌گیری بازشدگی درزه را می‌توان براساس روش اندازه‌گیری به سه گروه تقسیم نمود (شکل (۲-۴)):

- اندازه‌گیری توپوگرافی سطح
- روش تزریق
- قالب‌گیری

این روش‌ها در ادامه شرح داده شده‌اند.



شکل (۲-۴) روش‌های مختلف اندازه‌گیری بازشدگی درزه (Hakami, 1995).

۲-۱-۳-۱- روش توپوگرافی سطح

در این روش، هندسه دو سطح ناپیوستگی توسط روش‌های مختلفی مانند پروفیل‌سنج مکانیکی یا پروفیل‌سنج لیزری و یا نوری اندازه‌گیری می‌شود (اشجاری، ۱۳۹۲).

۲-۱-۳-۲- روش تزریق

در این روش از رزین، اپوکسی یا دوغاب سیمان برای پرکردن فضای بین سطوح ناپیوستگی استفاده می‌شود. نمونه‌ی حاوی ناپیوستگی پس از انجام تزریق، برش داده شده و بازشدگی توسط فوتومیکروسکوپ و روش‌های آنالیز تصویر و براساس ضخامت مواد تزریق شده تعیین می‌شود. در این روش چون بازشدگی بصورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود، اطلاعات قابل قبولی حاصل می‌گردد. با اینحال اطمینان از پرشدن کامل حفرات درزه با مواد تزریقی محل بحث می‌باشد (بویژه زمانیکه بازشدگی درزه خیلی کوچک باشد) (اشجاری، ۱۳۹۲).

درزه‌ها، صفحات لایه بندی و سایر ناپیوستگی‌های صفحه‌ای، رفتار توده‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وجود درزه‌ها با توزیع غیراتفاقی موجب ایجاد ناهمسانی در رفتار و ویژگی‌های توده‌سنگ (بویژه ناهمسانی مقاومت) می‌شود. درزه‌ها رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای مثال درزه‌ها موجب می‌شوند تراوایی در راستای ناپیوستگی بیشتر باشد.

ناپیوستگی‌ها رفتار مکانیکی توده‌سنگ را کنترل‌نموده و مسیرهایی را جهت عبور سیال ایجاد می‌نمایند. در آزمایشگاه مطالعات متعددی بر درزه‌ها صورت گرفته است. لیکن مسایلی مانند ارزیابی اثر هندسه زبری سطح درزه و کمی‌سازی جریان سیال در ارتباط با آنها ناتمام مانده است.

حکمی (Hakami, 1995) الگوی هندسه ناپیوستگی را بصورت شکل (۱-۲) ارائه نمود. اولسون و همکاران (Olsson, et al., 2001) خصوصیات اجزاء مختلف ناپیوستگی را بصورت زیر بیان نمودند:

- ۱- نواحی تماس^۱: مساحتی که سطوح درزه در تماس بوده و می‌توانند تنش را منتقل نمایند.
- ۲- انطباق^۲: میزان انطباق در سطح درزه
- ۳- همبستگی فضایی^۳: چگونگی تغییر بازشدگی از نقطه‌ای به نقطه دیگر
- ۴- پیچ‌وخم مسیر جریان^۴: انحنا و تغییرات سطح درزه در اثر تغییر بازشدگی از نقطه‌ای به نقطه دیگر
- ۵- کانال‌شدگی^۵: مسیرهای باز به هم متصل در امتداد درزه
- ۶- صلبیت^۶: سختی یا خصوصیات مکانیکی درزه که بیانگر میزان بسته‌شدن درزه تحت اعمال بار نرمال است.

۲-۳-۳- روش‌های کمی‌سازی زبری

تشریح دقیق هندسه سطح موضوع مهمی در ارزیابی رفتار هیدرومکانیکی ناپیوستگی‌ها می‌باشد. یکی از مشخصات درزه، زبری سطح درزه می‌باشد. در مجموع تأثیر هندسه سطح درزه، در رفتار هیدرومکانیکی درزه در شرایط مختلف همچنان مجهول می‌باشد. کمی‌سازی زبری سطح درزه در تخمین مقاومت برشی، اتساع و سختی درزه ضروری است. روش‌های مختلفی جهت کمی‌سازی زبری سطح درزه وجود دارد که به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به ۵ گروه زیر تقسیم‌بندی نمود (اشجاری، ۱۳۹۲):

-
- 1- Contact area
 - 2- Matedness
 - 3- Spatial correlation
 - 4- Tortuosity
 - 5- Channelling
 - 6- Stiffness

۱- اندازه‌گیری ضریب زبری درزه (JRC)

۲- پارامترهای آماری

۳- روش فراکتال^۱

۴- روش طیف‌سنجی

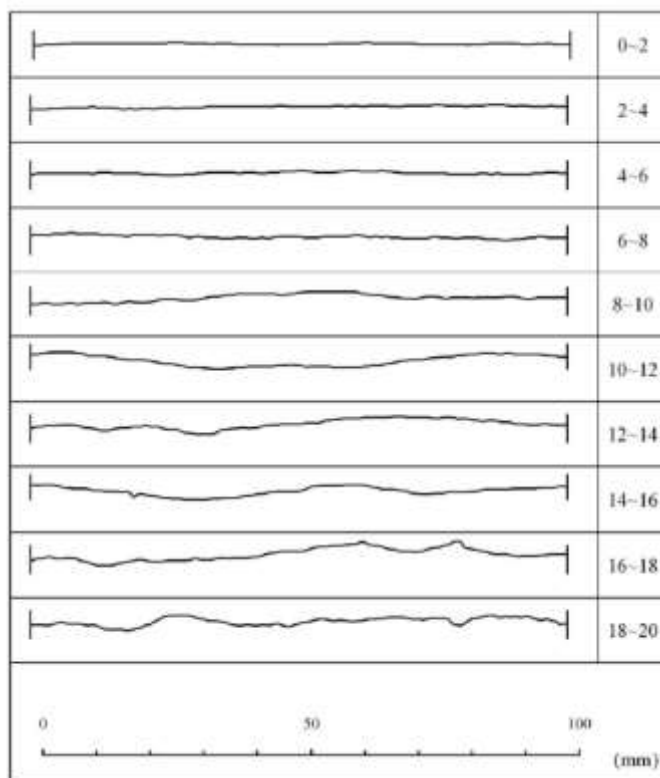
۵- روش تبدیل سری فوریه

با توجه به کارایی بیشتر سه گروه اول در ادامه تنها به تشریح این سه گروه پرداخته می‌شود.

۲-۳-۳-۱- اندازه‌گیری JRC

بارتن^۲ (Barton, 1973) پارامتر JRC را به منظور تعیین زبری در دو بعد معرفی نمود. در این روش زبری ناپیوستگی با استفاده از ده پروفیل استاندارد در محدوده صفر (درزه صاف) تا بیست (درزه زبر) دسته‌بندی می‌شود. پروفیل‌های استاندارد بارتن در شکل (۲-۵) ارائه شده است. این پارامتر براساس مقایسه زبری درزه با پروفیل‌های استاندارد، روش آزمایش سطح شیبدار^۳ و یا تحلیل برگشتی آزمایش‌های برشی قابل محاسبه است. لیکن باید بخاطر داشت که نمی‌توان تنها با استفاده از یک پارامتر، زبری را مشخص نمود، زیرا زبری شامل مشخصات مورفولوژیکی مانند ارتفاع نقاط سطح (ارتفاع دندانها)، زاویه‌داری (شیب‌ها و زوایا)، موجداری (تناوب) می‌باشد. از سویی پارامتر JRC از طریق مقایسه چشمی پروفیل درزه با پروفیل‌های استاندارد بارتن تعیین می‌شود. زبری براساس مقایسه چشمی با خطاهای فاحشی همراه می‌باشد که می‌تواند منجر به تخمین‌های نامناسبی از مقاومت برشی درزه شود.

1- Fractal
2- Barton
3- Tilt test



شکل (۵-۲) پروفیل‌های استاندارد بارتن (Barton, 1973).

۲-۳-۳-۲ پارامترهای آماری

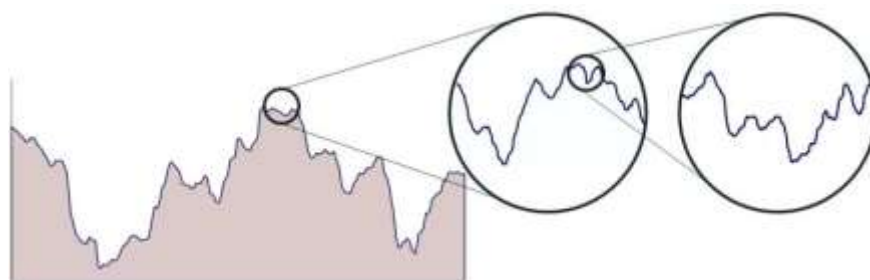
محققین تلاش نموده‌اند زبری درزه را با استفاده از پارامترهای آماری کمی‌سازی نمایند. پارامترهای آماری توصیف‌کننده‌ی هندسه‌ی درزه به دو گروه پارامترهای دامنه‌ای (ارتفاعی) و پارامترهای زاویه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. متداول‌ترین پارامترهای توصیف‌کننده‌ی سطح درزه، متوسط ارتفاع خط مرکزی (CLA)^۱، میانگین مجذور مربعات ارتفاع (RMS)^۲، Z_2 ^۳، تابع همبستگی (ACF)^۴ و تابع ساختاری (SF)^۵ می‌باشند که در ادامه تشریح می‌شوند.

تابع Z_2 به صورت زیر تعریف می‌شود (اشجاری، ۱۳۹۲):

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{x_{i+1} - x_i}} \quad (۵-۲)$$

-
- 1- Centre Line Average Height
 - 2- Root Mean-Square of Height
 - 3- RMS of the first derivative of profile
 - 4- Auto Correlation Function
 - 5- Structure Function

هندسه فراکتال مفهومی است که توسط مندلبرت^۱ (۱۹۷۶) تعریف و در رابطه با اشکال منظم با خواص مشخص به کار گرفته شد. در این هندسه برای اشکالی که دارای خصوصیت خودتشابهی و تشکیل از راه تکرار جزء پایه باشند پارامتری مستقل از مقیاس اندازه‌گیری تحت عنوان بعد فراکتال تعریف می‌شود. خودتشابهی، وجود شباهت‌های آماری در مقیاس مختلف در یک ساختار هندسی می‌باشد (شکل (۲-۶)) و بعد فراکتال درجه بی‌نظمی یک ساختار هندسی را بیان می‌کند (Mohebbi, et al., 2015).



شکل (۲-۶) الگوی شماتیک خودتشابهی در اشکال فراکتال (Mohebbi, et al., 2015).

بعد فراکتال برای اجسام یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی تعریف می‌شود. برای تعیین بعد فراکتال در هر حالت روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از اساسی‌ترین مشکلات روش فراکتال جواب‌های متفاوتی است که از روش‌های مختلف برای یک جسم بدست می‌آید.

در هندسه فراکتال، اندازه‌گیری بعد فراکتال برای یک ساختار در فضای E بعدی توسط فرمول کلی موجود در رابطه (۲-۶) می‌تواند تخمین زده شود (Mohebbi, et al., 2015).

$$G(\delta) = G\delta^{E-D} \quad (۲-۶)$$

در این رابطه E بیانگر بعد اقلیدسی ساختار است. به عنوان مثال برای سطوح دوبعدی $E=2$ در نظر گرفته می‌شود. δ برابر با بعد سلول‌هایی است که سطح با آن پوشش داده می‌شود. در عمل مقدار $H=-(E-D)$ به عنوان بعد نمایی فراکتال لحاظ شده و همواره بین صفر و یک است. به عبارت ساده تر مقدار D برای حالت یک‌بعدی در بازه $[1,2]$ ، در حالت دوبعدی در بازه $[2,3]$ و در حالت سه‌بعدی در بازه $[3,4]$ قرار می‌گیرد.

از مهم‌ترین روش‌های تعیین بعد فراکتال برای اجسام یک‌بعدی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- روش جدایش کمائی

1- Mandelbrot

۲- روش مینکاسکی^۱

۳- روش جدایش مربعی

۴- روش متغیرها

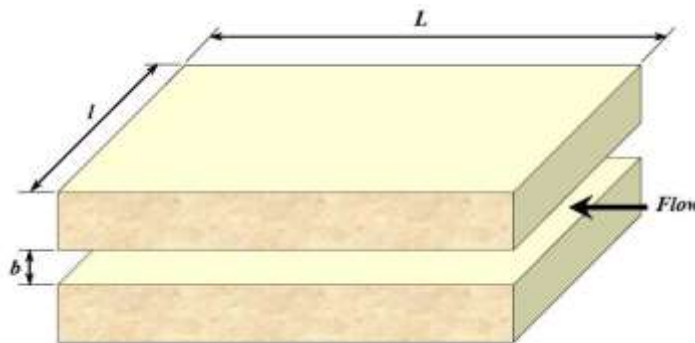
۵- روش دانسیته طیفی

۶- آنالیز واریوگرام

جین یانگ (Jinyong, 2005) عنوان نمود که برای سطوح، مقدار بعد فراکتال می‌بایست نسبت به بعد سوم نرمالایز شود. به عبارتی مقیاس بعد سوم نباید در مقدار بعد فراکتال تأثیر داشته باشد. بر این اساس می‌بایست مقدار بعد فراکتال با لحاظ اینکه مقدار Z در هندسه زبری در ضرایب ۱، ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰ ضرب شود، محاسبه گردد. مقدار بعد فراکتال با افزایش ضرایب به یک عدد ثابت میل می‌کند که بیانگر مقدار بعد فراکتال می‌باشد.

۲-۳-۴- تراوایی تک‌درز

تراوایی یا همان قابلیت انتقال سیال از درزه مهم‌ترین فاکتور در افزایش بهره‌وری مخزن می‌باشد. تعداد زیادی مطالعه بر حرکت جریان سیال در تک‌درزه انجام شده است. مهم‌ترین فرض اکثر مطالعات انجام شده در تعیین تراوایی درزه محدود نمودن درزه بین دو صفحه موازی و صاف است که نتیجه این فرض، قانون مکعب^۲ برای تراوایی درزه می‌باشد. پارامترهای هندسه درزه مشابه شکل (۲-۷) است که بسته به جهت جریان طول و عرض هندسه تعیین می‌شوند.



شکل (۲-۷) توصیف پارامترهای هندسی درزه (Reiss, 1980).

با فرض صفحات صاف برای درزه قانون داری برای جریان به شرح معادله (۲-۷) می‌باشد.

$$q = \frac{AK_f \Delta P}{\mu L} \quad (2-7)$$

1- Minkowski
2- Cubic law

برای جریان آرام در طول دو صفحه موازی معادله پویزیول¹ به صورت رابطه (۸-۲) نوشته می‌شود:

$$q_1 = \frac{b^3 l \Delta P}{12\mu L} \quad (8-2)$$

در سیستم متشکل از n درزه رابطه فوق به رابطه (۹-۲) تبدیل می‌شود.

$$q_n = n \frac{b^3 l \Delta P}{12\mu L} \quad (9-2)$$

با جایگزینی دو رابطه فوق و با در نظر گرفتن $q_n = q_1$ ، تراوایی درزه به صورت رابطه (۱۰-۲) بدست می‌آید.

$$k_f = \frac{n b^3 l}{A 12} = f_s \frac{b^3}{12} \quad (10-2)$$

در رابطه (۱۰-۲)، A سطح مقطع درزه در جهت جریان سیال، b پهنای درزه، $f_s = \frac{nl}{A}$ طول کلی درزه به ازای واحد سطح، k_f نفوذپذیری درزه، L طول مقطع، l پهنای مقطع، ΔP افت فشار در طول درزه، q نرخ جریان می‌باشد.

مدل‌های هندسی در نظر گرفته شده برای حالات مختلف در جدول (۲-۲) ارائه شده است (Reiss, 1980).

جدول (۲-۲) فاکتور f_s مدل‌های مخازن شکافدار (Reiss, 1980)

f_s	مدل
$\frac{2}{a}$	مکعبی
$\frac{1}{a}$	ستونی با جریان عمود بر محور ستون‌ها
$\frac{2}{a}$	ستونی با جریان موازی با محور ستون‌ها
$\frac{1}{a}$	ورقه‌ای

جدول (۲-۲) روابط بین پارامترهای درزه را به صورت تابعی از هندسه درزه ارائه می‌دهد. موارد ارائه شده در این جدول برای درزه‌هایی با سطوح صاف و بدون زبری می‌باشد.

1- Poiseuill

۲-۴- تراوایی ماتریکس تحت تنش

یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرومکانیکی تراوایی می‌باشد که در فعالیتهای معدن‌کاری، عمرانی و صنایع نفت و گاز بسیار حائز اهمیت است. گاهی در اطراف چاه‌های نفت، حفاری باعث می‌شود مقدار تنش بازتوزیع شده، از مقاومت سنگ بیشتر شود و زون‌های اطراف چاه پلاستیک یا خرد شوند. این تغییر باعث باز یا بسته‌شدن درزه‌ها و خلل‌و فرج داخل سنگ و نهایتاً تغییر در خصوصیات مکانیکی و هیدرومکانیکی محیط به خصوص تغییر تراوایی می‌گردد. از اینرو این مهم، اهمیت مطالعه اثر تنش‌های محصورکننده بر تراوایی سنگ را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Wang, et al., 2018).

بر اثر تخلیه سیال از داخل سنگ، تغییراتی بر تنش و کرنش سنگ متخلخل ایجاد می‌شود که می‌تواند در زمان حفاری و بهره‌برداری از مخازن رخ دهد. تغییر شکل یا جابجایی وابسته به تنش بر مقدار جریان و نحوه انتقال آن تأثیر می‌گذارد. اندرکنش بین سنگ و سیال تحت عنوان رفتار توامان هیدرومکانیکی (Hydromechanical Coupling (HM)) شناخته می‌شود که در کوتاه‌مدت و درازمدت بر محیط تأثیر می‌گذارد که در اکثر فعالیتهای معدنی، عمرانی و نفتی، انرژی‌های ژئوترمال، تزریق عمیق سیال، باطله‌های اتمی و غیره به وضوح دیده می‌شود (Wang, et al., 2018) و (Alam, et al., 2014).

از آنجاکه محیط‌های متخلخل مهم‌ترین فضا برای ذخیره مواد هیدروکربنی هستند، خصوصیات هیدرومکانیکی آنها بر مقدار بهره‌برداری تأثیر چشمگیری دارد. اکثر تحقیقات انجام شده عمدتاً متمرکز به انتقال سیال از درون ماتریکس سنگ و شکستگی‌های طبیعی یا مصنوعی است؛ اما در این مطالعات اندرکنش هیدرومکانیکی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی موضوع بازتوزیع تنش که باعث تغییر تراوایی می‌شود در مطالعات کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Alam, et al., 2014) و (Wang, et al., 2018).

پدیده تغییر تراوایی با تغییر تنش طی مطالعات مختلفی بررسی شده است، بطوریکه تحقیقات نشان می‌دهند با افزایش تنش موثر مقدار تراوایی کاهش می‌یابد (Zeng, et al., 2014) (Jasinge, et al., 2011) (Christian, et al., 1994) (Zhaoping, et al., 2013) که این مهم به صورت مستقیم بر مقدار بهره‌برداری تأثیر می‌گذارد. همچنین این تغییر می‌تواند در زمان حفاری یا بهره‌برداری نیز رخ دهد بنحوی که در مخزن‌های نفتی تغییر تراوایی به صورت مستقیم بر مقدار برداشت تأثیر می‌گذارد (Wang, et al., 2018).

اثر تنش محصورکننده و یا فشار روباره بر تراوایی مطلق در محیط‌های متخلخل توسط تعدادی از محققان بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که تراوایی با افزایش تنش همه جانبه کاهش

می‌یابد. همچنین برخی مطالعات نیز اثر تغییر دما بر تراوایی را بررسی کرده‌اند که در این رابطه نتایج مشابهی ارائه شده است (Gobran, et al., 1987). در این میان برخی از مطالعات اثر کاهش تراوایی را به بسته‌شدن میکروتکرک‌ها و کاهش حجم خلل و فرج درون نمونه به افزایش تنش همه جانبه ارتباط داده‌اند که در ادامه به آنها پرداخته شده است (Arona, et al., 1977).

آلام و همکاران (Alam, et al., 2014) اثر فشار همه جانبه را روی تراوایی سه نوع سنگ به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعات کاهش تراوایی با افزایش فشار محصورکننده را در پی داشته است. آنها برای اندازه‌گیری تراوایی سنگ از فرمول داریسی استفاده کرده‌اند که نتیجه آن رابطه لگاریتمی شماره (۱۱-۲) برای سنگ‌های مختلف می‌باشد.

$$\log k = a \cdot \log P + b \quad (11-2)$$

که در آن k تراوایی P تنش موثر همه جانبه (اختلاف تنش کل و فشارمنفذی)، a و b ضرایب ثابت می‌باشد.

ونگ و همکاران (Wang, et al., 2018) حساسیت تراوایی سنگ‌های رسوبی و ماسه‌سنگی را نسبت به تنش‌های همه جانبه مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعات ثابت می‌کند که تغییرات تراوایی نسبت به فشار محصورکننده برای ماسه‌سنگ‌ها حتی برای آن دسته که دارای تراوایی کمتر از 0.1 mD هستند قابل توجه است.

ژنگ و همکاران (Zeng, et al., 2014) اثر فشار همه جانبه و دما را بر تراوایی در سنگ مادستون مورد بررسی قرار داده‌اند. فشار محصورکننده در این مطالعات بین ۱۰ تا ۳۰ مگاپاسکال متغیر بوده است. این در حالی است که اختلاف فشارمنفذی دو سر نمونه برابر ۵ مگاپاسکال و ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج آنها نیز از کاهش غیرخطی تراوایی با افزایش فشار همه جانبه حکایت دارد. لذا با توجه به مطالعات مختلف ارتباط بین تراوایی و تنش موثر یک رابطه از نوع غیرخطی، لگاریتمی، نمایی و یا چند جمله‌ای می‌باشد (XU, et al., (Huang, et al., 2007) (Okazaki, et al., 2014) (Norbert, et al., 2009) (Qiao, et al., 2011) 2007).

در مخازن گازی اثر تغییر تراوایی در دوره بهره‌برداری بر میزان بازدهی چاه در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است و روند افزایش و کاهش آن در ارتباط با تخلیه مخزن (Depletion) و جمع‌شدگی (shrinkage) مصالح در مدل‌سازی‌ها و بررسی‌های مورد نظر اعمال و مطالعه شده است. در ارتباط با

مخازن نفتی مطالعات نشان داده‌اند که با در نظرگیری رفتار کاهش تراوایی برحسب افزایش تنش، مقدار جریان ورودی به چاه در حالت تراوایی دینامیکی کمتر از حالت استاتیک است (Øystein, 2013).

مخازن نفتی به لحاظ تراوایی پایین و تنش بالا یکی از مهم‌ترین مواردی هستند که دستخوش تغییر تراوایی در حین بهره‌برداری می‌شوند. در اکثر مطالعات انجام شده بر مخازن اثر تغییر تراوایی به عنوان فاکتور موثر در بهره‌برداری دیده نشده است و عموماً این مقدار ثابت فرض می‌شود. همچنین طبق این مطالعات عموماً تغییرات تراوایی مخزن در ارتباط با تغییرات تراوایی درزه و شکاف بررسی می‌شود (Lu, 2009) (Tareq, et al., 2003) (Fung, et al., 2005) (Moinfar, et al., 2011) (Manuel, 2011).

۲-۵- مدل‌سازی مخازن شکافدار

همانطور که در دسته‌بندی‌های مخازن شکافدار اشاره شد، در نظر گرفتن رفتار واقعی سیال در مخازن شکافدار دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشد. از آنجاکه اکتشاف و توسعه مخازن شکافدار با توسعه سخت‌افزارهای قوی همراه شده است، اما همچنان امکان مدل‌سازی ریاضی و عددی مخازن شکافدار به صورت واقعی با مشکلات و ساده‌سازی‌هایی همراه می‌باشد. به منظور ساده‌سازی مساله، محققین از روش‌های مختلفی استفاده نموده‌اند. در ادامه خلاصه‌ای از روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل شکافدار ارائه می‌شود.

۲-۵-۱- مدل‌سازی تخلخل تکی^۱

در این مدل فرض بر این است که تمامی ظرفیت مخزن درون درزه‌ها می‌باشد. این مدل همانند نوع یک ذخایر در طبقه‌بندی مهندسی مخازن شکافدار است. در این نوع مدل‌سازی جریان تنها از درزه‌ها عبور نموده و به چاه می‌رسد. عامل اصلی افزایش بهره‌وری چاه در این نوع مدل‌سازی افزایش تراوایی و قابلیت انتقال درزه می‌باشد (Chacon, 2006).

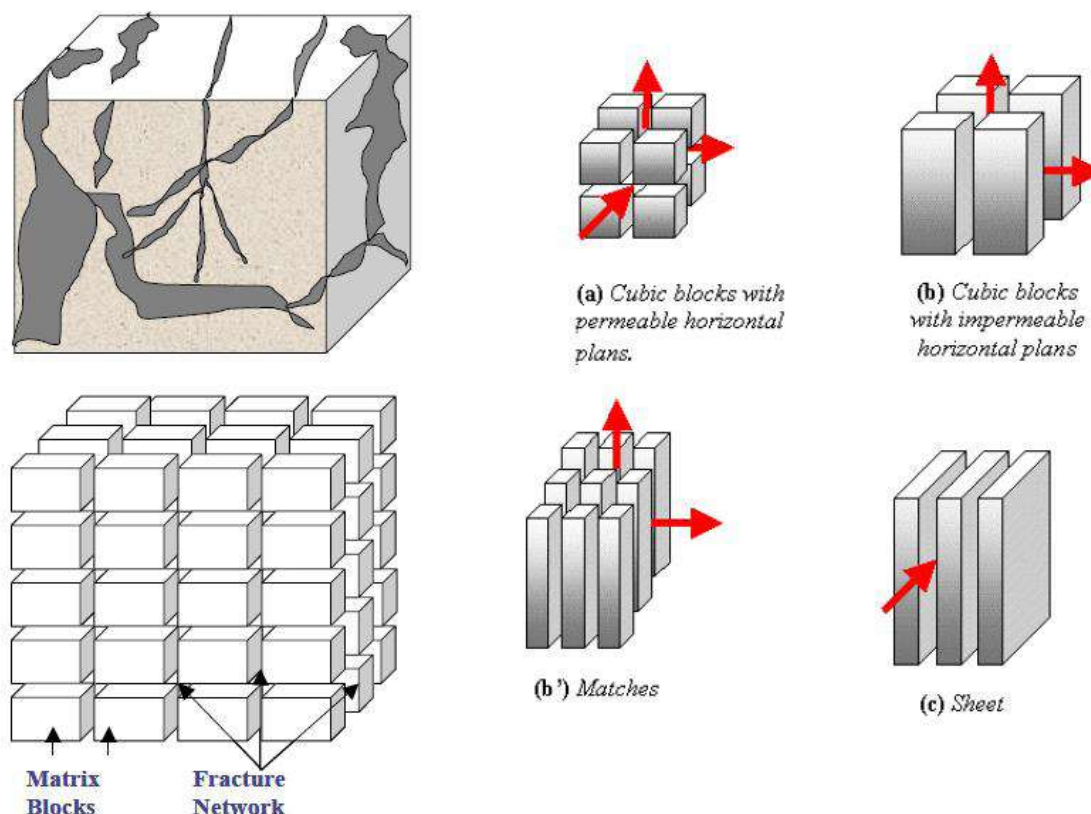
۲-۵-۲- مدل‌سازی تخلخل دوگانه^۲

این مدل جهت مدل‌سازی مخازنی که از دو نوع تخلخل متفاوت (ماتریکس و درزه) تشکیل یافته‌اند بکار می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که ماتریکس، سنگ متخلخلی است که در آن منافذ به یکدیگر راه ندارند، بلکه دارای قابلیت انتقال کم و ظرفیت ذخیره بالا می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که سیستم درزه‌ها دارای ظرفیت ذخیره پایین می‌باشد اما قابلیت هدایت بالای آنها فضاهای متخلخل را به یکدیگر

1- Single porosity
2 -Dual porosity

متصل می‌کند. در این مدل ماتریکس سیال را به درزه‌ها و سپس درزه‌ها سیال را به درون چاه انتقال می‌دهند. در این مخازن مسیر جریان از ماتریکس متخلخل به چاه، درزه‌ها می‌باشد (Chacon, 2006). به عنوان مثال آرگاوال^۱ و همکاران (Argawal, et al., 2000) با استفاده از مدل تخلخل دوگانه، یک مخزن شکافدار عظیم در دریای شمال را با انتخاب یک مدل مناسب برای تبادل جریان بین درزه و ماتریکس مدل‌سازی نمودند.

همانطور که در شکل (۸-۲) نشان داده شده است حالت‌های هندسی مختلف درزه/ماتریکس مانند مدل مکعبی^۲ توسط وارن و روت^۳، مدل درزه افقی موازی توسط کاظمی و مدل ستونی توسط ریس^۴ ارائه شده است (Warren, et al., 1963) (Kazemi, 1969) (Reiss, 1980). مدل تخلخل چند گانه^۵ توسط ابداش^۶ و همکاران (Abdassh, et al., 1986) با ایجاد تغییراتی بر مدل تخلخل دوگانه ارائه شده است. در این مدل فرض می‌شود که یک دسته درزه با دو نوع ماتریکس و با تخلخل و تراوایی‌های متفاوت اندرکنش دارند.

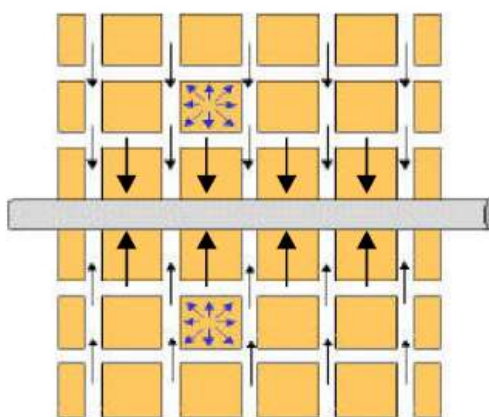


شکل (۸-۲) مدل‌های تخلخل دوگانه (Warren, et al., 1963) (Kazemi, 1969) (Reiss, 1980).

-
- 1 -Argawal
 - 2- Sugar cube
 - 3- Warren and Root
 - 4- Reiss
 - 5 -Multi porosity
 - 6- Abdassh and Ershaghi

۲-۵-۳- مدل سازی تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه

در مدل تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه فرض بر این است که ماده سنگ و درزه‌ها، قابلیت انتقال سیال را دارا می‌باشند. در این مدل سیال به صورت ویژه درون ماده سنگ ذخیره شده و عموماً از طریق درزه‌ها انتقال می‌یابد. اما در مواردی که فشار درون درزه‌ها زیاد شده و از فشار ماده سنگ بالاتر رود امکان انتقال سیال از درزه به ماتریکس نیز وجود دارد. در شکل (۲-۹) به صورت شماتیک رفتار مدل تراوایی دوگانه ارائه شده است (Lu, 2009).



شکل (۲-۹) شماتیک رفتار تراوایی دوگانه-تخلخل دوگانه (Lu, 2009).

۲-۶- اثر زبری بر جریان سیال درون شکستگی

براون (Brown, 1987) نشان داد که با فرض نمودن سطوح صاف برای شکستگی، جریان تخمین زده شده توسط قانون مکعب می‌تواند ۷۰ تا ۹۰ درصد بیشتر از مقدار واقعی نسبت به جریان عبوری از سطوح زبر باشد. در حقیقت زمانی که سیال در شکستگی‌های صاف جریان می‌یابد پروفیل سرعت سهموی شکل و به صورت ایده‌آل می‌باشد که در صورت وجود صفحات زبر این تئوری درست نیست. بنابراین جریان در صفحات زبر نمی‌تواند با قانون مکعب به صورت مناسب پاسخ داده شود. طبق نظر کویاما و همکاران^۱ پارامترهای فیزیکی و تئوری مانند توزیع ریززبری‌ها^۲ می‌بایست در قانون مکعب دخیل شوند (Koyama, et al., 2007).

مقاومت سیال در جریان یافتن از درون بازشدگی‌های متغیر که در صفحات زبر وجود دارد باعث ایجاد جریان در اطراف زبری‌های ریز و ایجاد اغتشاش در جریان می‌شود (Walsh, 1981). مسیر جریان آشفته با بازشدگی هیدرولیکی کنترل می‌شود که با افزایش زبری سطح کاهش می‌یابد و عمدتاً نرخ جریان در شکستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Tsang, 1984)(Renshaw, 1995).

1- Koyama
2- Asperity

تغییرات زبری سطح بستگی به نوع سنگ و ابعاد دانه‌های مصالح دارد (Van (Develi, et al., 2015) (Dam, et al., 1999). عدم قرارگیری دو طرف یک شکستگی می‌تواند در اثر یک جابجایی برشی اتفاق افتد که باعث شکل‌گیری توزیع مجدد ریززبری‌ها (ساختار بازشدگی‌های متغیر) می‌شود (Watanabe, et al., 2008). این مطالعات ثابت نمودند که زبری یک عامل مهم بوده و می‌تواند باعث تغییرات زیادی در نتایج مدل صفحات موازی ایجاد نماید. مشکل اصلی در این زمینه کمی‌سازی این اثرات برای تعداد زیادی از سنگ‌ها، بازشدگی‌ها و نوع سیال در معادله جریان است.

وجود زبری در سطح درزه و امکان جابجایی‌های افقی یا برشی در دو سطح باعث برخورد دو سطح با یکدیگر شده و توزیع فضای بین دو سطح، مسیر جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این حال اعمال فشار عمودی یا قائم در مدلهایی با درزه‌های زبر باعث کاهش تراوایی شکستگی شده است (Bernabe, 1986).

همه این مطالعات بر مسیر جریان که باعث تغییر تراوایی می‌شود، تمرکز داشته‌اند. در این مطالعات بعضاً فشار قائم یا افقی وجود داشته است. در بعضی موارد نیز پروپانت - موادی با مقاومت فشاری بالا و ریزدانه است که در بین درزه قرار داده می‌شوند. این مواد از بسته‌شدن درزه‌ها جلوگیری می‌کند و به این ترتیب تراوایی درزه را ثابت نگه می‌دارد - اضافه شده است.

فاکتور زبری درزه^۱ برای بهبود تخمین واقعی‌تر جریان تعریف شده است (Snow, 1969). در عمل فاکتور زبری درزه تابعی نیمه تجربی می‌باشد که با برازش نمودن مقادیر تخمینی برای تراوایی برحسب زبری محاسبه می‌شود. این فاکتور با تغییر مساحت سطح برای دو درزه با پارامترهای آماری برابر تغییر می‌کند (Jin, 2017).

گاتفرایند و همکاران^۲ (Gutfraind, et al., 1995) شاید اولین افرادی بودند که تراوایی شکستگی خودمتمشابه را مورد بررسی قرار داده‌اند. یک سمت شکستگی آنها بازشدگی خودمتمشابه و طرف دیگر صفحه‌ای موازی جهت جریان بوده است. مدل آنها نشان داد که صفحه میانی (معادل) تحت تأثیر دو طرف درزه است. در نتیجه اثر زبری تحت عاملی به عنوان فاکتور زبری درزه می‌بایست بررسی شود. این حدس و گمان با استفاده از مدل‌سازی عددی اثبات شد.

ژانگ و همکاران^۳ (Zhang, et al., 1996) جریان سه‌بعدی را درون شکستگی خودمتمشابه مدل‌سازی نمودند و دریافتند که تراوایی موثر (k) تابعی نمایی از مقدار بازشدگی است. به این ترتیب که $k \approx e^{\beta}$ و β

1- Surface Roughness Factor
2- Gutfraind and Hansen
3- Zhang et al

بین ۲ تا ۶ و e بازشدگی میانگین است. آنها همچنین اظهارداشتند که هیچ رابطه تحلیلی‌ای برای تعیین تراوایی درزه‌های زبر وجود ندارد.

اسکجتن و همکاران^۱ (Skjetne, et al., 1999)، اورون و همکاران (Oron, et al., 1998) با استفاده از مدل عددی المان محدود دریافتند که امکان مدل‌سازی جریان به روش مکعب در مقیاس کوچک و به صورت محلی^۲ وجود دارد. طبق این قانون درزه را به المان‌های ریز تبدیل کرده و تراوایی هر المان از قانون مکعب محاسبه می‌شود. در نتیجه حرکت سیال در هر المان بر اساس تراوایی آن المان انجام می‌شود.

در ادامه فعالیت‌های عددی دریزر و همکاران (Drazer, et al., 2000) مدلی برای تعیین تراوایی ارائه نمودند و دریافتند که زمانی که $H=1$ (متغیر نمایی در مدل فراکتال) است مدل قانون مکعب محلی قابل استفاده است.

مددی و همکاران (Madadi, et al., 2003) طبق تحقیقات خود نشان دادند که تنها بازشدگی برای تعیین تراوایی مخصوصاً برای بازشدگی‌های زبر و خودمتشابه کافی نمی‌باشد.

در اکثر تحقیقات انجام شده (Jin, 2017) معادلات جریان برای حالتی در نظر گرفته شده‌اند که سیال به صورت آرام و در شکستگی با صفحات صاف حرکت کند. در این حالت مقدار تراوایی موثر از رابطه (۱۰-۲) $(k = \frac{e^3}{12L_0})$ قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن $\varphi = \frac{e}{L_0}$ عبارت کوتاه‌تر هم می‌شود که در آن φ تخلخل کل درزه را نشان می‌دهد.

جین (Jin, 2017) اظهارداشت که زبری درزه تأثیرات دیگری روی جریان سیال دارد و آن تغییر مسیر جریان از یک مسیر مستقیم و صاف به یک مسیر دارای پیچ‌وخم است که این عامل باعث ایجاد دو فاکتور کاهنده دیگر در معادله جریان می‌شود و عموماً این دو فاکتور را روی تراوایی موثر می‌داند. در نتیجه به علت زبری دو نوع پیچ‌وخم به وجود می‌آید: ۱- پیچ‌وخم حاصل از حرکت سیال ۲- پیچ‌وخم سطح که باعث تغییر مساحت سطح می‌شود.

بر اساس تحقیقات آمبگوکار، هالپرین و لانگر^۳ (Jin, 2017) سه محدوده رفتاری متفاوت برای جریان در درزه‌های خودمتشابه تعیین شده است ۱- محدوده AHL^۴، ۲- محدوده مکعب برای بازشدگی‌های بزرگ و ۳- محدوده بینابین این دو.

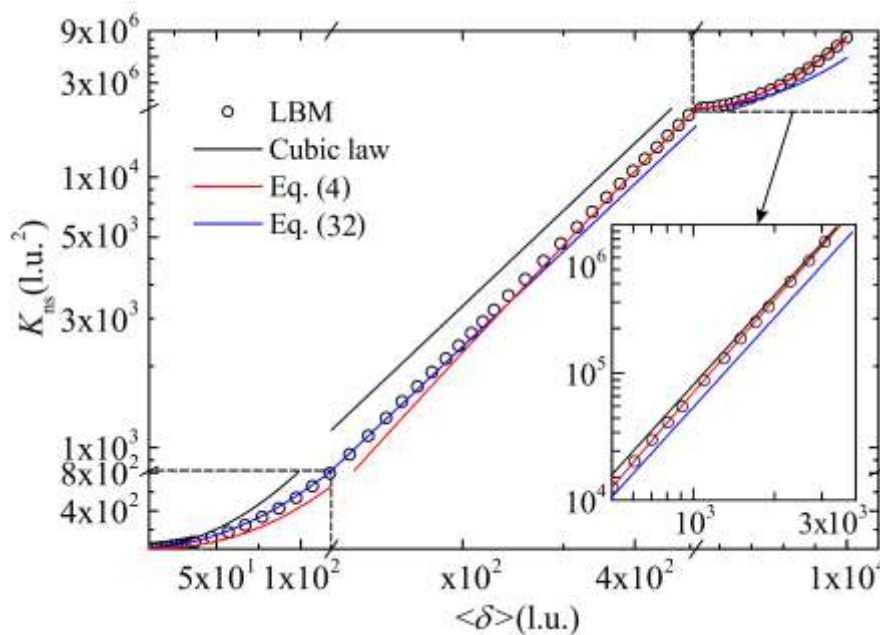
1- Skjetne

2- Local

3- Ambegaokar, Halperin and Langer

۴- این محدوده را به نام خود ثبت کرده‌اند.

جین و همکاران (Jin, 2017) نشان دادند برای بازشدگی‌های متفاوت سه حالت ارائه شده توسط آمبگوکار و همکاران صحیح می‌باشد.



شکل (۲-۱۰) تغییرات تراوایی برحسب بازشدگی (Jin, 2017).

طبق شکل (۲-۱۰) در مقادیر بازشدگی زیاد قانون مکعب، در مقادیر بازشدگی کم رابطه AHL و در مابقی ابعاد روابط بینابین حاکم می‌باشد (Jin, 2017).

طبق مطالعه انجام شده توسط جین (Jin, 2017) قانون مکعب برای تخمین تراوایی درزه زبر در محدوده بازشدگی‌های کم نتایج غیرواقعی را ارائه می‌دهد (شکل (۲-۱۰)). این در حالی است که برای بازشدگی‌های متوسط به بالا، تخمین مناسب‌تری از تراوایی ارائه می‌دهد. همچنین مطالعات ایشان مشخص کرد که اثر زبری درزه با در نظر گرفتن یک فاکتور در معادله تراوایی قابل توجه نمی‌باشد.

چاء و همکاران (Chae, et al., 2011) مطالعه‌ای تحت عنوان آنالیز مشخصات تراوایی در طول شکستگی بر سطح زبر انجام داده‌اند. در این مطالعه تراوایی یک تک‌درزه با در نظر گرفتن هندسه توپوگرافی دو سطح درزه انجام شده است. اندازه‌گیری هندسه درزه در این مطالعه با استفاده از روش برداشت میکروسکوپ اسکن لیزر متمرکز (CLSM)^۱ بوده که قابلیت برداشت نقاط را با دقت زیاد دارد. نقاط برداشت شده با استفاده از روش آنالیز سری فوریه کمی‌سازی شده‌اند. این معادلات برای بازسازی هندسه درزه استفاده شده است. در این مطالعه ضریب تراوایی بر اساس هندسه محلی درزه و سرعت سیال در آن محدوده محاسبه می‌شود. در این روش خصوصیات سیال در دو مقیاس میکرو و ماکرو با اعمال

1- Confocal Laser Scanning Microscope

معادلات ناویر استوکس مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین سرعت سیال در یک سلول میکرو با استفاده از معادلات ناویر استوکس محاسبه شده است سپس بر اساس فرمول‌های مربوطه مقدار تراوایی محاسبه می‌شود. همچنین در مطالعه چاء و همکاران (Chae, et al., 2011) اثر جابجایی برشی بر تراوایی درزه زیر مورد تحلیل قرار گرفته است. زمانی که درزه تحت اثر جابجایی برشی قرار می‌گیرد، مقدار جفت‌شدگی آن کم می‌شود. بر اساس اینکه درزه‌ها خودمتشابه باشند یا نه، در مقادیر جابجایی مختلف تغییرات زیادی در مقدار جفت‌شدگی ایجاد می‌شود. در صورتی که درزه‌ها خودمتشابه باشند در طول‌های مشخصی می‌توان روند تکراری تغییرات را مشاهده نمود. تغییرات جفت‌شدگی باعث بوجود آمدن کانال‌های جریان متفاوت نسبت به کانال جریان اولیه می‌شود. لذا لحاظ نمودن تنها بازشدگی متوسط و در نظر نگرفتن فاکتور زبری و مقدار جابجایی افقی برای تعیین تراوایی درزه باعث ایجاد تفاوت زیاد بین نتایج قانون مکعب و نتایج آزمایش شده است.

موراتا و سایتو^۱ (Murata, et al., 2003) حرکت پیچ‌وخم سیال درون درزه را به دلیل هندسه سطح و شرایط اتصال دو سطح درزه دانسته‌اند. بعلاوه اظهار داشته‌اند که این عامل باعث انحراف مقدار تراوایی واقعی از مقدار ارائه شده توسط قانون مکعب می‌شود.

واش و بریس^۲ معادله (۲-۱۲) را برای تراوایی سنگ ارائه نمودند (Murata, et al., 2003):

$$k = \frac{\varphi^3 V_b^2}{\beta \tau^2 A_s^2} \quad (2-12)$$

که در آن φ تخلخل، V_b مدول حجمی، β فاکتور شکل فضای خالی (که برای فضاهای استوانه‌ای برابر ۲ و برای صفحات موازی برابر ۳ می‌باشد) τ پیچ‌وخم، A_s مساحت سطح فضای خالی است. آنها عنوان نمودند که تراوایی در ارتباط با فاکتور شکل فضای خالی می‌باشد، بدون اینکه مستقیماً بر پیچ‌وخم تأثیر داشته باشد. واش و بریس فرض نمودند که جریان الکتریکی و جریان سیال از یک مسیر عبور می‌نمایند و همچنین پیچ‌وخم جریان سیال و جریان الکتریکی یکسان در نظر گرفته شد. اما براون (Brown, 1989) با مدل‌سازی نشان داد که مسیر جریان الکتریکی و سیال متفاوت است. در نتیجه پارامتر دیگری برای تخمین پیچ‌وخم و تراوایی سیال مورد نیاز است.

آیگریم (Aigerim, 2015) به منظور بررسی اثر زبری بر تراوایی یک مطالعه آزمایشگاهی انجام داده‌است. در این مطالعه ایشان از هفت نمونه از سنگ‌های گرانیت، مرمر و آهک برای انجام آزمایش‌ها استفاده کرده‌اند. یک نمونه نیز در آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت که دارای سطح صاف بوده است. در

1- Murata & Saito
2- Wash and Brace

مطالعه ایشان دو نوع شکستگی آزمایش شده است: (۱) درزه‌های کاملاً جفت شده (۲) درزه‌های جابجا شده (قسمت بالایی درزه به مقدار مشخص در جهت برشی جابجا شده است). سطح شکستگی به روش تصویربرداری برداشت شده و سپس بعد فراکتال هر شکستگی با استفاده از واریوگرام D_{va} و آنالیز منشور مثلثی محاسبه شده است. نسبت بین سطح کل درزه به سطح صاف آن نیز برای همه درزه‌ها مشخص شده است. با آنالیز تغییرات فشار در هندسه‌های درزه مختلف به این نتیجه رسیدند که زبری در بعضی از سنگ‌ها باعث کاهش تراوایی و در بعضی باعث افزایش آن شده است. همچنین جابجایی افقی یا برشی عموماً باعث افزایش تراوایی شده است.

در تحقیق دیگری باباداگلی و همکاران (Babadagli, et al., 2015) یک سری آزمایش‌ها بر درزه زبر انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده‌است که نرخ جریان هیدرولیکی با افزایش زبری کاهش می‌یابد و این روند کاهش مستقل از مقدار بارگذاری قائم است.

۲-۷- رفتار غیرخطی جریان در درزه‌های زبر

همانطور که در مطالب بخش‌های قبلی اشاره شد در ارتباط با بررسی جریان سیال درون درزه‌ها عموماً از معادله مرسوم داری (مدل خطی یا مدل مکعب) استفاده می‌شود. در این رابطه مطالعات زیادی در مورد بحث زبری انجام شده که در آن سطح درزه، زبری به شکل دندانهای (Elsworth, et al., 1986) و (Wilson, et al., 1974) یا سینوسی شکل (Elsworth, et al., 1986) در نظر گرفته شده است. در مطالعات انجام شده رفتار جریان به صورت تابعی از بازشدگی هیدرولیکی موثر بررسی شده است. طبق این مطالعات استفاده از تابع ناویر-استوک برای بررسی جریان سیال درون درزه در نرم‌افزارهای عددی نتایج واقعی‌تری را نشان می‌دهد.

جوادی و همکاران^۱ (Javadi, et al., 2010) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی جریان درون درزه به این نتیجه رسیدند که رفتار جریان درون درزه یک جریان غیرخطی بوده و از قانون فورچمیر^۲ تبعیت می‌کند. طبق این قانون افت فشار دو سر درزه تابعی از توان دوم نرخ جریان عبوری از آن درزه می‌باشد:

$$\Delta P = AQ + BQ^2 \quad (2-13)$$

در این معادله A و B اعداد ثابتی بوده و P و Q به ترتیب فشار و نرخ جریان می‌باشد. تعیین مقادیر A و B از مهم‌ترین بخش‌های حل جریان طبق این قانون می‌باشد.

1- Javadi & et.al
2- Forchheimer

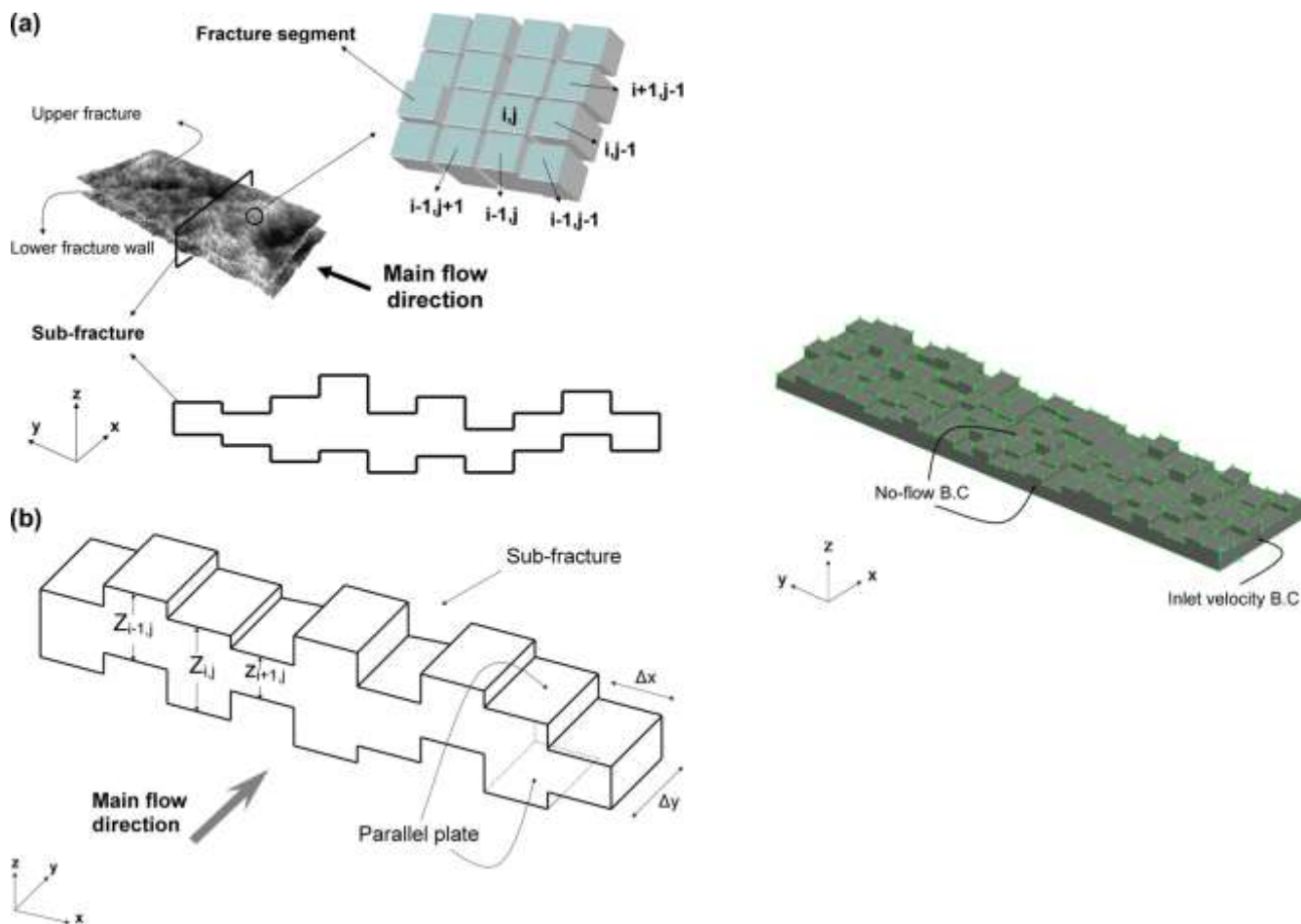
براساس این معادله با فرض صفر بودن مولفه غیرخطی، رابطه داری بدست می‌آید. در نتیجه می‌توان بیان داشت که رابطه داری ساده شده رابطه فورچمیر است که در مقادیر نرخ جریان عبوری کم و اختلاف فشار ناچیز این فرایند تامین می‌شود. طبق مطالعات انجام شده اگر فرض بازشدگی یکنواخت برای سطح درزه متصور شود، می‌توان مقادیر ضرایب معادله فورچمیر را در ارتباط با بازشدگی معادل درزه طبق روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲) تعیین کرد. همانطور که مشخص است مقدار بازشدگی مد نظر در این رابطه بازشدگی هیدرولیکی (e_h) می‌باشد (Zhou, et al., 2015).

$$A = \frac{12\mu}{we_h^3} \quad (14-2)$$

$$B = \frac{\beta\mu}{w^2e_h^2} \quad (15-2)$$

در رابطه فوق مقدار β به عنوان Non-Darcy Flow Coefficient با دیمانسیون L^{-1} می‌باشد.

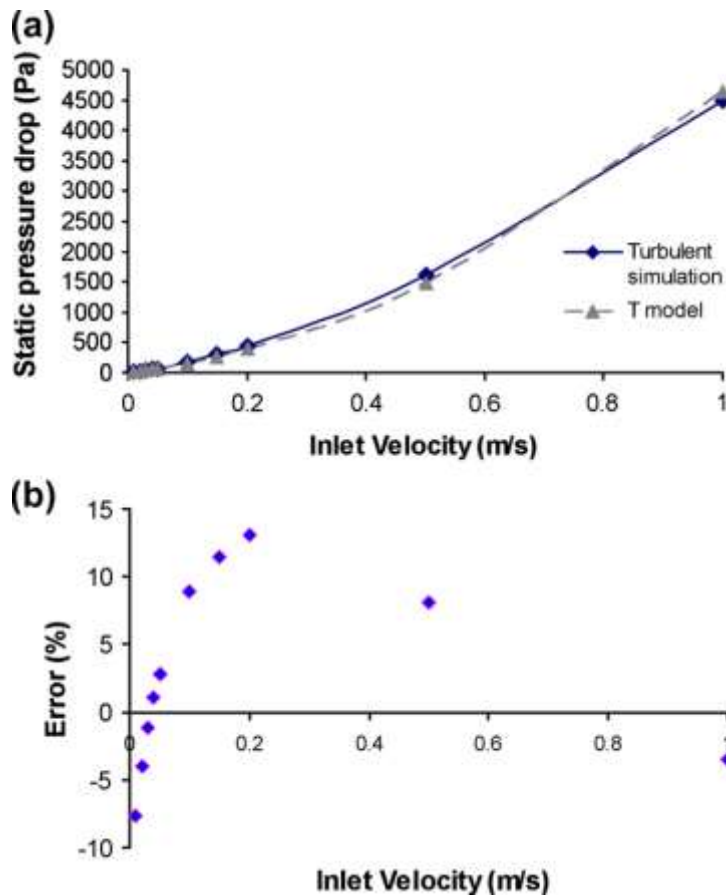
جوادی و همکاران (Javadi, et al., 2010) با در نظر گرفتن سه درزه به صورت المان‌های مربعی و بررسی وضعیت حاکم بر رفتار سیال، معادله‌ای ارائه نمودند که در آن می‌توان رفتار جریان را با تقریب نسبتاً خوبی پیش‌بینی نمود. در مطالعه ایشان سطح درزه به المان‌های مربعی تقسیم شده و ارتفاع هر المان نماینگر مقدار بازشدگی در آن المان است. به منظور مشخص نمودن و نامگذاری هر المان از اندیس های i و j مشابه شکل (۱۱-۲) استفاده نمودند.



شکل (۲-۱۱) مدل سازی زبری با استفاده از المان های مربعی (Javadi, et al., 2010).

در مطالعه موردی انجام شده توسط جوادی و همکاران رفتار سیال توسط مدل ارائه شده (T-Model) و رفتار واقعی (مدل سازی شده با استفاده از نرم افزار FLUENTTM) به همراه درصد خطا برای سرعت جریانهای متفاوت مشابه شکل (۲-۱۲) می باشد که نشان از دقت قابل قبول مدل آنها دارد (Javadi, et al., 2010).

همانطور که مشاهده می شود تطابق خوبی بین پیش بینی مدل T و رفتار واقعی سیال وجود دارد. در نتیجه فرض رابطه غیرخطی برای جریان سیال در درزه های زبر تطابق بهتری با واقعیت داشته و نتایج بهتری را خواهد داشت. نکته قابل توجه در مطالعه جوادی و همکاران این است که ایشان رفتار هیدرولیکی جریان در درزه زبر را مستقل از رفتار هیدرومکانیکی محیط پیرامون درزه دانسته اند. در مدل ایشان محیط پیرامون درزه محیطی کاملاً ناتراوا بوده و جریان تنها از مسیر درزه حرکت می کند. همچنین زبری درزه برای یک سطح لحاظ شده است و سطح دیگر صاف می باشد.



شکل (۲-۱۲) a- تطابق خروجی مدل T و مدل‌سازی واقعی b- درصد خطا بین دو مدل در مقادیر گذردهی مختلف (Javadi, et al., 2010)

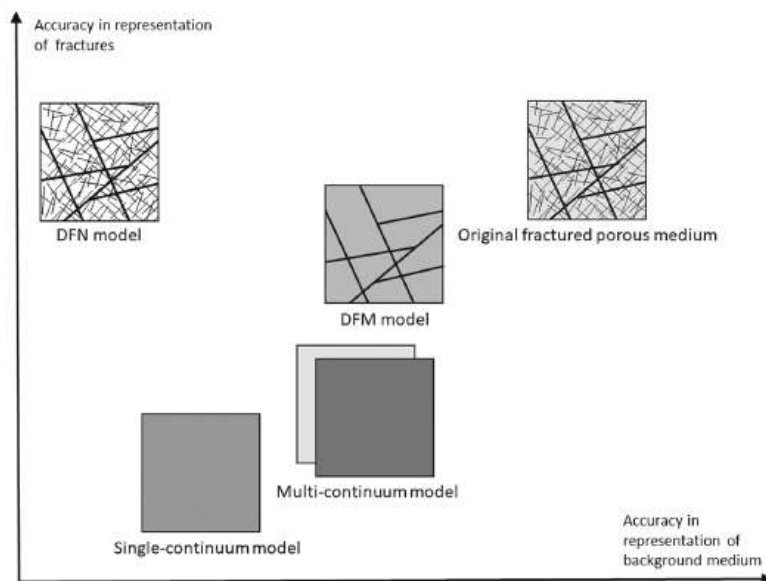
(جوادی، ۱۳۹۷) عنوان نمود که رفتار سیال در درزه‌های مخازن کربناته عموماً رفتار غیرخطی است که گرادیان هیدرولیکی بحرانی آن در مخازن کمتر از ۲۵ می‌باشد. ایشان بیان نموده‌اند که در نظرگیری رفتار خطی برای جریان سیال در مخازن شکافدار، باعث ایجاد خطا در تحلیل مخزن می‌شود.

۲-۸- مدل‌سازی مخازن کربناته

در این بخش به ارائه مطالعات انجام شده در رابطه با مدل‌سازی مخازن شکافدار با در نظر گرفتن رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه پرداخته می‌شود. در ارتباط با مدل‌های ارائه شده و مباحث پایه‌ای مرتبط مطالعات زیادی انجام شده است به طوری که در بحث مدیریت منابع آبی (Glaser, et al., 2017) و (Peng, et al., 2017) ژئوترمال (Willems, et al., 2019) و (Salimzadeh, et al., 2019) و (Salimzadeh, et al., 2019) هیدروکربن‌ها (Wheeler, et al., 2019) و (Andrianov, et al., 2019) و (Kadeethum, et al., 2019) و (Kadeethum, et al., 2020) تحقیقاتی در این رابطه انجام داده‌اند.

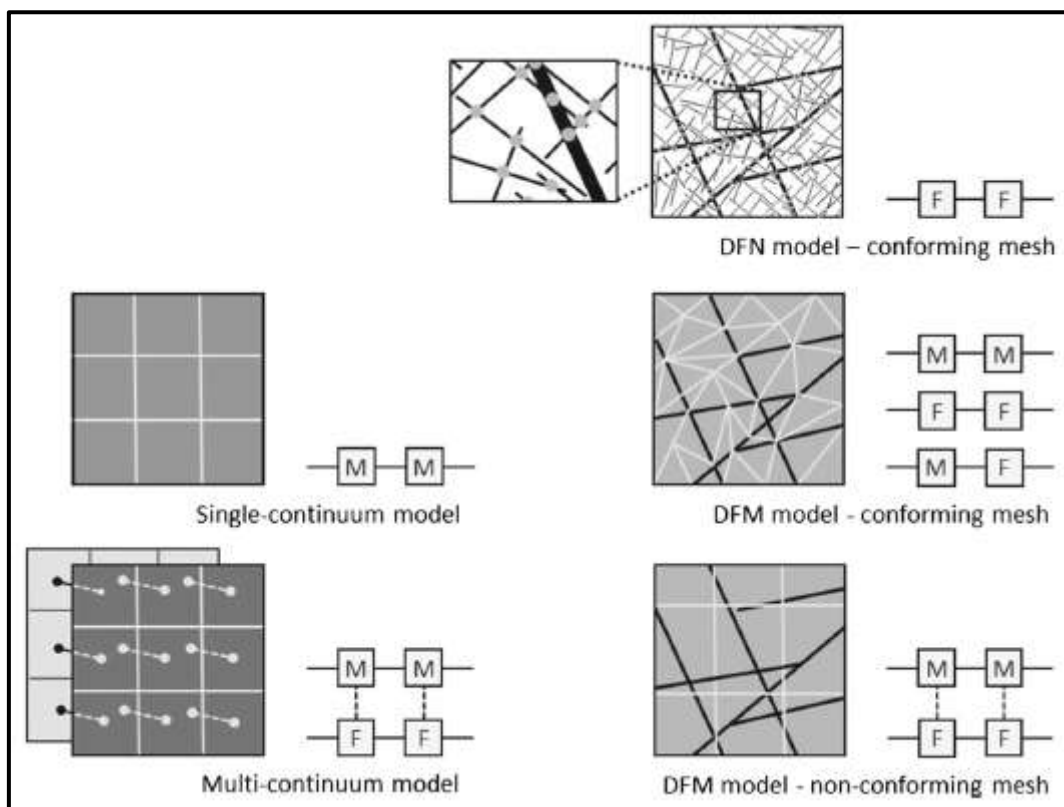
مطابق مطالعات ارائه شده توسط (Nick و Matthai 2011) (Flemisch, et al., 2018) (Juanes, et al., 2002) دو رویه کلی برای ارائه رفتار سیال بین ماتریکس متخلخل در درزه در نظر گرفته می‌شود. در رویه اول در این حالت ماتریکس و درزه به صورت هم بعد و در محیط گسسته حل می‌شوند (Salinas, et al., 2018) (Latham, et al., 2018) (Latham, et al., 2013) (برای درزه نیز المان حجمی لحاظ می‌شود). مدل دوم، با فرض اینکه ضخامت شکستگی در مقایسه با اندازه دامنه ماتریکس بسیار کوچکتر است، دامنه شکستگی را به ابعادی کوچکتر کاهش می‌دهد. از جمله مزیت رویکرد دوم کاهش درجه‌های آزادی مدل است (Boon, et al., 2018) (Martin, et al., 2005) (Berrone, et al., 2018) (Nick, et al., 2011) (Matthai, et al., 2010).

(Berre, et al., 2019) برای روش‌های مدل‌سازی و اندرکنش سیال و سنگ مدل‌های مختلفی را بررسی نموده‌اند. طبق شکل (۲-۱۳) روش‌های مختلف هندسه پیوسته و ناپیوسته در مدل‌سازی محیط متخلخل درزه‌دار نمایش داده شده است. طبق این شکل مدل‌هایی که درزه‌ها را به درستی در محیط مدل‌سازی می‌کنند دقت مناسبی در ارائه نتایج دارند. در این راستا روش‌های معادل‌سازی محیط از دقت پایینی برخوردار می‌باشند. همچنین در صورتی که درزه به صورت یک ماتریکس با تراوایی بالا لحاظ شود نیز دقت قابل قبول را ندارد.



شکل (۲-۱۳) روش‌های مدل‌سازی و دقت مورد نظر در هر روش (Berre, et al., 2019).

طبق شکل (۲-۱۴) در روش‌های مختلف مدل‌سازی محیط، نحوه مش‌بندی نیز متفاوت خواهد بود. در روش DFN یا مدل‌سازی وضعیت منطقی مخزن تطابق خوبی بین مش‌های درزه و ماتریکس وجود دارد. در روش‌های معادل‌سازی این تطابق کم بوده یا بعضاً وجود ندارد و ارتباط آنها به صورت فرضی در مدل لحاظ می‌شود.



شکل (۲-۱۴) نحوه حل معادلات جریان سیال در روش‌های مختلف مدل‌سازی ماتریکس و درزه (Berre, et al., 2019).

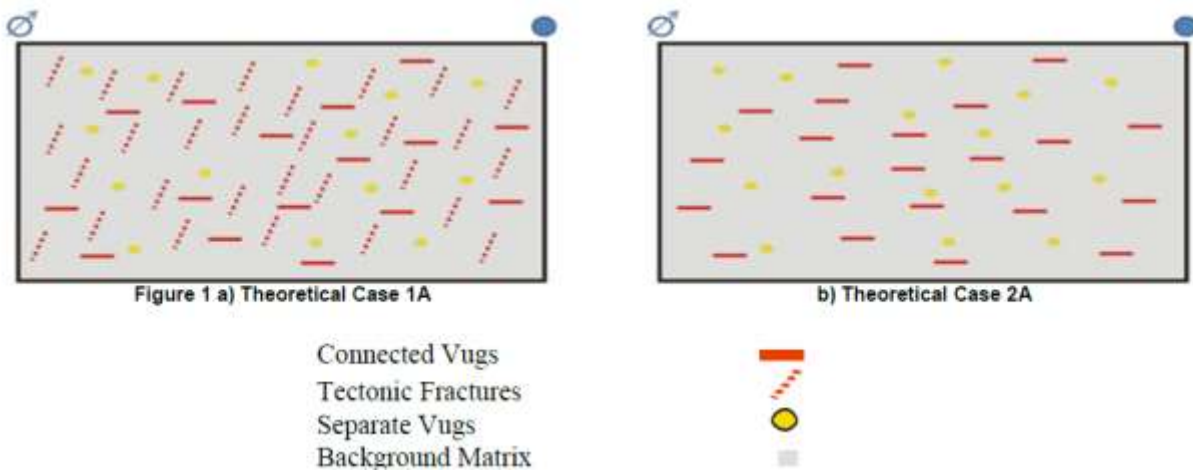
فلمیش (Flemisch, et al., 2018) اثر چند روش مش‌بندی مختلف، (BOX، XFEM) و المان مجزا با لحاظ المان حجمی (Jiang, et al., 2017) را در چهار هندسه متفاوت و شرایط هیدرولیکی مختلف، برای یک جریان تک‌فازی مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که نتایج حاصل از همه روش‌ها تقریباً برابر و قابل قبول می‌باشد و تنها اختلاف موجود باعث می‌شود در بعضی از مدل‌ها تعادل و همگرایی نهایی ایجاد نشود. البته ایشان عنوان کردند که عدم همگرایی در برخی از مدل‌ها و در شرایط خاص استفاده از یک مدل بخصوص می‌باشد. بطوریکه با تغییر بعضی از شرایط اولیه امکان همگرایی برای آن مدل‌ها نیز وجود می‌آید. تفاوت اصلی بین همه آنها زمان حل مدل‌ها و پردازنده‌های مورد نیاز برای آنها می‌باشد.

به منظور بررسی رفتار جریان درون مخزن لو (Lu, 2009) برای چاه افقی در یک مخزن کربناته دو حالت تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه را در نظر گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن رفتار تراوایی دوگانه باعث تغییراتی در فرایند حرکت و فشار سیال می‌شود. تغییرات فشار در مخازن شکافدار کربناته همیشه با استفاده از روش وارن و روت با در نظر نگرفتن جریان درون ماتریکس ساده سازی می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دهنده اثر نسبت تراوایی ماتریکس به درزه در ته چاه است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت تراوایی اختلاف فشار در ته چاه بیشتر شده است. در زمان‌های اولیه بهره‌برداری از چاه رفتار خطی حاکم است. در زمان‌های بالا تغییرات نشان داده شده اهمیت تراوایی دوگانه

را اثبات می‌کند. لازم به توضیح است در جایی که سنگ ناتراوا فرض می‌شود، معادله وارن و روت حاکم شده است.

مانوئل (Manuel, 2011) به منظور مقایسه روش تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه به روش مدل‌سازی عددی آنالیز حساسیتی روی این دو روش انجام دادند. ایشان اظهار داشتند که بهترین روش برای مقایسه و آنالیز حساسیت سیستم تخلخل دوگانه یا تراوایی دوگانه با شکستگی‌های کوچک و بزرگ مقیاس استفاده از سلول‌های کوچک و ریز است. در این روش محیط مخزن به صورت پیوسته مدل شده و محدوده درزه‌ها با المان‌هایی از جنس محیط و تراوایی بالاتر مدل‌سازی می‌شوند. در حالت تخلخل دوگانه سرعت جریان درون درزه‌ها نسبت به حالت فرض محیط پیوسته، بیشتر می‌باشد و در حالت تراوایی دوگانه با در نظر گرفتن حفرات مجزا^۱ (منافذ حاوی سیال موجود در ماتریکس که عمل انتقال سیال را نیز انجام می‌دهند) سرعت جریان از حالت تخلخل دوگانه نیز بیشتر می‌شود که نشان از اهمیت حالت تراوایی دوگانه است. مدل‌سازی تخلخل و جریان درون درزه مهم‌ترین مشکل در مدل‌سازی عددی در مخازن شکافدار است. مدل‌سازی عددی مخازن شکافدار طبیعی یکی از موضوعات مهم بوده و چندین روش برای آن ارائه شده است. از آنجاکه مدل‌های با مقیاس ریز زمان‌بر می‌باشند (حتی با کامپیوترهای امروزی) لازم است از حالت تخلخل دوگانه و یا تراوایی دوگانه در جای خود به صورت درست استفاده شود. در بررسی انجام شده توسط مانوئل و همکاران حفرات مجزا به صورت ماده‌ای با تخلخل بالا و تراوایی پایین تعریف می‌شود و به صورت تصادفی در داخل ماتریکس سنگ توزیع شده‌اند. شکستگی‌های تکتونیکی یا حفرات مجزای متصل به نحوی تعریف می‌شوند که دارای تراوایی بالا و تخلخل پایین هستند. ماتریکس سنگ تحت عنوان ماده‌ای با تراکم‌پذیری کم ولی تخلخل بالا و خوب تعریف می‌شود. با استفاده از رابطه تراوایی و تخلخل-تعریف شده توسط لوسیا^۲- آزمایش‌هایی برای حالت وجود حفرات مجزا و برای حالت عدم وجود حفرات مجزا در دو حالت تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه تعریف شده‌اند (شکل (۲-۱۵)) (Manuel, 2011).

1- Seprate Vugs
2- Lucia



شکل (۲-۱۵) شماتیکی از مدل سازی رفتار تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه (Manuel, 2011).

خصوصیات هیدرولیکی تخصیص داده شده به مدل توسط ایشان به شرح جدول (۲-۳) می باشد.

جدول (۲-۳) خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی تخصیص داده شده به مدل (Manuel, 2011)

تراوایی (D)	تخلخل	خصوصیات پتروفیزیکی
~۵۰۰	~۰/۰۱٪	فازهای باز (بازشدگی = ۰/۱ سانتی متر)
~۵	~۳۰٪	فضاهای مجزا
~۰/۰۴	~۱۰-۱۷٪	پکستون ^۱
~۰.۰۰۰۱	~۱۰-۱۷٪	ویکستون ^۲

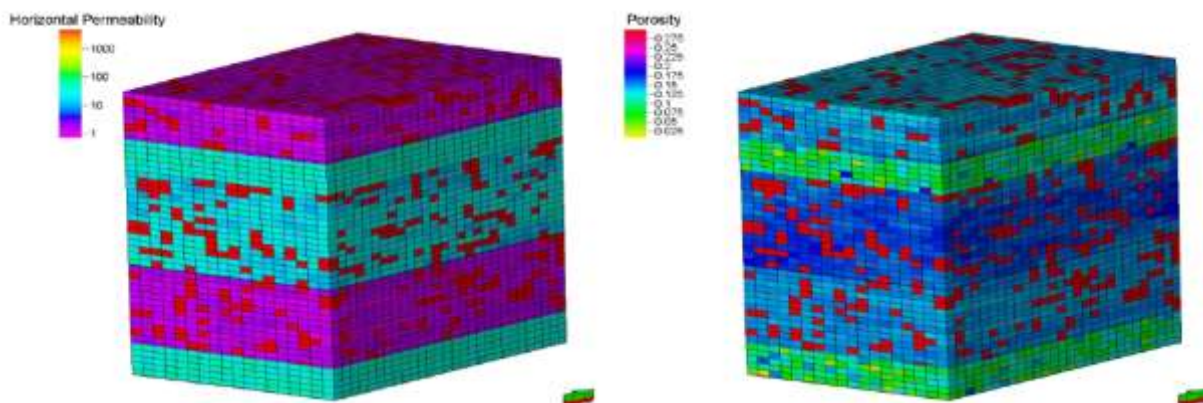
برای تخصیص تراوایی و تخلخل به مدل از معادله (۲-۱۶) جهت فاکتور عامل استفاده شده است.

$$\sigma = 4 \left(\frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right) \quad (۲-۱۶)$$

که در معادله (۲-۱۶) آن L فاصله داری شکستگی ها در جهات X, Y, Z است.

هندسه مدل عددی مشابه آنچه در شکل (۲-۱۶) دیده می شود با تخصیص المان های مکعبی مدل سازی شده است. برای اعمال تراوایی، تخلخل و غیره مقادیر خصوصیات هر المان را تغییر می دهند. به این ترتیب جریان سیال در مخزن مدل می شود.

1- Packstone
2- Wackstone

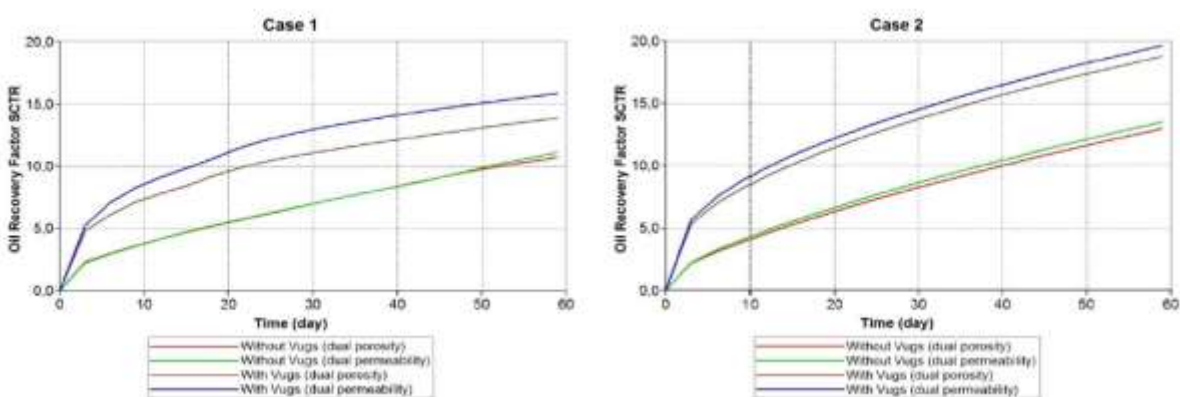


شکل (۲-۱۶) شماتیکی از مقادیر تراوایی و تخلخل تخصیص داده شده به مدل (Manuel, 2011).

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که در هر دو رویه فاکتور بازیابی نفت در حالت تراوایی دوگانه بیشتر بوده است.

باید توجه داشت که تراوایی دوگانه زمان حل مساله را طولانی می‌کند اما مقدار بازیابی نفت نیز افزایش می‌یابد. همچنین در صورت وجود حفرات مجزا وجود مدل‌سازی تراوایی دوگانه مهم می‌باشد (Manuel, 2011).

تارق و همکاران (Tareq, et al., 2003) هم از روش تخصیص مقادیر پارامترها به سلول برای مدل‌سازی مخزن استفاده نمودند. فونگ و همکاران (Fung, et al., 2005) در یک مدل دوبعدی مدل‌سازی انتقال سیال از درزه به ماتریکس را لحاظ نموده‌اند ولی اثر بازشدگی و بسته‌شدن درزه و پارامترهای زبری دیده نشده است. نحوه مدل‌سازی شکستگی درون محیط برای حالت تراوایی دوگانه در شکل (۲-۱۸) ارائه شده است.



شکل (۲-۱۷) مقادیر بازیابی نفت در حالت‌های مختلف مدل‌سازی (Tareq, et al., 2003).



شکل (۲-۱۸) مدل سازی درزه در مدل پیوسته (Fung, et al., 2005).

۲-۹- جمع بندی

مطالب ارائه شده در این فصل در چهار بخش دسته بندی شده اند. در بخش اول به بررسی کلیات تقسیم بندی مخازن کربناته و روش های مدل سازی آن پرداخته شده است. سپس در بخش دوم اثر تنش همه جانبه بر تراوایی ماتریکس بحث شد. سپس روش های مرسوم مدل سازی مخازن کربناته ارائه شده و با توجه به اهمیت مدل سازی صحیح درزه در بخش بعدی اثر زبری بر تراوایی بحث شده است. نهایتاً در بخش آخر نحوه مدل سازی های مخازن کربناته ارائه شده است که عموماً در این مدل های از روش رفتار تراوایی دوگانه استفاده می شود. به عنوان جمع بندی این فصل می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- در مخازن کربناته نوع دو، انتقال سیال به چاه از ماتریکس سنگ، درزه و شکاف انجام می شود.
- ۲- جریان سیال در درزه و شکاف متأثر از هندسه درزه و شکاف (زبری) می باشد.
- ۳- تراوایی درزه متأثر از زبری درزه می باشد.
- ۴- در مدل سازی مخازن نفتی عموماً از تغییر تراوایی در زمان بهره برداری صرف نظر می شود.
- ۵- در مدل سازی مخازن شکافدار سه روش تخلخل تکی، تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه استفاده می شود. در بین این سه مدل، مدل تراوایی دوگانه جامع ترین مدل است بنحوی که ماتریکس و درزه را عامل انتقال سیال می داند. مدل تخلخل دوگانه در مخازنی که تراوایی ماتریکس کم است مورد استفاده قرار می گیرد.
- ۶- اثر زبری درزه بر تراوایی به وضوح در مطالعات مختلف دیده شده است.
- ۷- رفتار غیرخطی جریان در محیط زبر با نتایج واقعی بیشتر منطبق می باشد.
- ۸- در مطالعات انجام شده در مدل سازی مخازن، برای مدل سازی درزه و شکاف و عملکرد آن در انتقال سیال معمولاً از مدل پیوسته استفاده می شود. به این ترتیب که با تخصیص پارامترهای

تراوایی و تخلخل درزه به المان‌های محیط به صورت تصادفی، سعی در مدل‌سازی و در نظر گرفتن اثر درزه و شکاف بر رفتار سیال درون مخزن داشته‌اند.

۹- در مدل‌سازی مخازن کربناته شکافدار به روش محیط پیوسته، اثر باز و بسته شدن درزه، اندرکنش هیدرومکانیکی درزه و ماتریکس سنگ و اثر زبری بر تراوایی درزه دیده نمی‌شود.

فصل ۳

مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های عددی

از مهم‌ترین اهداف این تحقیق بررسی اثر زبری بر خصوصیات هیدرولیکی درزه در مجاورت محیط متخلخل می‌باشد. جهت نیل به این هدف، ابتدا می‌بایست اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی ماتریکس سنگ در فشارهای جانبی متفاوت انجام شود (آزمایش روی نمونه‌های بدون درزه). برای این منظور از دستگاه سیلاب‌زنی موجود استفاده شده است. سپس با ایجاد درزه‌های مصنوعی در نمونه‌ها، زبری‌های ناهمگون تهیه می‌شوند. در مرحله بعد رفتار سیال درون درزه با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است (آزمایش روی نمونه‌های درزه‌دار). از آنجاکه در آزمایشگاه امکان بررسی و آنالیز حساسیت تغییرات تراوایی محیط جانبی درزه بر رفتار سیال وجود ندارد، به منظور پاسخ به این مساله از مدل‌سازی‌های عددی در مقیاس نمونه‌های آزمایشگاهی کمک گرفته شده است. برای این منظور ابتدا ۴ سری نمونه مورد مطالعه قرار گرفت؛ دو نمونه از سنگ‌های یکی از چاه‌های نفت جنوب کشور و دو نمونه از سنگ‌های آهکی متراکم و آذرین آتشفشانی که از منطقه کوهپایه‌ای دماوند تهیه شده بودند. با توجه به ظرفیت محدود دستگاه آزمایش سیلاب‌زنی (عدم امکان تزریق نرخ جریان زیاد برای نمونه‌ها با تراوایی بالا (برای سنگ‌های آتشفشانی) و فرار سیال از اطراف نمونه (در نمونه‌هایی با تراوایی بسیار ناچیز) امکان انجام آزمایش بر نمونه‌های آهکی و آتشفشانی محدود دماوند فراهم نشد. در نتیجه تنها نمونه‌های اخذ شده (دو سری نمونه) از چاه‌های نفت جنوب کشور مورد استفاده قرار گرفت. سری اول نمونه‌هایی هستند که از یکی از چاه‌های نفت جنوب کشور تهیه شده و نمونه‌های سری دوم از شرکت مناطق نفتخیز جنوب در اختیار قرار گرفته است. از آنجاکه اجازه شکستن نمونه‌های سری اول وجود نداشت، در این نمونه‌ها تنها رفتار تراوایی سیال در تنش‌های جانبی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. اما در سری دوم، ابتدا رفتار سیال درون ماتریکس در تنش‌های جانبی متفاوت بررسی شده و سپس با ایجاد ترک مصنوعی، رفتار سیال در درزه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

با توجه به اینکه در این تحقیق هدف اصلی بررسی رفتار سیال است، نظر به محدود بودن نمونه‌ها، از آزمایش‌های غیرمخرب برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بررسی شده شامل تست اولتراسونیک برای تعیین پارامترهای الاستیک، آزمایش تعیین وزن مخصوص اشباع و خشک و نسبت تخلخل است.

برای انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی از آزمایش اولتراسونیک (Dowell, et al., 1984) استفاده شده است. همچنین جهت تعیین خصوصیات فیزیکی از روش پیشنهادی ISRM (1972) استفاده

شده است. در تصاویر شکل (۱-۳) تا شکل (۴-۳) نمونه‌های بررسی شده مشاهده می‌شود. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این نمونه‌ها طی جدول (۱-۳) ارائه شده است.



شکل (۱-۳) نمونه‌های تهیه شده از سنگ‌های آذرین.



شکل (۲-۳) نمونه‌های تهیه شده از سنگ‌های آهکی متراکم.



شکل (۳-۳) نمونه‌های اخذ شده از چاه‌های نفت-سری اول (S1).



شکل (۴-۳) نمونه‌های اخذ شده از چاه‌های نفت-سری دوم (S2).

جدول (۱-۳) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سری اول و دوم

ردیف	شماره نمونه	طول (mm)	E(Pa)	ν	تخلخل	$\gamma_{wet}(gr/cm^3)$	$\gamma_{dry}(gr/cm^3)$	Vp(m/s)	Vs(m/s)
۱	S1-1	۶۵.۳	$3.4E+10$	۰.۳۰	۲۵٪	۲.۲۲	۱.۹۷	۴۸۳۵	۲۵۸۹
۲	S1-2	۶۷.۲	$3.7E+10$	۰.۳۱	۲۱٪	۲.۲۹	۲.۰۸	۴۹۶۶	۲۵۸۶
۳	S1-3	۶۵.۵۴	$4.1E+10$	۰.۲۹	۲۲٪	۲.۳۳	۲.۱۱	۵۰۷۳	۲۷۵۳
۱	S2-1	۵۴	$3.6E+10$	۰.۲۹	۱۵٪	۲.۴۵	۲.۳۰	۵۲۲۱	۲۸۲۳
۲	S2-2	۵۲.۲	$3.5E+10$	۰.۳۰	۱۲٪	۲.۵۱	۲.۳۹	۵۱۳۴	۲۷۵۵
۳	S2-3	۵۰.۳	$3.3E+10$	۰.۳۰	۱۴٪	۲.۵۰	۲.۳۶	۵۰۸۷	۲۷۰۶

E مدول الاستیک
 ν نسبت پواسون
 γ چگالی
 Vp and Vs سرعت موج اولتراسونیک



شکل (۳-۵) تصویر نحوه انجام آزمایش اولتراسونیک.

۳-۳- انجام آزمایش‌های نمونه‌های بدون درزه

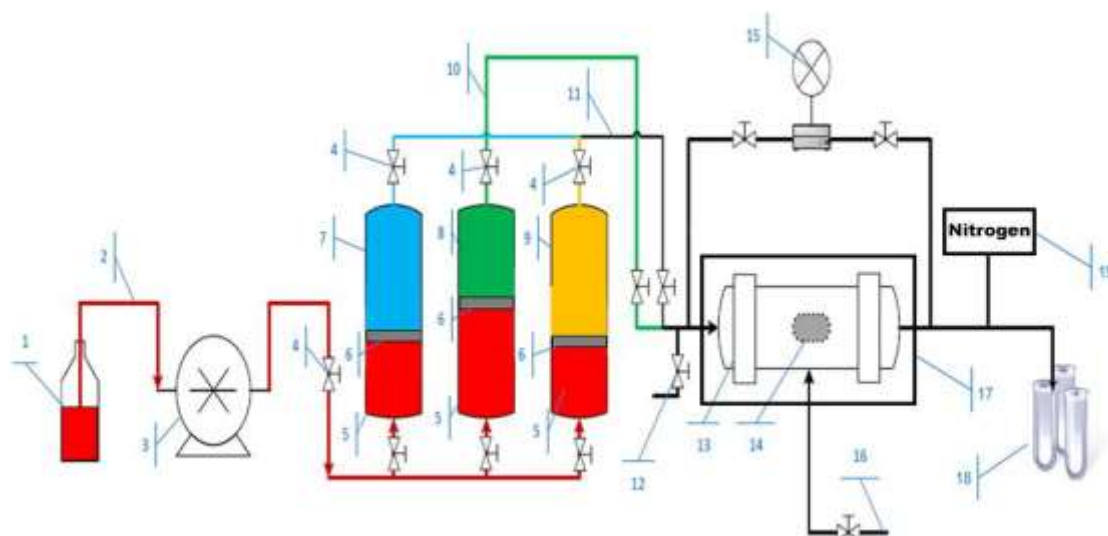
برای تعیین تراوایی ماتریکس در مقادیر فشارهای جانبی مختلف از دستگاه سیلابزنی (شکل (۳-۶)) موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. دستگاه سیلابزنی مغزه وسیله و روشی برای مشاهده جابجایی سیال درون مغزه‌ها در شرایط بازسازی شده مخزن به جهت دما، فشار، ترکیب سیال و فشار روباره در آزمایشگاه می‌باشد (Favinger, et al., 1995). برای این منظور فشار روباره بر مغزه اشباع شده توسط سیال درون دستگاه انجام می‌شود. پس از اعمال فشار جانبی بر نمونه سیال با نرخ جریان ثابت از یک طرف به آن تزریق می‌شود. در مدت زمان آزمایش مقدار فشار ابتدا و انتهای نمونه اندازه‌گیری

می‌شود، سپس طبق روابط مربوطه مقدار تراوایی محاسبه می‌گردد. نکته مهم در انجام این آزمایش در تعیین تراوایی ماتریکس، اشباع نمودن نمونه‌ها با سیال آزمایش است. در زمان انجام آزمایش در صورت اشباع نبودن نمونه، با توجه به پایین بودن تراوایی نمونه، امکان اشباع کردن وجود نداشته و نتایج با خطا مواجه می‌شود.

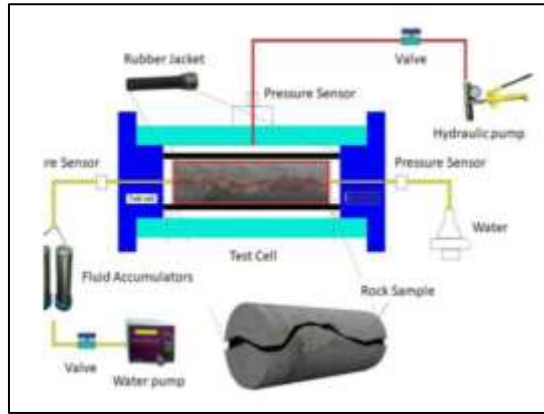
مشخصات و جزئیات دستگاه سیلاب‌زنی در تصاویر شکل (۳-۶) و شکل (۳-۷) شرح داده شده است.



شکل (۳-۶): الف) نمای پشت دستگاه، ۱) محفظه پمپ سیال ۲) لوله‌های انتقال سیال پشت دستگاه - ب) نمای کلی دستگاه ۱) پمپ تزریق ۲) پمپ روغن فشار محصورکننده (HPLC) ۳) آون و مغزه نگهدارنده.



شکل (۳-۷) ۱) سیال تزریق ۲) لوله مکش ۳) پمپ تزریق ۴) شیر ۵) سیال پشت پیستون اکومولاتور ۶) پیستون ۷ و ۸ و ۹) هر سیالی که برای تزریق مد نظر باشد ۱۰ و ۱۱) مسیر تزریق ۱۲) شیر بای پس ۱۳) محفظه مغزه ۱۴) مغزه ۱۵) فشار سنج ۱۶) پمپ روغن ۱۷) آون ۱۸) محفظه خروجی ۱۹) گاز نیتروژن برای تامین Back Pressure.



شکل (۳-۸) شماتیکی از نحوه انجام آزمایش .

دقت تزریق پمپ این دستگاه برابر ۰/۱ میلی لیتر بر دقیقه است و سنسورهای قرائت فشار با دقت ۱ psi فشار سیال در دو انتهای نمونه و همچنین فشار محصورکننده اطراف نمونه را به صورت پیوسته اندازه گیری و نمایش می دهند. بنابراین با داشتن فشار سیال در دو انتهای نمونه و نرخ جریان عبوری از نمونه، مقدار تراوایی قابل محاسبه می باشد. فرمول محاسبه تراوایی به شرح معادله (۳-۱) می باشد.

$$K = \frac{Q \times \mu \times \Delta L}{A \times \Delta P} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه واحد تراوایی (K) داری (D)، واحد نرخ جریان (Q) میلی لیتر بر ثانیه (ml/s)، گرانیوی (μ) سانتی پواز (cp)، افت فشار (atm)، تغییر طول (ΔL) سانتی متر (cm) و مساحت (A) سانتی متر مربع (cm^2) می باشد.

بر این اساس نتایج آزمایش های انجام شده بر نمونه های سری اول و دوم به شرح جدول (۳-۲) تا جدول (۳-۷) ارائه شده است. از آنجاکه این اطلاعات در مرحله مدل سازی عددی مورد استفاده قرار می گیرد واحدهای هر پارامتر به نحوی تغییر داده شده است که متناسب با ورودی نرم افزارهای تجاری باشد.

جدول (۲-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-1

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۰.۴	۱.۸۷	۰.۸۰	۱.۳۴	۵.۰۲	۳.۹۱E-۱۶	-۱۵.۴۱
۲	۰.۶	۲.۴۱	۰.۸۰	۱.۶۱	۵.۰۶	۳.۸۹E-۱۶	-۱۵.۴۱
۳	۰.۸	۲.۹۲	۰.۸۰	۱.۸۶	۵.۱۴	۳.۹۵E-۱۶	-۱۵.۴۰
۴	۱	۳.۴۰	۰.۸۰	۲.۱۰	۵.۲۳	۴.۰۲E-۱۶	-۱۵.۴۰
۵	۱.۴	۴.۳۰	۰.۸۰	۲.۵۵	۵.۴۸	۴.۱۹E-۱۶	-۱۵.۳۸
۶	۱.۸	۵.۰۰	۰.۸۰	۲.۹۰	۵.۸۲	۴.۴۸E-۱۶	-۱۵.۳۵
۷	۰.۲	۱.۵۹	۰.۸۰	۱.۲۰	۹.۶۶	۲.۶۴E-۱۶	-۱۵.۵۸
۸	۰.۴	۲.۲۸	۰.۸۰	۱.۵۴	۹.۶۸	۲.۸۴E-۱۶	-۱۵.۵۵
۹	۰.۶	۳.۰۵	۰.۸۰	۱.۹۳	۹.۷۰	۲.۷۹E-۱۶	-۱۵.۵۵
۱۰	۰.۸	۳.۸۱	۰.۸۰	۲.۳۱	۹.۷۴	۲.۷۸E-۱۶	-۱۵.۵۶
۱۱	۱	۴.۵۴	۰.۸۰	۲.۶۷	۹.۷۸	۲.۸۰E-۱۶	-۱۵.۵۵
۱۲	۱.۴	۵.۸۵	۰.۸۰	۳.۳۳	۹.۸۸	۲.۹۰E-۱۶	-۱۵.۵۴
۱۳	۱.۸	۷.۱۶	۰.۸۰	۳.۹۸	۱۰.۰۳	۲.۹۶E-۱۶	-۱۵.۵۳
۱۴	۳	۱۰.۹۶	۰.۸۰	۵.۸۸	۱۱.۶۷	۳.۰۹E-۱۶	-۱۵.۵۱
۱۵	۰.۴	۲.۴۰	۰.۸۰	۱.۶۰	۱۹.۴۶	۲.۶۲E-۱۶	-۱۵.۵۸
۱۶	۰.۶	۳.۱۲	۰.۸۰	۱.۹۶	۱۹.۴۸	۲.۷۰E-۱۶	-۱۵.۵۷
۱۷	۰.۸	۳.۸۱	۰.۸۰	۲.۳۱	۱۹.۴۹	۲.۷۸E-۱۶	-۱۵.۵۶
۱۸	۱	۴.۵۷	۰.۸۰	۲.۶۹	۱۹.۵۱	۲.۷۷E-۱۶	-۱۵.۵۶
۱۹	۱.۴	۵.۹۲	۰.۸۰	۳.۳۶	۱۹.۵۴	۲.۸۶E-۱۶	-۱۵.۵۴
۲۰	۱.۸	۷.۵۰	۰.۸۰	۴.۱۵	۱۹.۶۱	۲.۸۱E-۱۶	-۱۵.۵۵
۲۱	۲.۴	۹.۸۷	۰.۸۰	۵.۳۴	۱۹.۷۵	۲.۷۷E-۱۶	-۱۵.۵۶
۲۲	۳	۱۲.۲۲	۰.۸۰	۶.۵۱	۱۹.۹۱	۲.۷۵E-۱۶	-۱۵.۵۶
۲۳	۴	۱۶.۲۲	۰.۸۰	۸.۵۱	۲۰.۲۹	۲.۷۱E-۱۶	-۱۵.۵۷
۲۴	۵	۲۰.۸۱	۰.۸۰	۱۰.۸۱	۲۱.۶۸	۲.۶۱E-۱۶	-۱۵.۵۸
۲۵	۶	۲۲.۳۹	۰.۸۰	۱۱.۶۰	۲۲.۹۸	۲.۹۱E-۱۶	-۱۵.۵۴
۲۶	۷	۲۵.۵۰	۰.۸۰	۱۳.۱۵	۲۵.۹۴	۲.۹۶E-۱۶	-۱۵.۵۳

جدول (۳-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-2

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۰.۲۰	۲.۹۲	۰.۸۰	۱.۸۶	۴.۸۵	۱.۰۱E-۱۶	-۱۶.۰۰
۲	۰.۴۰	۴.۲۶	۰.۸۰	۲.۵۳	۵.۱۵	۱.۲۴E-۱۶	-۱۵.۹۱
۳	۰.۶۰	۵.۰۹	۰.۸۰	۲.۹۵	۵.۵۷	۱.۵۰E-۱۶	-۱۵.۸۲
۴	۰.۲۰	۳.۴۱	۰.۸۰	۲.۱۱	۹.۲۴	۸.۲۱E-۱۷	-۱۶.۰۹
۵	۰.۴۰	۵.۱۷	۰.۸۰	۲.۹۹	۹.۲۶	۹.۷۹E-۱۷	-۱۶.۰۱
۶	۰.۶۰	۷.۵۲	۰.۸۰	۴.۱۶	۹.۴۴	۹.۵۶E-۱۷	-۱۶.۰۲
۷	۰.۸۰	۱۰.۵۷	۰.۸۰	۵.۶۹	۱۰.۷۰	۸.۷۶E-۱۷	-۱۶.۰۶
۸	۰.۲۰	۵.۴۰	۰.۸۰	۳.۱۰	۱۸.۷۰	۴.۶۵E-۱۷	-۱۶.۳۳
۹	۰.۴۰	۱۰.۲۷	۰.۸۰	۵.۵۴	۱۸.۸۳	۴.۵۲E-۱۷	-۱۶.۳۵
۱۰	۰.۶۰	۱۴.۴۹	۰.۸۰	۷.۶۵	۱۹.۰۱	۴.۶۹E-۱۷	-۱۶.۳۳
۱۱	۱.۰۰	۲۱.۸۶	۰.۸۰	۱۱.۳۳	۲۱.۲۸	۵.۰۸E-۱۷	-۱۶.۲۹

جدول (۴-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S1-3

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۰.۴	۲.۰۰	۰.۸۰	۱.۴۰	۲.۷۵	۳.۴۴E-۱۵	-۱۴.۴۶
۲	۰.۶	۳.۵۰	۰.۸۰	۲.۱۵	۴.۰۶	۲.۳۳E-۱۵	-۱۴.۶۳
۳	۰.۸	۵.۷۰	۰.۸۰	۳.۲۵	۵.۱۸	۱.۷۰E-۱۵	-۱۴.۷۷
۴	۱	۷.۴۰	۰.۸۰	۴.۱۰	۶.۳۹	۱.۵۷E-۱۵	-۱۴.۸۰
۵	۱.۴	۸.۲۰	۰.۸۰	۴.۵۰	۷.۱۳	۱.۹۷E-۱۵	-۱۴.۷۱
۶	۱.۸	۱۷.۲۰	۰.۸۰	۹.۰۰	۱۲.۳۷	۱.۱۴E-۱۵	-۱۴.۹۴
۷	۰.۲	۳.۱۰	۰.۸۰	۱.۹۵	۶.۷۰	۹.۲۰E-۱۶	-۱۵.۰۴
۸	۰.۴	۴.۵۰	۰.۸۰	۲.۶۵	۱۰.۵۶	۱.۱۳E-۱۵	-۱۴.۹۵
۹	۰.۶	۸.۱۰	۰.۸۰	۴.۴۵	۱۳.۴۷	۸.۵۷E-۱۶	-۱۵.۰۷
۱۰	۰.۸	۱۲.۰۰	۰.۸۰	۶.۴۰	۱۷.۵۶	۷.۳۹E-۱۶	-۱۵.۱۳
۱۱	۱	۱۳.۴۰	۰.۸۰	۷.۱۰	۲۰.۸۳	۸.۲۲E-۱۶	-۱۵.۰۹
۱۲	۱.۴	۱۷.۸۰	۰.۸۰	۹.۳۰	۲۷.۴۵	۸.۵۲E-۱۶	-۱۵.۰۷

جدول (۵-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-1

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۰.۶	۱.۰۶	۱.۰۲	۱.۰۴	۳.۷۷	۳.۵۴E-۱۶	-۱۵.۴۵
۲	۱.۲	۱.۱۰	۱.۰۲	۱.۰۶	۳.۷۷	۳.۸۷E-۱۶	-۱۵.۴۱
۳	۲	۱.۱۴	۱.۰۲	۱.۰۸	۳.۷۸	۴.۱۷E-۱۶	-۱۵.۳۸
۴	۰.۶	۱.۰۵	۱.۰۲	۱.۰۴	۳.۹۳	۴.۲۵E-۱۶	-۱۵.۳۷
۵	۴	۱.۲۱	۱.۰۲	۱.۱۲	۳.۸۷	۵.۰۶E-۱۶	-۱۵.۳۰
۶	۵	۱.۲۵	۱.۰۲	۱.۱۴	۳.۵۹	۵.۲۱E-۱۶	-۱۵.۲۸
۷	۱	۱.۰۹	۱.۰۲	۱.۰۵	۷.۲۹	۳.۵۴E-۱۶	-۱۵.۴۵
۸	۲	۱.۱۴	۱.۰۲	۱.۰۸	۷.۱۹	۳.۹۴E-۱۶	-۱۵.۴۰
۹	۳	۱.۱۹	۱.۰۲	۱.۱۰	۷.۱۰	۴.۴۳E-۱۶	-۱۵.۳۵
۱۰	۱	۱.۱۰	۱.۰۲	۱.۰۶	۱۲.۴۶	۳.۲۲E-۱۶	-۱۵.۴۹
۱۱	۲	۱.۱۵	۱.۰۲	۱.۰۹	۱۲.۳۶	۳.۷۳E-۱۶	-۱۵.۴۳
۱۲	۵	۱.۳۰	۱.۰۲	۱.۱۶	۲.۸۳	۴.۴۳E-۱۶	-۱۵.۳۵
۱۳	۲	۱.۱۶	۱.۰۲	۱.۰۹	۲۲.۸۴	۳.۵۴E-۱۶	-۱۵.۴۵
۱۴	۱۰	۱.۵۷	۱.۰۲	۱.۳۰	۲۲.۴۹	۴.۴۳E-۱۶	-۱۵.۳۵

جدول (۳-۶) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-2

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۱	۱.۴۸	۱.۰۲	۱.۲۵	۲.۹۶	۷.۷۰E-۱۶	-۱۵.۱۱
۲	۲	۱.۸۶	۱.۰۲	۱.۴۴	۲.۷۶	۸.۳۳E-۱۶	-۱۵.۰۸
۳	۳	۲.۲۸	۱.۰۲	۱.۶۵	۲.۶۲	۸.۳۸E-۱۶	-۱۵.۰۸
۴	۴	۲.۶۹	۱.۰۲	۱.۸۵	۲.۴۹	۸.۴۰E-۱۶	-۱۵.۰۸
۵	۵	۳.۱۲	۱.۰۲	۲.۰۷	۲.۴۲	۸.۳۶E-۱۶	-۱۵.۰۸
۶	۶	۳.۵۵	۱.۰۲	۲.۲۹	۲.۴۱	۸.۳۱E-۱۶	-۱۵.۰۸
۷	۱	۱.۶۰	۱.۰۲	۱.۳۱	۷.۳۶	۶.۰۵E-۱۶	-۱۵.۲۲
۸	۲	۲.۱۳	۱.۰۲	۱.۵۸	۷.۱۴	۶.۳۲E-۱۶	-۱۵.۲۰
۹	۳	۲.۶۵	۱.۰۲	۱.۸۴	۶.۹۱	۶.۴۴E-۱۶	-۱۵.۱۹
۱۰	۴	۳.۱۶	۱.۰۲	۲.۰۹	۶.۷۷	۶.۵۴E-۱۶	-۱۵.۱۸
۱۱	۵	۳.۷۰	۱.۰۲	۲.۳۶	۶.۶۴	۶.۵۵E-۱۶	-۱۵.۱۸
۱۲	۶	۴.۲۱	۱.۰۲	۲.۶۱	۶.۵۲	۶.۶۰E-۱۶	-۱۵.۱۸
۱۳	۷	۴.۷۳	۱.۰۲	۲.۸۸	۶.۴۰	۶.۶۲E-۱۶	-۱۵.۱۸
۱۴	۱	۱.۶۹	۱.۰۲	۱.۳۵	۱۱.۴۵	۵.۲۴E-۱۶	-۱۵.۲۸
۱۵	۲	۲.۳۰	۱.۰۲	۱.۶۶	۱۱.۱۹	۵.۵۰E-۱۶	-۱۵.۲۶
۱۶	۳	۲.۸۹	۱.۰۲	۱.۹۵	۱۰.۹۵	۵.۶۳E-۱۶	-۱۵.۲۵
۱۷	۴	۳.۴۵	۱.۰۲	۲.۲۴	۱۰.۷۲	۵.۷۶E-۱۶	-۱۵.۲۴
۱۸	۱	۱.۷۴	۱.۰۲	۱.۳۸	۱۶.۰۱	۴.۸۴E-۱۶	-۱۵.۳۱
۱۹	۲	۲.۴۲	۱.۰۲	۱.۷۲	۱۵.۷۲	۵.۰۱E-۱۶	-۱۵.۳۰
۲۰	۳	۳.۰۵	۱.۰۲	۲.۰۳	۱۵.۵۴	۵.۱۹E-۱۶	-۱۵.۲۹
۲۱	۴	۳.۶۵	۱.۰۲	۲.۳۳	۱۵.۳۷	۵.۳۴E-۱۶	-۱۵.۲۷
۲۲	۱	۱.۸۰	۱.۰۲	۱.۴۱	۲۰.۱۶	۴.۵۰E-۱۶	-۱۵.۳۵
۲۳	۱	۱.۸۱	۱.۰۲	۱.۴۲	۲۰.۳۰	۴.۴۲E-۱۶	-۱۵.۳۵
۲۴	۲	۲.۵۱	۱.۰۲	۱.۷۷	۲۰.۰۸	۴.۷۱E-۱۶	-۱۵.۳۳
۲۵	۴	۳.۷۱	۱.۰۲	۲.۳۶	۱۹.۶۶	۵.۲۱E-۱۶	-۱۵.۲۸
۲۶	۰.۶	۱.۵۲	۱.۰۲	۱.۲۷	۲۴.۱۴	۴.۱۸E-۱۶	-۱۵.۳۸
۲۷	۱.۲	۱.۹۷	۱.۰۲	۱.۴۹	۲۳.۹۵	۴.۴۵E-۱۶	-۱۵.۳۵
۲۸	۲	۲.۵۵	۱.۰۲	۱.۷۹	۲۳.۷۶	۴.۵۸E-۱۶	-۱۵.۳۴
۲۹	۳	۳.۲۱	۱.۰۲	۲.۱۱	۲۳.۵۶	۴.۸۱E-۱۶	-۱۵.۳۲

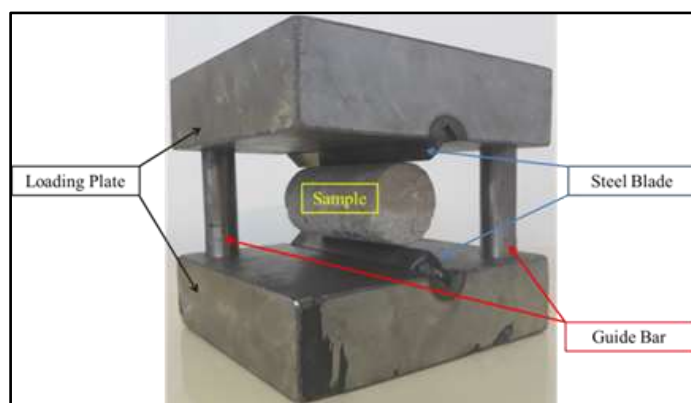
جدول (۷-۳) اطلاعات آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه S2-3

شماره آزمایش	دبی (ml/min)	فشار ورودی (MPa)	فشار خروجی (MPa)	فشار منفذی متوسط (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تراوایی (m ^۲)	لگاریتم تراوایی
۱	۱	۷.۲۴	۱.۰۲	۴.۱۳	۷.۶۵	۱.۰۹E-۱۶	-۱۵.۹۶
۲	۲	۷.۸۶	۱.۰۲	۴.۴۴	۸.۲۴	۱.۹۸E-۱۶	-۱۵.۷۰
۳	۲	۲۶.۶۱	۱.۰۲	۱۳.۸۲	۲۶.۹۹	۵.۲۸E-۱۷	-۱۶.۲۸
۴	۲.۴	۲۷.۱۳	۱.۰۲	۱۴.۰۸	۲۷.۵۱	۶.۲۱E-۱۷	-۱۶.۲۱
۵	۱	۸.۹۶	۱.۰۲	۴.۹۹	۲۴.۴۱	۸.۵۱E-۱۷	-۱۶.۰۷
۶	۲	۹.۶۵	۱.۰۲	۵.۳۴	۲۵.۷۲	۱.۵۷E-۱۶	-۱۵.۸۱
۷	۳	۱۱.۲۴	۱.۰۲	۶.۱۳	۲۷.۳۷	۱.۹۸E-۱۶	-۱۵.۷۰
۸	۴	۱۲.۰۷	۱.۰۲	۶.۵۵	۲۸.۰۶	۲.۴۵E-۱۶	-۱۵.۶۱

۳-۴- تهیه نمونه‌های درزه‌دار

پس از انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی و تعیین تراوایی هر نمونه به منظور بررسی اثر زبری درزه بر رفتار سیال درون درزه‌ها، می‌بایست درزه‌های با زبری غیر صاف در نمونه‌ها ایجاد شود. با توجه به اینکه اجازه شکستن نمونه‌های سری اول وجود نداشت در این مرحله تنها از نمونه‌های سری دوم استفاده شده است. در ادامه تجهیزات مربوطه و نحوه انجام ایجاد درزه مصنوعی ارائه شده است.

برای ایجاد درزه مصنوعی دستگاهی طراحی و ساخته شد (شکل (۳-۹)) که مشابه گیوتین و به روش تست برزلی باعث ایجاد درزه در نمونه می‌شود. در این دستگاه دو تیغه فولادی سخت‌شده در دو طرف نمونه قرار می‌گیرد، بر اثر اعمال نیرو بر فک‌های بالا و پایین تنش کششی در نمونه القا می‌گردد. به منظور اعمال نیرو به صورت مستقیم و خطی به نمونه، میله‌های راهنمایی در دو سمت صفحات فولادی تعبیه شد که از ایجاد نیروی خارج از محور جلوگیری می‌کند. با این فرایند درزه ایجاد شده دارای زبری مصنوعی و شبه طبیعی بوده و اصطلاحاً اره‌بر نمی‌باشد.



شکل (۹-۳) تصویر دستگاه و جزئیات مربوطه.

در شکل (۱۰-۳) تا شکل (۱۲-۳) نمونه‌های سری دوم که در آنها درزه ایجاد شده است مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱-۳) صفحه شکستگی نمونه S2-2.



شکل (۱۰-۳) صفحه شکستگی نمونه S2-1.



شکل (۱۲-۳) صفحه شکستگی نمونه S2-3.

۳-۵- انجام آزمایش‌های نمونه‌های درزه‌دار

مشابه روش انجام آزمایش سیلابزنی برای نمونه‌های بدون درزه در این بخش آزمایش سیلابزنی بر نمونه‌های درزه‌دار انجام می‌شود. با این تفاوت که در این مرحله تنها محل عبور سیال درزه می‌باشد. در این

آزمایش‌ها چون هدف بررسی رفتار جریان سیال درون درزه است، نمونه اشباع نشده و در حالت خشک آزمایش انجام شده است.

نتایج آزمایش‌های سیلابزنی بر نمونه‌های تهیه شده در بخش قبل به شرح جدول (۳-۸) تا جدول (۳-۱۰) می‌باشد.

جدول (۳-۸) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-1

شماره آزمایش	دبی (m ³ /s)	فشار ورودی (KPa)	فشار خروجی (KPa)	اختلاف فشار (Kpa/m)	فشار محصور کننده (MPa)
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۴۹	۱۰۳۴	۲۷۶	۵
۲	۳.۵۷۵E-۰۷	۱۰۷۰	۱۰۳۴	۶۵۹	۵
۳	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۰۸۴	۱۰۳۴	۹۱۴	۵
۴	۷.۱۴۹E-۰۷	۱۰۹۷	۱۰۳۴	۱۱۷۰	۵
۵	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۱۱۱	۱۰۳۴	۱۴۲۵	۵
۶	۱.۳۴E-۰۶	۱۱۵۹	۱۰۳۴	۲۳۱۹	۵
۷	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۲۱۵	۱۰۳۴	۳۳۴۰	۵
۸	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۲۵۶	۱۰۳۴	۴۱۰۶	۵
۹	۱.۶۰۹E-۰۶	۱۱۹۴	۱۰۳۴	۲۹۵۷	۵
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۴۹	۱۰۳۴	۲۷۶	۶
۲	۳.۵۷۵E-۰۷	۱۰۷۰	۱۰۳۴	۶۵۹	۶
۳	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۰۸۴	۱۰۳۴	۹۱۴	۶
۴	۷.۱۴۹E-۰۷	۱۰۹۰	۱۰۳۴	۱۰۴۲	۶
۵	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۱۱۸	۱۰۳۴	۱۵۵۳	۶
۶	۱.۱۶۲E-۰۶	۱۱۵۹	۱۰۳۴	۲۳۱۹	۶
۷	۱.۳۴E-۰۶	۱۱۹۴	۱۰۳۴	۲۹۵۷	۶
۸	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۲۴۲	۱۰۳۴	۳۸۵۱	۶
۹	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۳۰۴	۱۰۳۴	۵۰۰۰	۶
۱۰	۲.۶۸۱E-۰۶	۱۳۶۶	۱۰۳۴	۶۱۴۹	۶
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۴۹	۱۰۳۴	۲۷۶	۷
۲	۳.۵۷۵E-۰۷	۱۰۷۰	۱۰۳۴	۶۵۹	۷
۳	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۰۸۴	۱۰۳۴	۹۱۴	۷
۴	۷.۱۴۹E-۰۷	۱۱۱۸	۱۰۳۴	۱۵۵۳	۷
۵	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۱۵۹	۱۰۳۴	۲۳۱۹	۷
۶	۱.۳۴E-۰۶	۱۲۳۵	۱۰۳۴	۳۷۲۳	۷
۷	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۳۰۴	۱۰۳۴	۵۰۰۰	۷
۸	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۳۶۶	۱۰۳۴	۶۱۴۹	۷
۹	۲.۶۸۱E-۰۶	۱۴۲۱	۱۰۳۴	۷۱۷۱	۷
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۴۹	۱۰۳۴	۲۷۶	۱۱
۲	۳.۵۷۵E-۰۷	۱۰۷۰	۱۰۳۴	۶۵۹	۱۱
۳	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۰۹۷	۱۰۳۴	۱۱۷۰	۱۱
۴	۷.۱۴۹E-۰۷	۱۱۴۶	۱۰۳۴	۲۰۶۴	۱۱

ادامه جدول (۳-۸) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-1

شماره آزمایش	دبی (m ³ /s)	فشار ورودی (KPa)	فشار خروجی (KPa)	اختلاف فشار (Kpa/m)	فشار محصور کننده (MPa)
۵	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۱۹۴	۱۰۳۴	۲۹۵۷	۱۱
۶	۱.۳۴E-۰۶	۱۲۷۷	۱۰۳۴	۴۴۸۹	۱۱
۷	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۳۵۹	۱۰۳۴	۶۰۲۲	۱۱
۸	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۴۲۸	۱۰۳۴	۷۲۹۸	۱۱
۹	۲.۶۸۱E-۰۶	۱۵۰۴	۱۰۳۴	۸۷۰۳	۱۱
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۴۹	۱۰۳۴	۲۷۶	۱۶
۲	۳.۵۷۵E-۰۷	۱۰۷۷	۱۰۳۴	۷۸۷	۱۶
۳	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۱۰۴	۱۰۳۴	۱۲۹۷	۱۶
۴	۷.۱۴۹E-۰۷	۱۱۵۹	۱۰۳۴	۲۳۱۹	۱۶
۵	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۲۰۸	۱۰۳۴	۳۲۱۳	۱۶
۶	۱.۳۴E-۰۶	۱۳۰۴	۱۰۳۴	۵۰۰۰	۱۶
۷	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۳۸۰	۱۰۳۴	۶۴۰۵	۱۶
۸	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۴۷۰	۱۰۳۴	۸۰۶۵	۱۶
۹	۲.۶۸۱E-۰۶	۱۵۲۵	۱۰۳۴	۹۰۸۶	۱۶
۱	۱.۷۸۷E-۰۷	۱۰۶۳	۱۰۳۴	۵۳۱	۲۱
۲	۵.۳۶۲E-۰۷	۱۱۳۲	۱۰۳۴	۱۸۰۸	۲۱
۳	۸.۹۳۷E-۰۷	۱۲۳۵	۱۰۳۴	۳۷۲۳	۲۱
۴	۱.۳۴E-۰۶	۱۳۴۶	۱۰۳۴	۵۷۶۶	۲۱
۵	۱.۷۸۷E-۰۶	۱۴۴۲	۱۰۳۴	۷۵۵۴	۲۱
۶	۲.۲۳۴E-۰۶	۱۵۲۵	۱۰۳۴	۹۰۸۶	۲۱
۷	۲.۶۸۱E-۰۶	۱۵۸۰	۱۰۳۴	۱۰۱۰۷	۲۱

جدول (۳-۹) نتایج آزمایش سیلاب‌زنی نمونه درزه‌دار شماره S2-2

شماره آزمایش	دبی (m ³ /s)	فشار ورودی (KPa)	فشار خروجی (KPa)	اختلاف فشار (KPa/m)	فشار جانبی (MPa)
۱	۲.۰۲E-۰۷	۱۰۸۰.۷۹	۱۰۳۴.۲۱	۷۷۶.۲۶	۵
۲	۴.۰۴E-۰۷	۱۲۲۱.۱۶	۱۰۳۴.۲۱	۳۱۱۵.۸	۵
۳	۶.۰۶E-۰۷	۱۳۶۱.۵۳	۱۰۳۴.۲۱	۵۴۵۵.۳۳	۵
۴	۸.۰۸E-۰۷	۱۵۰۲.۹۱	۱۰۳۵.۲۱	۷۷۹۴.۸۷	۵
۵	۱.۰۱E-۰۶	۱۶۸۵.۵۶	۱۰۳۶.۲۱	۱۰۸۲۲.۵۱	۵
۶	۱.۵۲E-۰۶	۱۹۶۷.۳۱	۱۰۳۷.۲۱	۱۵۵۰۱.۵۹	۵
۷	۲.۰۲E-۰۶	۲۴۶۳.۷۴	۱۰۳۸.۲۱	۲۳۷۵۸.۷۸	۵
۸	۲.۵۳E-۰۶	۲۹۳۵.۴	۱۰۳۹.۲۱	۳۱۶۰۳.۱۲	۵
۹	۳.۰۳E-۰۶	۳۶۶۳.۰۳	۱۰۴۰.۲۱	۴۳۷۱۳.۶۷	۵
۱	۲.۰۲E-۰۷	۱۲۹۹.۰۴	۱۰۴۳.۲۱	۴۲۶۳.۸۱	۱۰
۲	۴.۰۴E-۰۷	۱۳۹۹.۱۳	۱۰۴۴.۲۱	۵۹۱۵.۲۵	۱۰
۳	۶.۰۶E-۰۷	۱۵۰۷.۴۷	۱۰۴۵.۲۱	۷۷۰۴.۳۱	۱۰
۴	۸.۰۸E-۰۷	۱۷۷۲.۷	۱۰۴۶.۲۱	۱۲۱۰۸.۱۵	۱۰
۵	۱.۰۱E-۰۶	۲۰۴۶.۱۹	۱۰۴۷.۲۱	۱۶۶۴۹.۶۱	۱۰
۶	۱.۳۱E-۰۶	۲۳۲۷.۹۳	۱۰۴۸.۲۱	۲۱۳۲۸.۶۸	۱۰
۷	۱.۵۲E-۰۶	۲۷۰۸.۷۷	۱۰۴۹.۲۱	۲۷۶۵۹.۲	۱۰
۸	۲.۰۲E-۰۶	۳۴۵۲.۹۱	۱۰۵۰.۲۱	۴۰۰۴۴.۹۹	۱۰
۹	۲.۵۳E-۰۶	۴۰۳۱.۹۲	۱۰۵۱.۲۱	۴۹۶۷۸.۳۸	۱۰
۱۰	۳.۰۳E-۰۶	۴۵۶۱.۳۸	۱۰۵۲.۲۱	۵۸۴۸۶.۰۶	۱۰
۱	۲.۰۲E-۰۷	۱۳۸۹.۵۲	۱۰۵۵.۲۱	۵۵۷۱.۷۱	۱۵
۲	۴.۰۴E-۰۷	۱۷۱۲.۵۵	۱۰۵۶.۲۱	۱۰۹۳۸.۸۹	۱۵
۳	۶.۰۶E-۰۷	۲۰۴۳.۸۳	۱۰۵۷.۲۱	۱۶۴۴۳.۶۹	۱۵
۴	۸.۰۸E-۰۷	۲۳۵۸.۶۱	۱۰۵۸.۲۱	۲۱۶۷۳.۲۴	۱۵
۵	۱.۰۱E-۰۶	۲۶۷۳.۳۸	۱۰۵۹.۲۱	۲۶۹۰.۲۸	۱۵
۶	۱.۵۲E-۰۶	۳۳۷۶.۲۴	۱۰۶۰.۲۱	۳۸۶۰۰.۴۹	۱۵
۷	۲.۰۲E-۰۶	۴۰۳۷.۸۲	۱۰۶۱.۲۱	۴۹۶۱۰.۰۸	۱۵
۸	۲.۵۳E-۰۶	۴۶۸۲.۸۸	۱۰۶۲.۲۱	۶۰۳۴۴.۴۴	۱۵
۹	۳.۰۳E-۰۶	۵۳۰۳.۱۷	۱۰۶۳.۲۱	۷۰۶۶۵.۹۳	۱۵
۱	۲.۰۲E-۰۷	۱۴۵۲.۰۱	۱۰۶۷.۲۱	۶۴۱۳.۱۹	۲۰
۲	۴.۰۴E-۰۷	۱۸۰۸.۰۶	۱۰۶۸.۲۱	۱۲۳۳۰.۸۵	۲۰
۳	۶.۰۶E-۰۷	۲۱۶۴.۱۲	۱۰۶۹.۲۱	۱۸۲۴۸.۵۱	۲۰
۴	۸.۰۸E-۰۷	۲۵۲۰.۱۸	۱۰۷۰.۲۱	۲۴۱۶۶.۱۶	۲۰
۵	۱.۰۱E-۰۶	۲۸۵۹.۷۳	۱۰۷۱.۲۱	۲۹۸۰۸.۵۸	۲۰
۶	۱.۵۲E-۰۶	۳۶۳۶.۹	۱۰۷۲.۲۱	۴۲۷۴۴.۸۵	۲۰
۷	۲.۰۲E-۰۶	۴۳۵۶.۲۸	۱۰۷۳.۲۱	۵۴۷۱۷.۷۸	۲۰

جدول (۳-۱۰) نتایج آزمایش سیلاب زنی نمونه درزه دار شماره S2-3

شماره آزمایش	دبی (m ³ /s)	فشار ورودی (KPa)	فشار خروجی (KPa)	اختلاف فشار (KPa/m)	فشار جانبی (MPa)
۱	۱.۹۰E-۰۷	۱۱۷۵.۱۷	۱۰۳۴.۲۱	۲۸۰۷.۹۱۵	۵
۲	۳.۸۰E-۰۷	۱۳۱۹.۹۶	۱۰۳۴.۲۱	۵۶۹۲.۱۷۶	۵
۳	۵.۷۰E-۰۷	۱۵۰۷.۱۲	۱۰۳۵.۲۱	۹۴۰۰.۵۱۲	۵
۴	۷.۶۰E-۰۷	۱۶۳۲.۲۲	۱۰۳۶.۲۱	۱۱۸۷۲.۷۴	۵
۵	۹.۵۰E-۰۷	۱۷۶۴.۲۳	۱۰۳۷.۲۱	۱۴۴۸۲.۳۱	۵
۶	۱.۴۲E-۰۶	۲۱۸۵.۸۱	۱۰۳۸.۲۱	۲۲۸۶۰.۴	۵
۱	۱.۹۰E-۰۷	۱۲۷۸.۰۸	۱۰۴۴.۲۱	۴۶۵۸.۶۰۷	۱۰
۲	۳.۸۰E-۰۷	۱۴۷۲.۱۳	۱۰۴۵.۲۱	۸۵۰۴.۲۸۸	۱۰
۳	۵.۷۰E-۰۷	۱۶۷۹.۹۷	۱۰۴۶.۲۱	۱۲۶۲۴.۶۶	۱۰
۴	۷.۶۰E-۰۷	۱۸۸۷.۸۱	۱۰۴۷.۲۱	۱۶۷۴۵.۰۳	۱۰
۵	۹.۵۰E-۰۷	۱۹۹۲.۲۴	۱۰۴۸.۲۱	۱۸۸۰۵.۲۲	۱۰
۶	۱.۴۲E-۰۶	۲۳۳۷.۹۷	۱۰۴۹.۲۱	۲۵۶۷۲.۵۱	۱۰

۳-۶- اندازه گیری زبری سطوح درزه

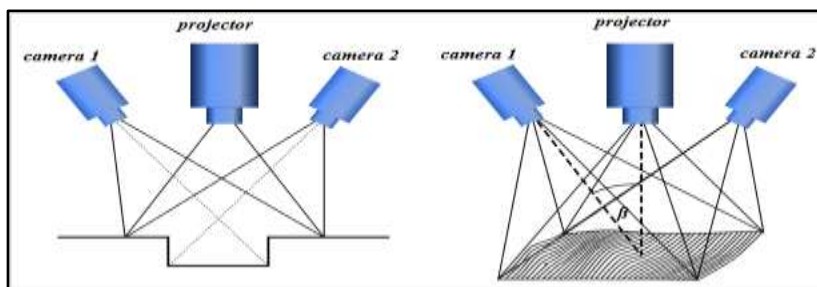
پس از ایجاد درزه در نمونه، برای تعیین کمی زبری درزه و تعیین توپوگرافی سطوح نیاز است که سطح مضرس رقومی گردد که در ادامه تجهیزات مورد استفاده و نحوه تعیین آن شرح داده می شود.

۳-۶-۱- تجهیزات

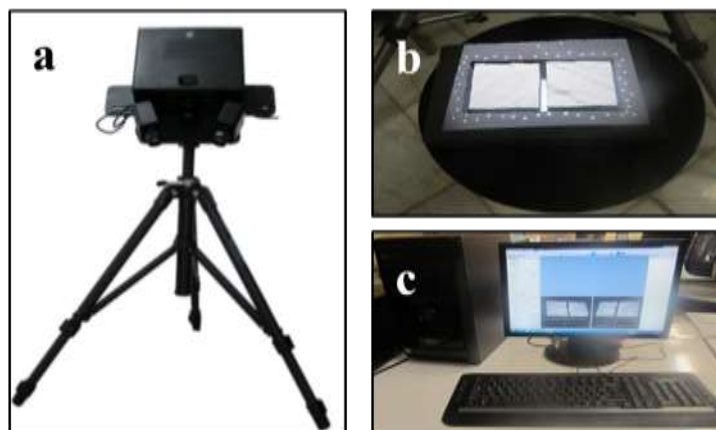
برای کمی سازی توپوگرافی سطوح درزه از یک اسکنر سه بعدی نوری با دقت ± 0.015 mm و تفکیک پذیری (فاصله داری نقاط) 0.1 mm استفاده شده است. این اسکنر از فناوری پیچیده اندازه گیری استفاده می کند که شامل تکنیک های نور ساخت یافته، دید استریو و اندازه گیری فازی استفاده می کند. این سیستم شامل یک منبع نور (پرتو افکن) و دو دوربین CCD^۱ می باشد. به منظور برداشت سطح درزه سیستم نوری دورنگ^۲ بر سطح نمونه تابیده و دوربین های CCD به طور خودکار تصاویری را از سطح برداشت می نمایند (شکل (۳-۱۳) و شکل (۳-۱۴)). در تصویر شکل (۳-۱۵) تصویر نمونه شماره S2-1 و سطح اسکن شده توسط این دستگاه دیده می شود.

1- Charged Coupled Device

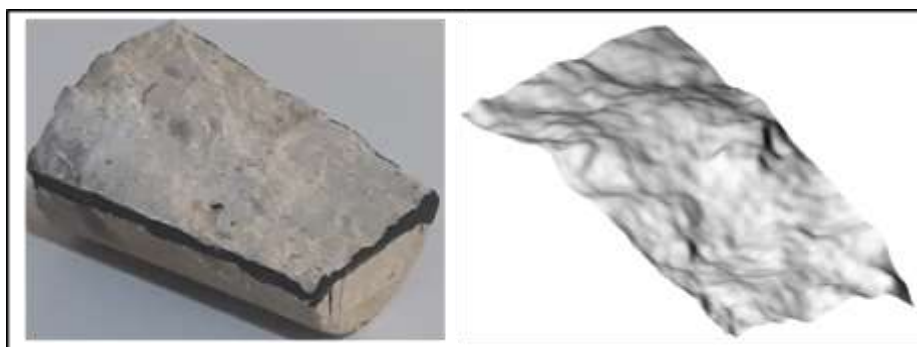
2 structured white-light fringe pattern



شکل (۳-۱۳) سیستم ثبت الگوهای نوری به همراه دو دوربین CCD.



شکل (۳-۱۴) تجهیزات اندازه‌گیری سه‌بعدی سطح. الف) اسکنر نوری سه‌بعدی به همراه سه پایه، ب) شماتیک نحوه قرارگیری نمونه ج) نرم‌افزار تصویر ساز سه‌بعدی متصل به دستگاه.



شکل (۳-۱۵) تصویری از نمونه‌های اسکن شده و نمونه اصلی (نمونه شماره S2-1).

خروجی این سیستم علاوه بر تصویر می‌تواند به صورت مختصات سه‌بعدی نقاط نیز ارائه شود. در نتیجه هر نقطه در سطح درزه‌دارای یک موقعیت سه‌بعدی می‌باشد که از آن جهت کمی‌سازی زبری درزه استفاده شده است.

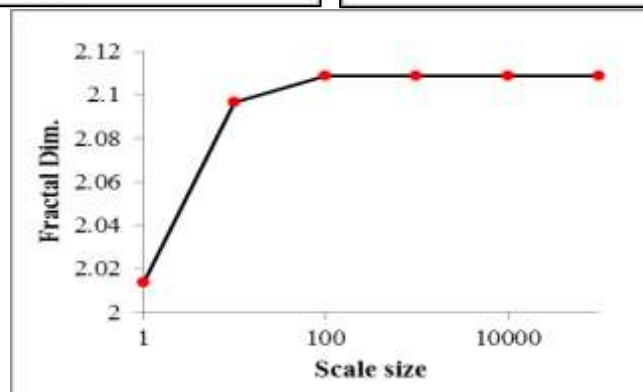
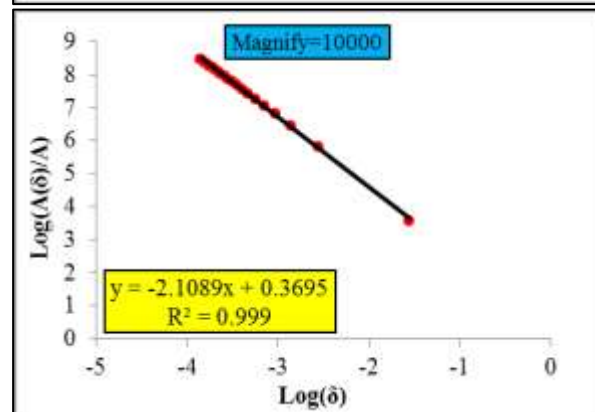
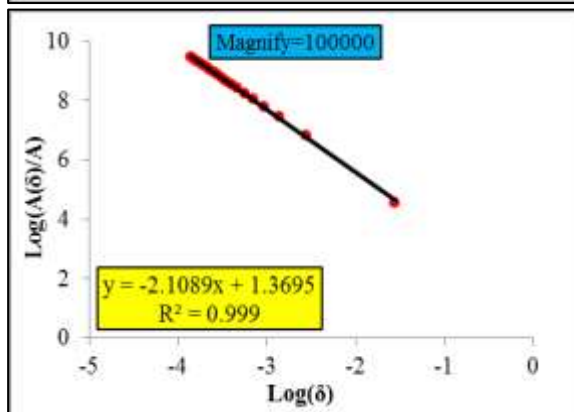
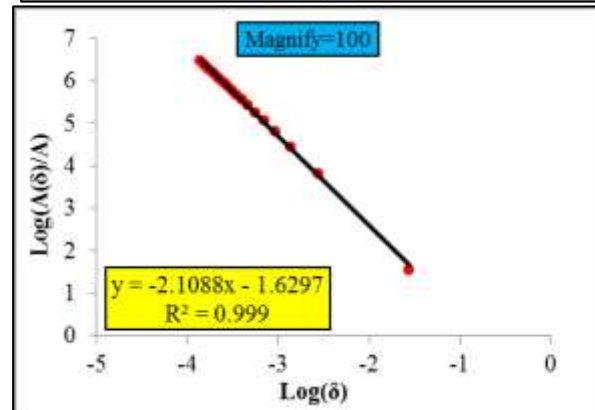
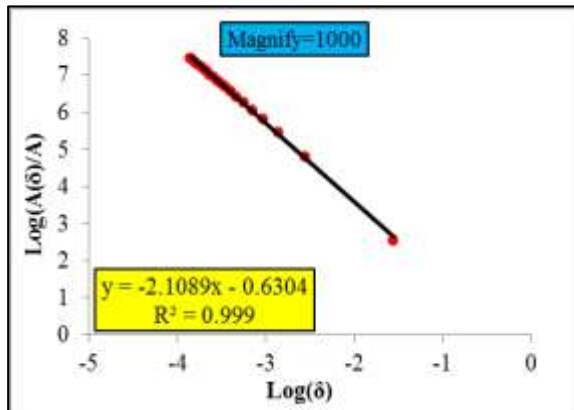
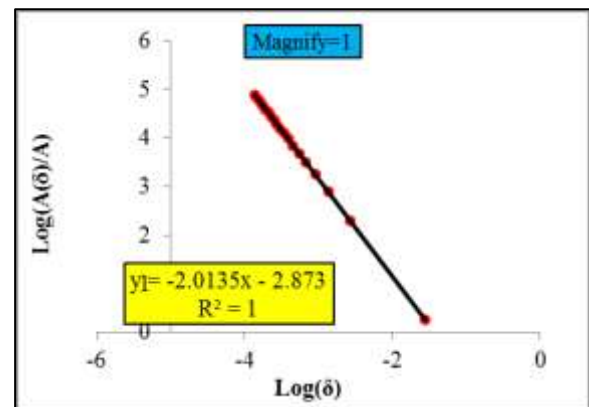
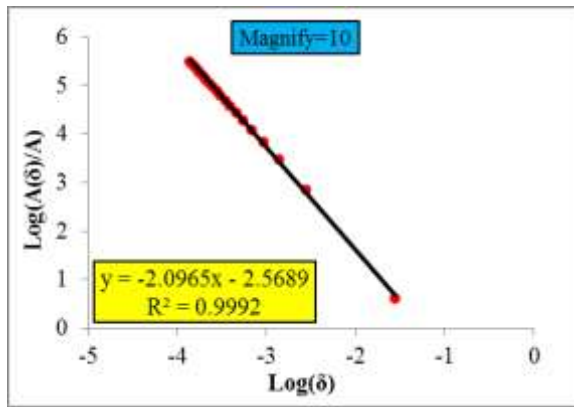
۳-۶-۲- کمی‌سازی زبری درزه

همانطور که در فصل دوم عنوان شد روش‌های متعددی جهت کمی نمودن زبری ناپیوستگی‌های سنگی وجود دارد. پارامترهای زبری می‌توانند به دو دسته پارامترهای وابسته به جهت (دارا بودن مقادیر متفاوت زبری در جهات مختلف) و غیر وابسته به جهت (دارا بودن مقادیر یکسان زبری در جهات مختلف)

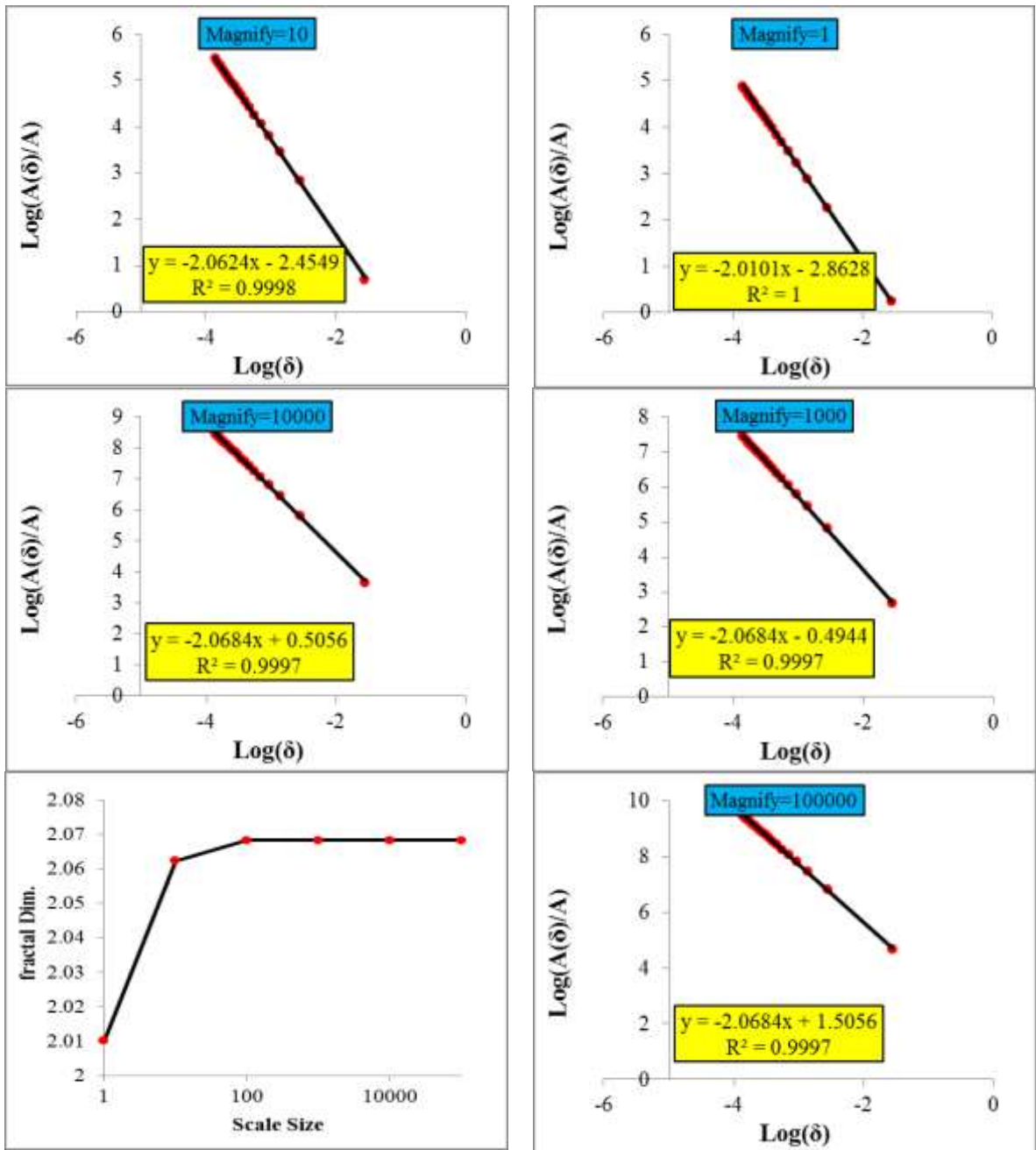
تقسیم شوند. در این مطالعه از سه روش مرسوم بعد فراکتال (Fractal Dimension)، پارامتر Z_2 و عدد JRC استفاده می‌شود. روش بعد فراکتال با توجه به تعیین کمی سه‌بعدی درزه اخیراً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های Z_2 و JRC نیز به دلیل پرکاربرد بودن آنها و وجود حس و درک کلی نسبت به زبری مورد استفاده قرار گرفته است.

طبق مطالب عنوان شده در فصل دوم در ارتباط با نحوه تعیین بعد فراکتال، مقادیر بعد فراکتال هر نمونه به ترتیب در شکل (۳-۱۶) تا شکل (۳-۲۱) ارائه شده است.

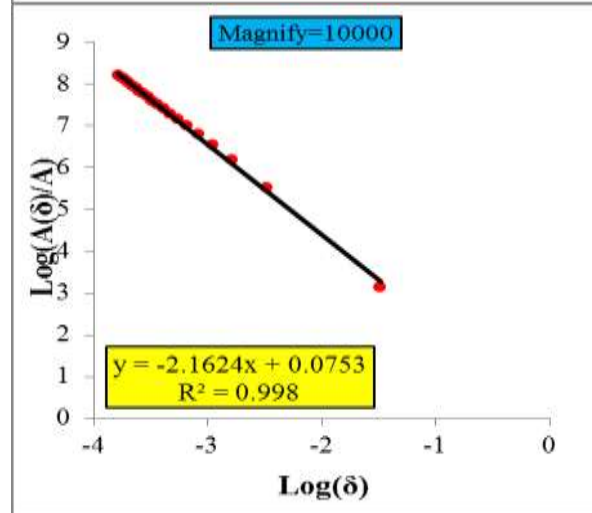
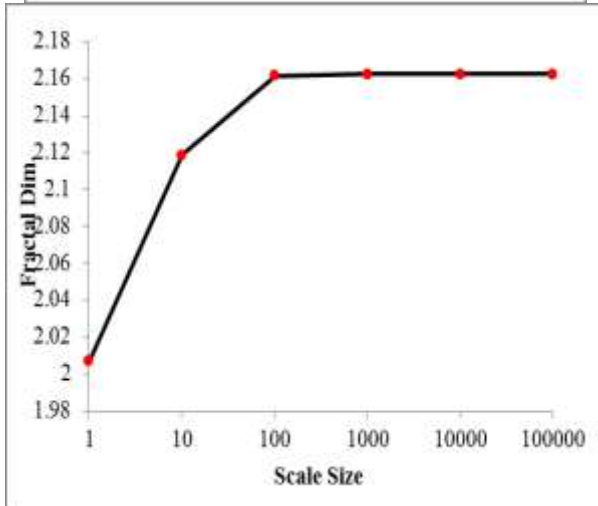
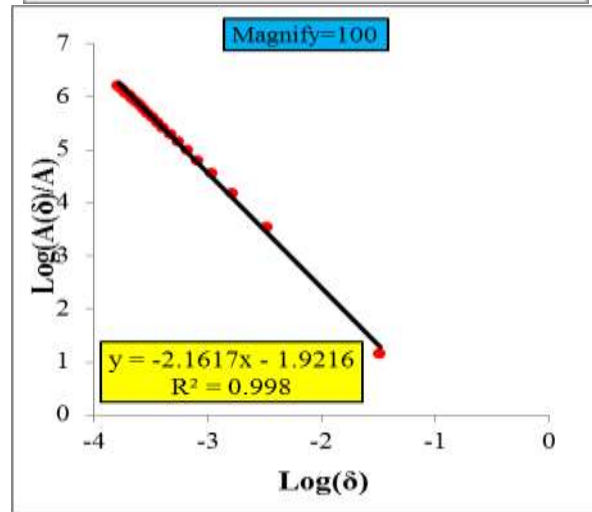
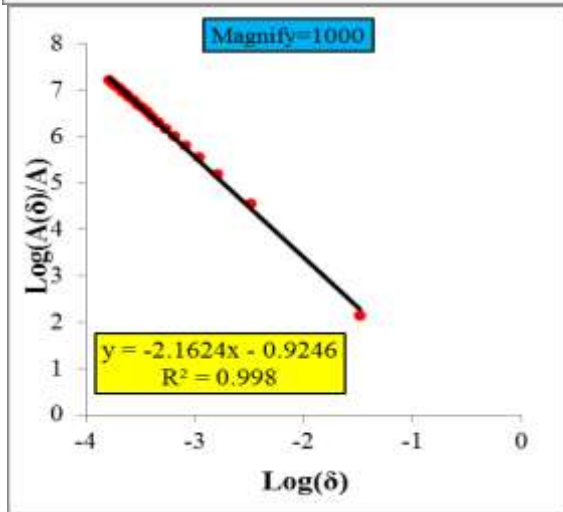
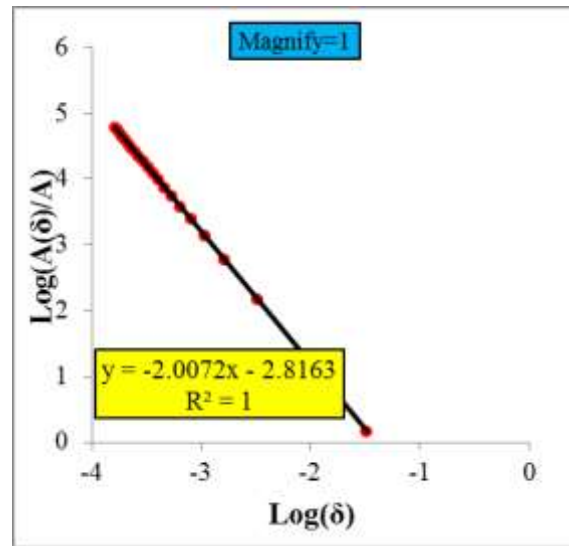
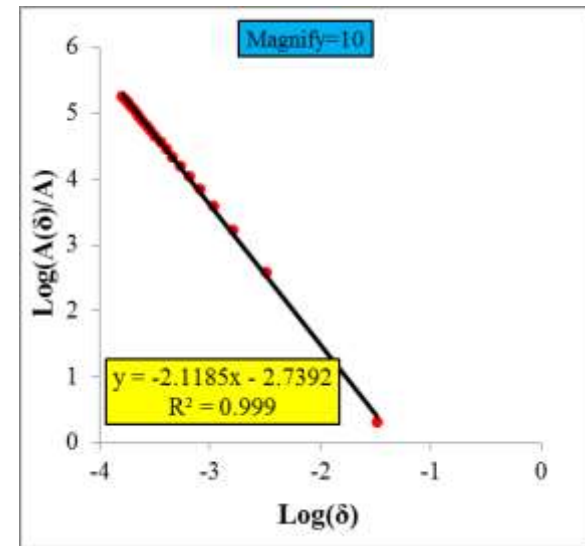
برای تعیین زبری در مقیاس Z_2 از رابطه (۲-۵) استفاده شده است. همانطور که مشخص است این فرمول برای زبری‌های دوبعدی کاربرد دارد. از آنجاکه این پارامتر برای زبری دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پروفیل‌های طولی متعددی در امتداد سطح درزه (صفحات بالا و پایین درزه) تعیین شده و مقدار Z_2 میانگین این پروفیل‌ها به عنوان مقدار زبری برای هر سطح انتخاب شده است (شکل (۳-۲۲)).



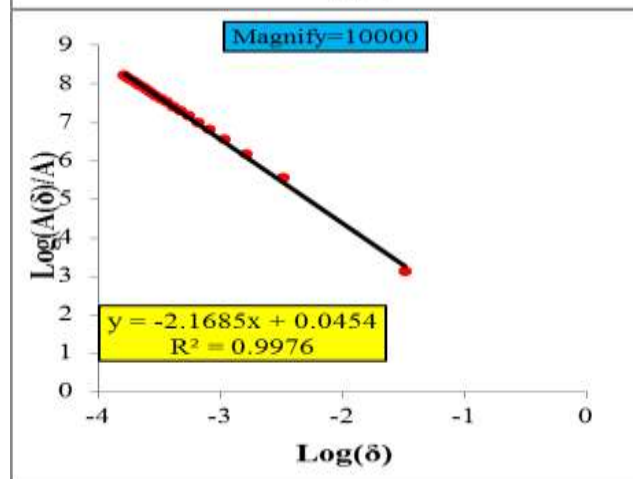
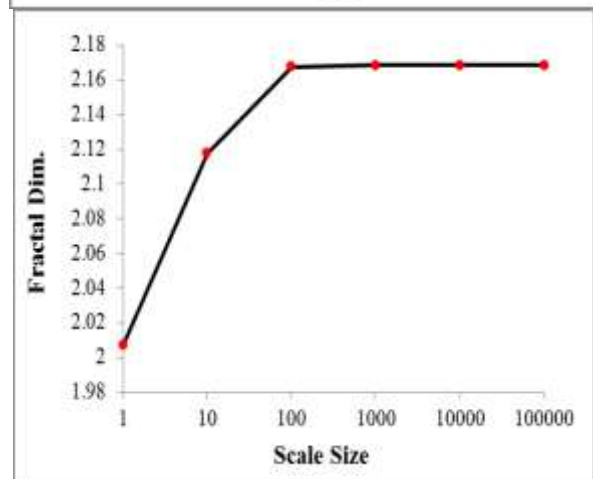
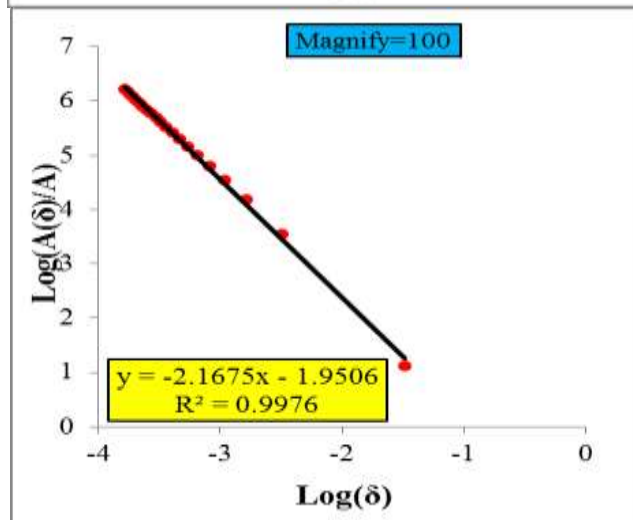
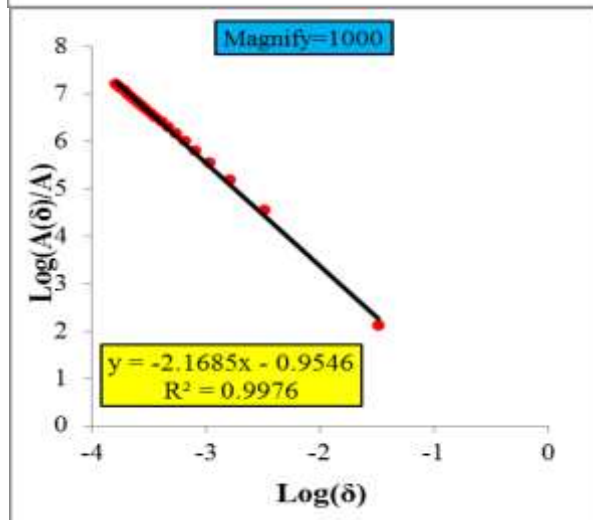
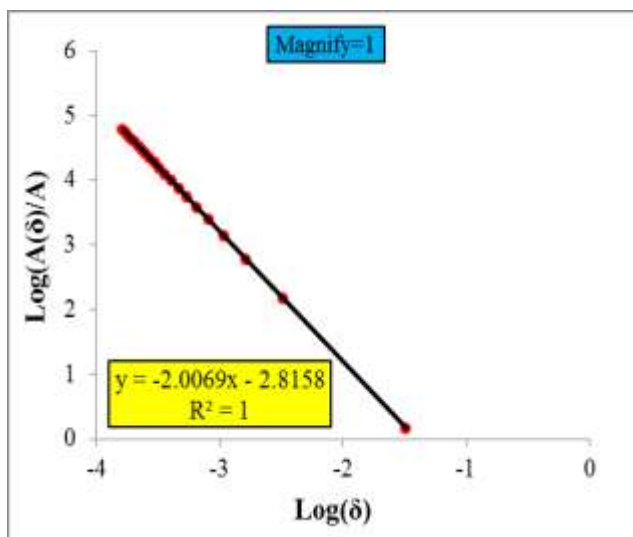
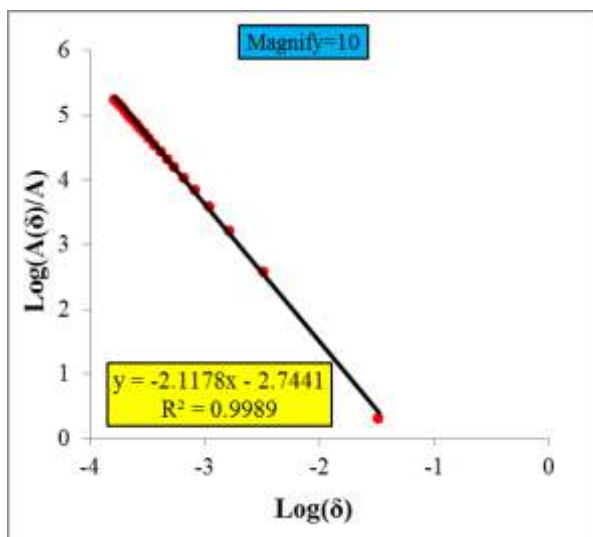
شکل (۳-۱۶) تعیین بعد فراکتال سطح اول نمونه S2-1.



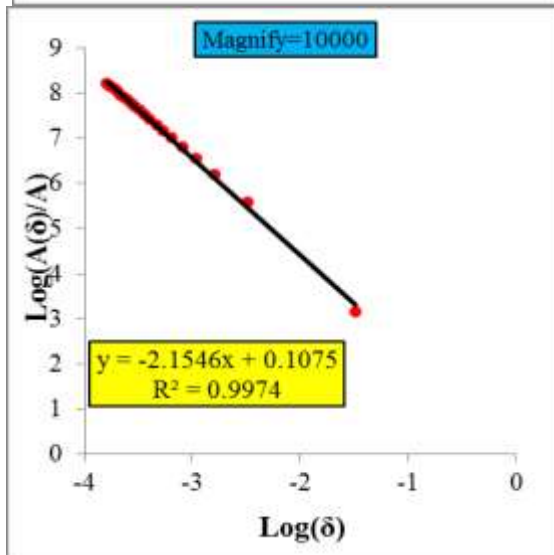
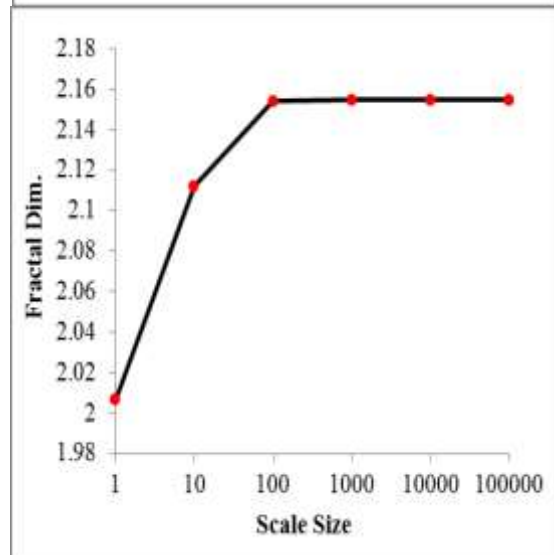
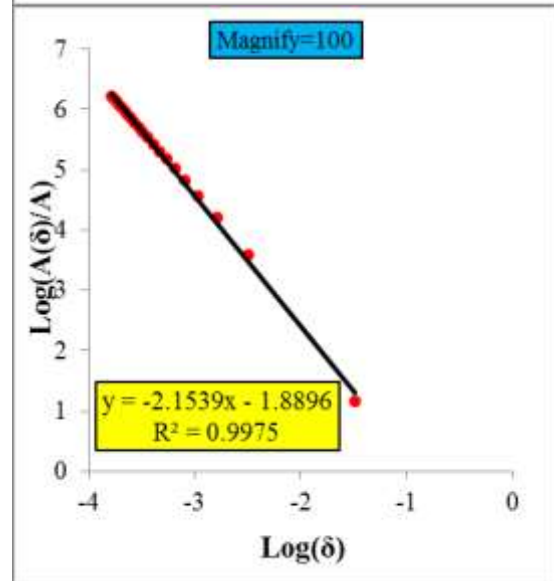
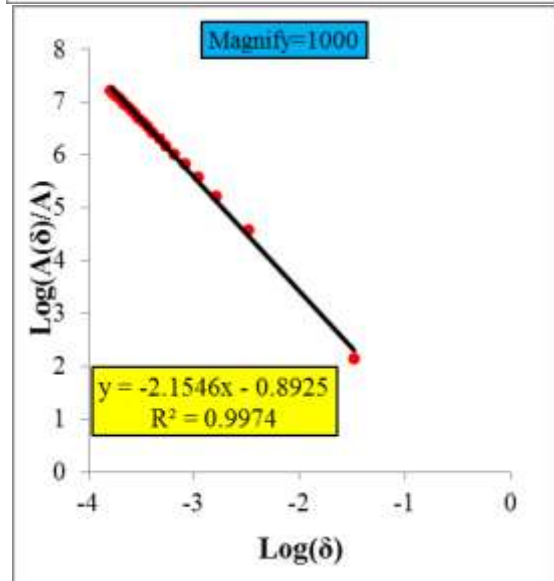
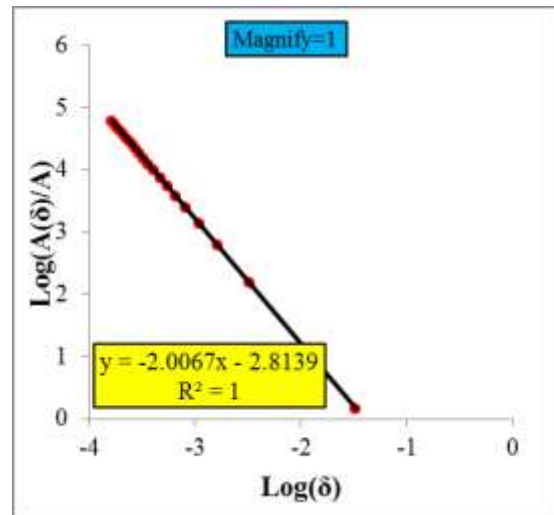
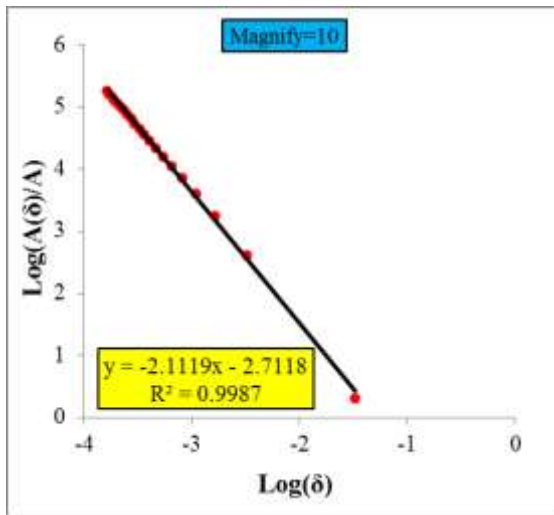
شکل (۳-۱۷) تعیین بعد فراکتال سطح دوم نمونه S2-1.



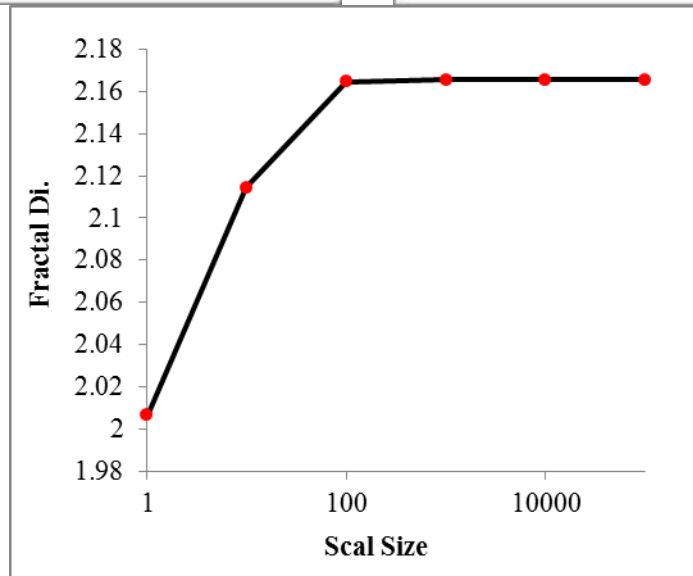
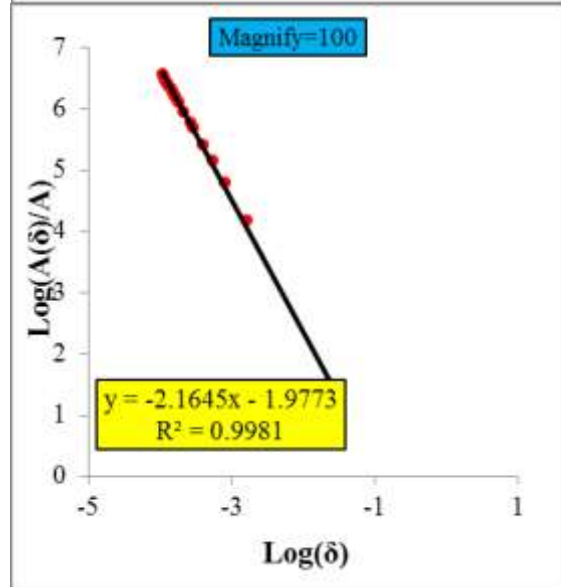
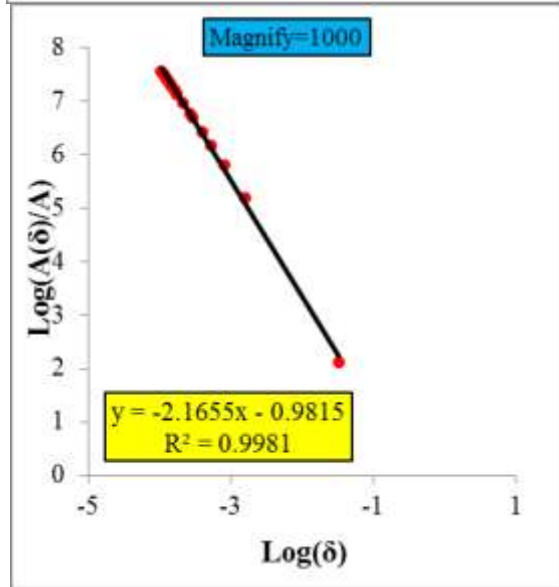
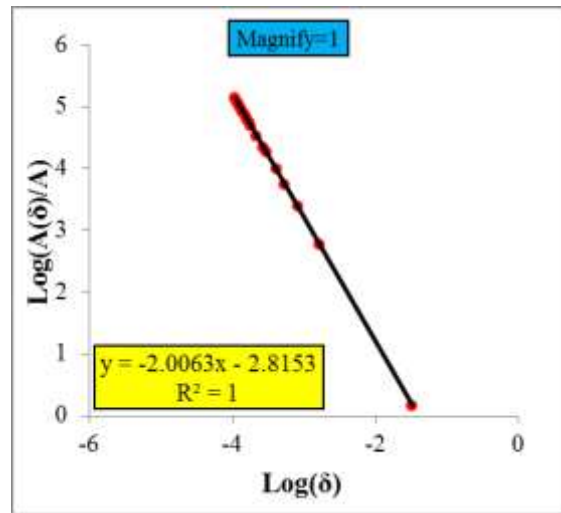
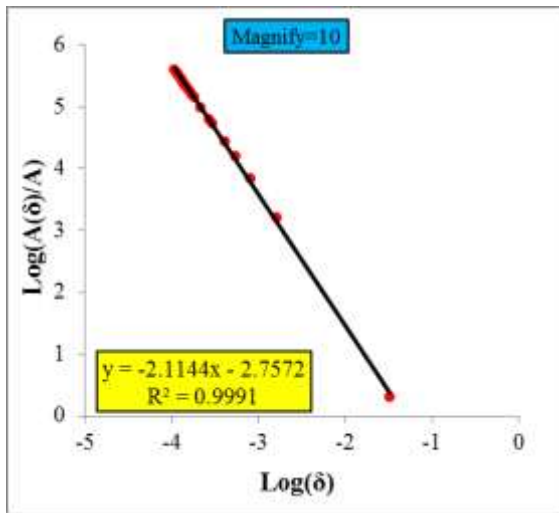
شکل (۲-۱۸) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۱ نمونه S2-2.



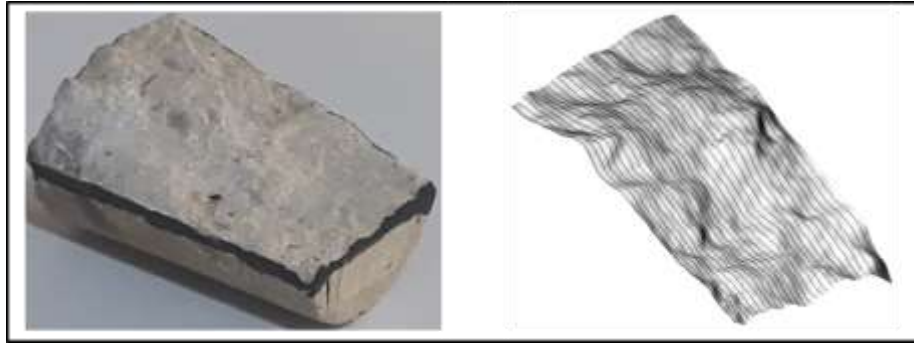
شکل (۳-۱۹) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۲ نمونه S2-2.



شکل (۳-۲۰) تعیین بعد فراکتال سطح شمار ۱ نمونه S2-3.



شکل (۳-۲۱) تعیین بعد فراکتال سطح شماره ۲ نمونه S2-3.



شکل (۳-۲۲) تعیین پروفیل‌های طولی جهت تعیین مقدار Z_2

مقادیر زبری Z_2 سطوح مختلف نمونه‌ها به شرح جدول (۳-۱۱) می‌باشد.

جدول (۳-۱۱) پارامتر Z_2 زبری درزه‌های مورد استفاده

شماره نمونه	پارامتر Z_2 صفحه بالایی	پارامتر Z_2 صفحه پایینی
S1	۰/۴۲	۰/۴۴
S2	۰/۳	۰/۲۹
S3	۰/۱۹	۰/۲۰

از آنجاکه پارامتر JRC برای تعیین سطوح درزه یک پارامتر عمومی و پرکاربرد در علم مکانیک سنگ است، براساس معادله (۳-۲) مقدار آن در ارتباط با Z_2 برای سطوح زیر تعیین شده است (Tse, et al., 1979). لازم به ذکر است روشی برای تعیین مقدار JRC سطح وجود نداشته و تنها با میانگین گیری JRC کل سطح این عمل امکان پذیر خواهد بود.

$$JRC = (32.2 + 32.47 \log Z_2) \quad (۳-۲)$$

جدول (۳-۱۲) پارامتر JRC زبری درزه‌های مورد استفاده

شماره نمونه	پارامتر JRC صفحه بالایی	پارامتر JRC صفحه پایینی
S1	۲۰	۲۰
S2	۱۵	۱۵
S3	۹	۱۰

۳-۷- معرفی نرم افزار ANSYS FLUENT

نرم افزار انسیس فلوئنت ANSYS FLUENT یکی از محبوب ترین و قدرتمندترین نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در زمینه‌ی مدل سازی انواع مدل های فیزیکی می باشد. نرم افزار انسیس فلوئنت تا نسخه ۶.۳ محصول شرکت FLUENT Inc بود. اما بعد از خریداری نرم افزار در سال ۲۰۰۶

توسط شرکت ANSYS Inc، به ANSYS FLUENT تغییر نام داد و در سال ۲۰۰۹ از نسخه ۶.۳ به نسخه ۱۲ ارتقاء پیدا کرد. در حال حاضر نسخه ۲۰۱۹ نرم افزار انسیس فلونت با مجوز رسمی شرکت انسیس به صورت رایگان و قابل دانلود از سایت انسیس در اختیار کاربران سراسر جهان قرار گرفته است (صفحه مجازی مرجع تخصصی آموزش نرم افزار Ansys).

فلونت همانند بسیاری از نرم افزارهای دیگر از روش های عددی برای حل مسائل استفاده می کند. این روش در مکانیک سیالات با عنوان دینامیک سیالات محاسباتی CFD^۱ شناخته می شود. در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می شود. با تقسیم ناحیه مورد نظر به المان های کوچک تر و اعمال شرایط مرزی برای گره های مرزی و با اعمال تقریب هایی، یک دستگاه معادلات خطی بدست می آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر محاسبه می شود. روشی که با عنوان "حجم محدود (FVM)^۲" شناخته می شود. FVM قابلیت است که پروسه انجام پروژه با انسیس فلونت را بسیار راحت تر از نرم افزارهای مشابه کرده است (صفحه مجازی مرجع تخصصی آموزش نرم افزار Ansys).

در این تحقیق از جدیدترین نسخه نرم افزار یعنی ANSYS FLUENT 19 استفاده شده است.

۳-۸- ساخت هندسه درزه برای مدل های عددی

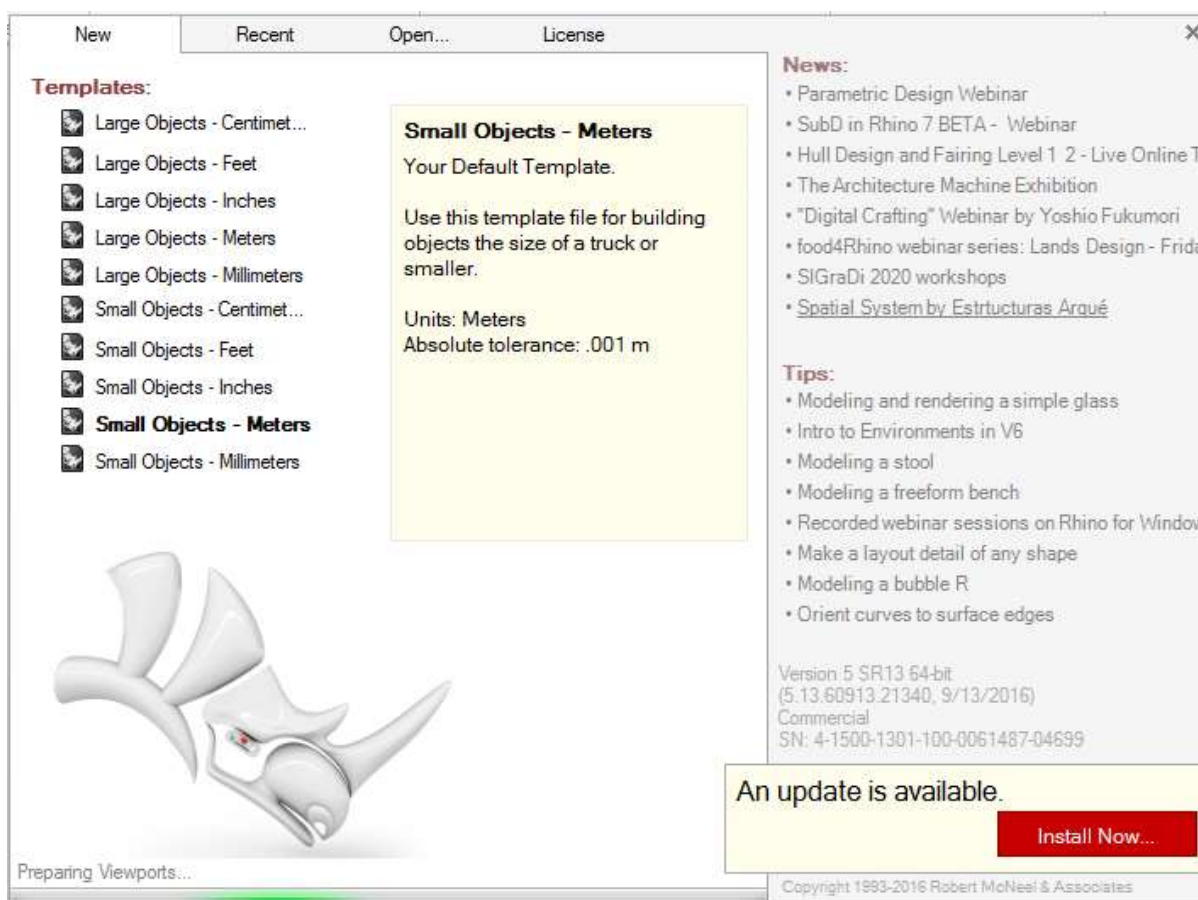
بر اثر افزایش فشار، دیواره های درزه به هم نزدیک شده و نهایتاً اتصال برقرار می گردد. برحسب مقدار زبری سطوح، درصد اتصال دو سطح در فشارهای مختلف متفاوت می باشد. افزایش اتصال دو سطح درزه باعث کاهش مسیر عبور جریان از داخل درزه می شود. از آنجاکه تخمین دقیق مقدار بسته شدن درزه در مطالعات آزمایشگاهی در ارتباط با رفتار سیال درون درزه مشخص نمی باشد، به ناچار باید از مدل عددی برای این منظور استفاده نمود. از آنجاکه رفتار سیال درون درزه زبر یک رفتار غیرخطی می باشد، ساده سازی های معمولی در جهت مدل سازی باعث بروز خطا در نتایج می شود (جوادی، ۱۳۹۷). از این رو در این تحقیق سعی بر آن است تا از حداکثر دقت ممکن در جهت مدل سازی رفتار سیال و محیط پیرامونی آن استفاده شده تا رفتار سیال در مجاورت ماتریکس تراوا به خوبی نمایش داده شود. بر این اساس از نرم افزار ANSYS FLUENT جهت مدل سازی رفتار سیال استفاده شده است. از قابلیت های مهم این نرم افزار که بسیار مهم می باشد، قابلیت مدل سازی محیط پوروالاستیک پیرامون درزه است.

1- Computational Fluid Dynamic
2- Finite Volume Method

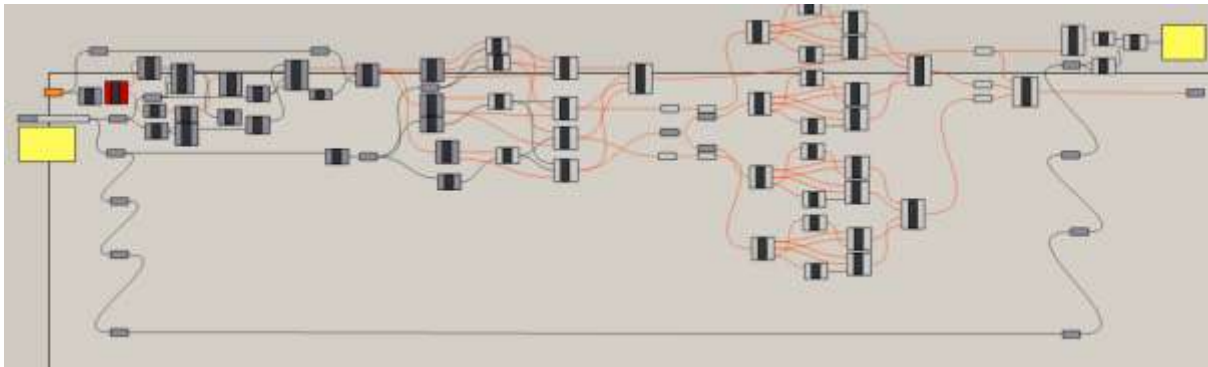
در ساخت مدل عددی مهم‌ترین گام ساخت هندسه مدل می‌باشد به گونه‌ای که شبیه‌ترین وضعیت ممکن را مدل‌سازی نماید. برای این منظور پس از اسکن زبری درزه‌ها و رقومی‌سازی آنها اقدام به ساخت هندسه مدل شده است.

۳-۸-۱- نرم‌افزارهای مورد استفاده

از آنجاکه ساخت هندسه درزه با سطح اتصال در این تحقیق به صورت دقیق انجام شده است، ساخت هندسه با پیچیدگی‌های فراوانی همراه بود. پس از اسکن زبری درزه و رقومی‌سازی دو سطح، سعی بر آن شد تا در دو سطح نقاط مشترک تعریف شده که مختصات سطحی برابر و ارتفاعی متناسب با زبری سطح داشته‌باشند. برای این منظور از روش توزیع ابر نقاط در نرم‌افزار Rhinoceros5 و کدنویسی‌های لازم در ابزار Grasshopper استفاده شده است. سپس خروجی نرم‌افزار Rhinoceros به نرم‌افزار ICEM CFD منتقل شده است. این نرم‌افزار قابلیت ساخت هندسه برای نرم‌افزار ANSYS FLUENT را دارد. خروجی نرم‌افزار Rhinoceros توپوگرافی نقاط درزه در سطوح بالا و پایین می‌باشد. در نرم‌افزار ICEM CFD درزه طوری در نظر گرفته شده است که دقیقاً با توپوگرافی عکس‌برداری شده تطابق داشته‌باشد.



شکل (۳-۲۳) تصویری از نرم‌افزار Rhinoceros.

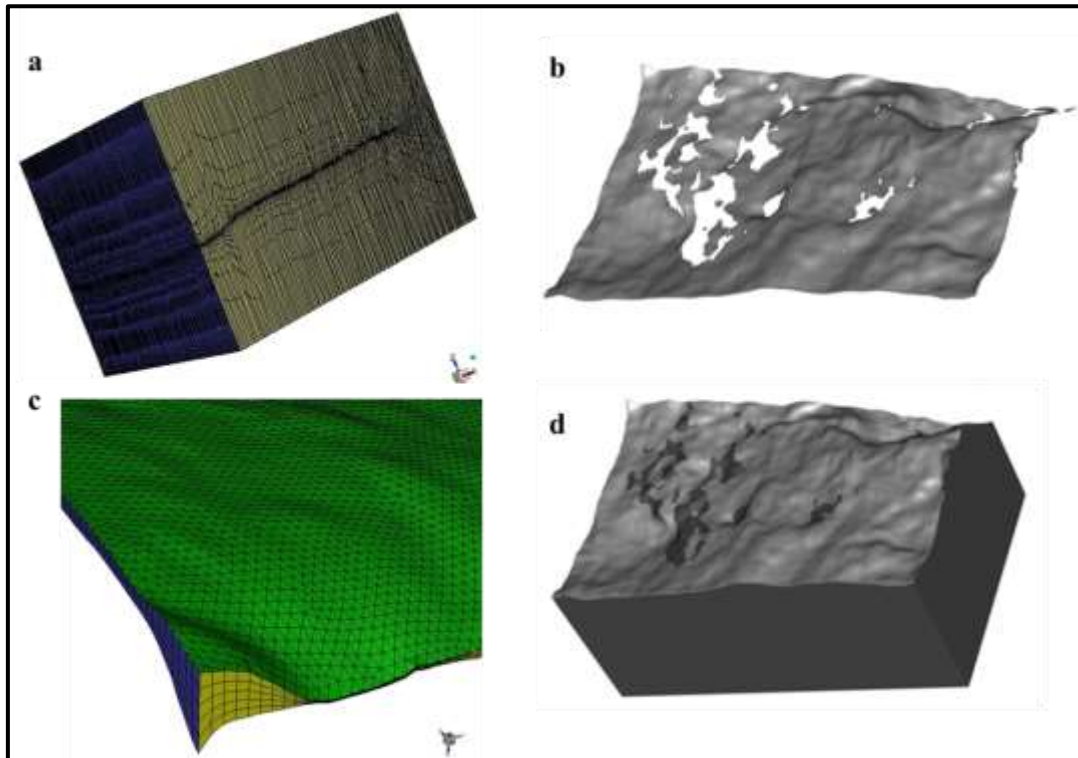


شکل (۳-۲۴) تصویری از الگوریتم تعیین نقاط برابر در ابزار Grasshopper.

۳-۸-۲- فرضیات ساخت هندسه درزه

همانطور که در ابتدای این بخش بیان شد در واقعیت دو سطح درزه به هم اتصال دارند. در نتیجه وجود این نقاط اتصال باعث تغییر مسیر جریان سیال می‌شود. عدم لحاظ این موضوع می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج رفتار سیال داشته باشد. در نتیجه اولین فرض در ساخت هندسه مدل برای مدل‌سازی عددی این است که سطوح درزه با هم اتصال دارند. نکته بعدی تعیین ابعاد مش‌ها می‌باشد. هر چه ابعاد مش‌ها ریزتر باشد مدل‌سازی دقیق‌تر خواهد بود. معمولاً محدودیت‌های نرم‌افزاری امکان تولید مش در ابعاد خیلی ریز را نمی‌دهد. در نتیجه می‌بایست ابعادی مد نظر قرار گیرد تا کمترین مقدار خطا را در مدل‌سازی اعمال نماید. بر این اساس طبق تجربه و سعی و خطاهای بسیار، مقدار بیشترین طول مش 0.2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی ضخامت درزه حداقل ۵ عدد مش در نظر گرفته شده است تا اثر شرایط مرزی نیز کنترل شود. کنترل کیفیت مش‌بندی در بخش اعتبار سنجی مدل بررسی شده است.

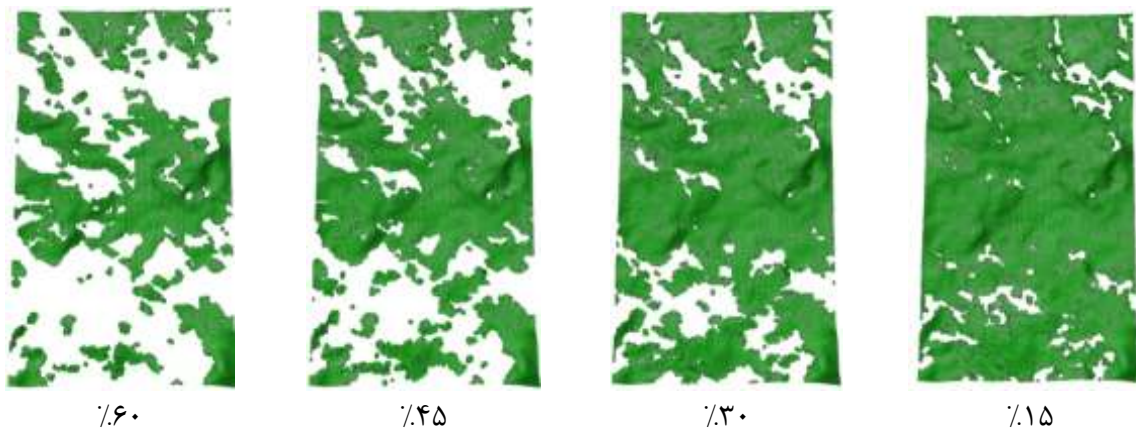
نمونه‌های استفاده شده در بخش آزمایش‌های آزمایشگاهی استوانه‌ای می‌باشند. به علت عدم امکان ساخت هندسه استوانه‌ای برای نمونه‌ها از هندسه معکب مستطیل استفاده شده است (شکل (۳-۲۵)). به منظور برابر بودن شرایط آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی از نظر جریان ورودی و خروجی به نمونه، سطح مقطع هندسه مدل‌های عددی چنان تعیین شده است که برابر با سطح مقطع استوانه‌ای شکل نمونه‌های واقعی باشد.



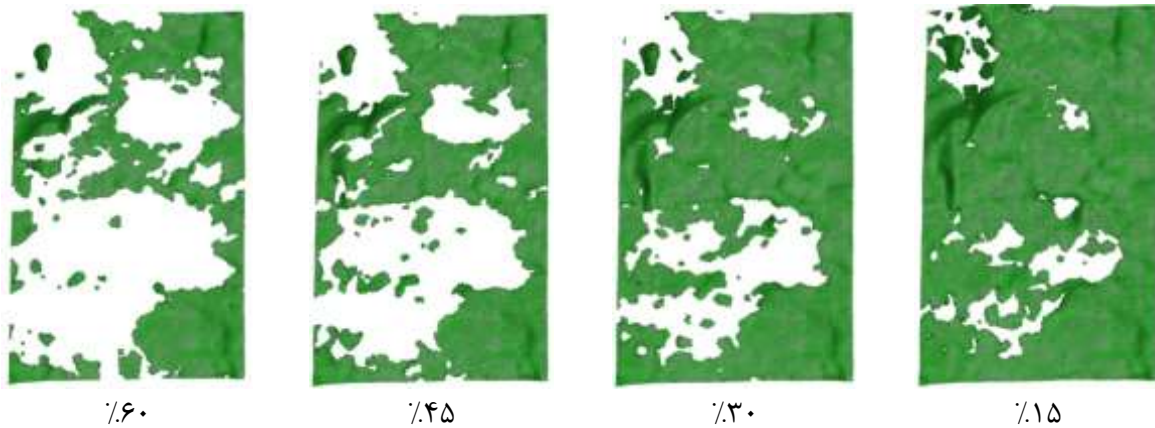
شکل (۳-۲۵) a هندسه کلی مدل، b هندسه درزه مدل c مشبندی در محدوده درزه d وضعیت یک سمت درزه با لحاظ محیط متخلخل.

۳-۸-۳- حالات مختلف ساخت هندسه

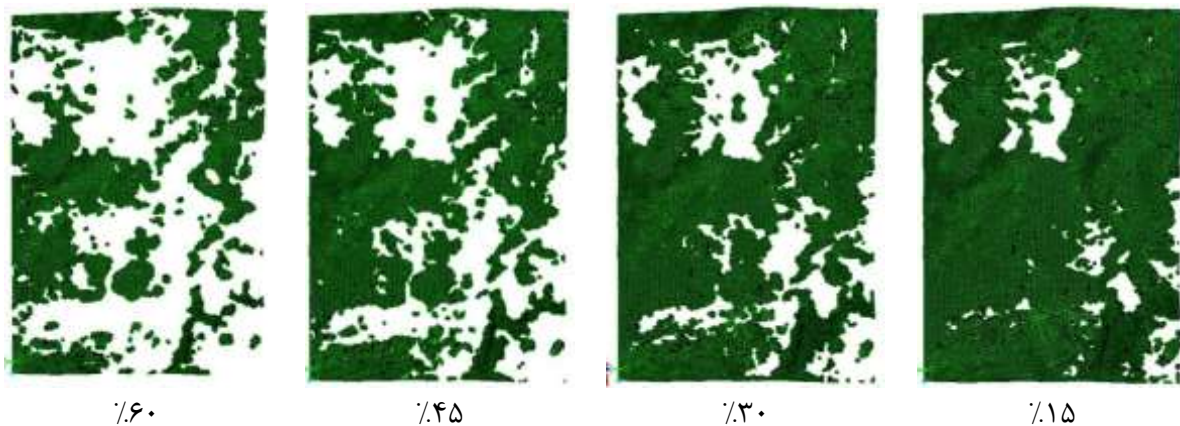
همانطور که پیش تر عنوان شد هندسه مدل بر مبنای اتصال دو سطح ساخته شده است. بر این اساس دو سطح درزه به هم نزدیک شده تا نقاط اتصال تعیین شود. در فواصل مختلف دو سطح درزه، مقدار تماس سطوح درزه به یکدیگر نیز افزایش می یابند. مقدار سطح اتصال سطوح درزه به یکدیگر نسبت به سطح کل درزه به عنوان معیار کنترلی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب برای هر درزه ۴ هندسه متفاوت ساخته شده است که سطح اتصال آنها ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درصد سطح کل می باشد.



شکل (۳-۲۶) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-1.



شکل (۳-۲۷) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-2.

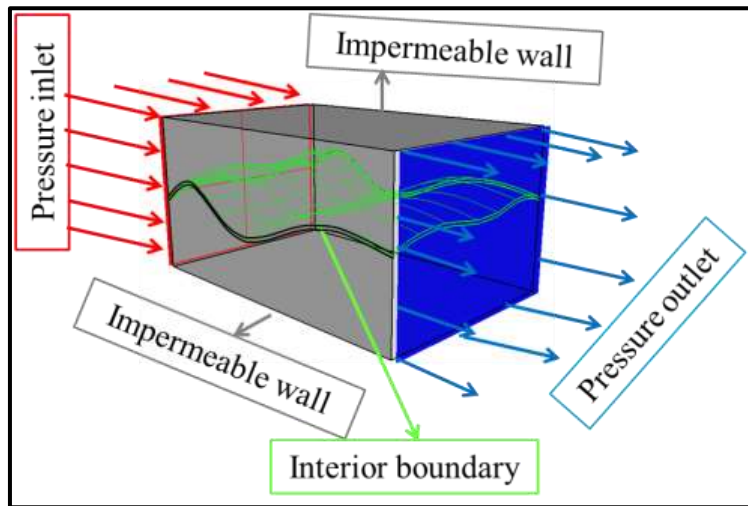


شکل (۳-۲۸) هندسه درزه در مقادیر مختلف سطح اتصال برای نمونه شماره S2-3.

با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزاری، مدل‌سازی‌ها تا جایی ادامه پیدا کرده است که امکان حل مدل وجود داشته است. طبق شکل فوق انطباق بسیار خوبی در نمونه شماره S2-1 و S2-3 مشاهده می‌شود. بطوری که در مقدار اتصال ۶۰٪ عملاً مسیر درزه بسته شده است. ولی فواصل اتصال خیلی کم هستند. این مهم که در شرایط فشار جانبی زیاد بوجود می‌آید، باعث می‌شود عملاً مسیر جریان بسته شده و در ادامه جریان از طریق ماتریکس به درزه وارد شود. در این رابطه لازم به توضیح است که اتصال سطوح درزه به معنای انسداد مسیر جریان نمی‌باشد. همانطور که بیان شد جریان در محل‌های اتصال به دورن ماتریکس نفوذ کرده و در ادامه زمانی که درزه باز است از ماتریکس به درون درزه منتقل می‌شود.

۳-۸-۴- شرایط مرزی

به منظور مدل‌سازی و یکسان‌سازی شرایط مدل‌سازی عددی با آزمایشگاهی شرایط مرزی مدل به نحوی انتخاب شده است که مرز ناتراوا در جداره خارجی مدل لحاظ شود و مرزهای فشار ثابت (ورودی و خروجی) در دو انتهای نمونه لحاظ شوند. در رابطه با مرز داخلی، طبق تعریف نرم‌افزار این مرز قابلیت انتقال سیال در دو جهت را دارد.



شکل (۳-۲۹) شماتیک شرایط مرزی مدل‌های عددی در نرم‌افزار ANSYS FLUENT.

۳-۸-۵- خصوصیات هیدرولیکی مصالح

رفتار سیال درون درزه و درون محیط پیرامونی به ترتیب رفتار واقعی سیال (که با حل کامل معادله ناویر استوکس مدل‌سازی می‌شود) و رفتار خطی سیال محیط متخلخل (معادله دارسی) لحاظ شده است. مطابق فرضیات تحقیق سیال انتخاب شده در روش عددی آب با چگالی $998/2 \text{ Kg/m}^3$ و ویسکوزیته $0/001 \text{ kg/m-s}$ است.

۳-۸-۶- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل و انتخاب ابعاد بهینه مش‌ها، می‌بایست نتایج مدل‌سازی با فرمول‌های تحلیلی کنترل شود. برای این منظور هندسه مدلی با ابعاد مشابه نمونه‌ها ولی با شرایط حاکم در فرمول داری انتخاب شده است تا نتایج حاصل از آن با نتایج فرمول داری بررسی و چک شود.

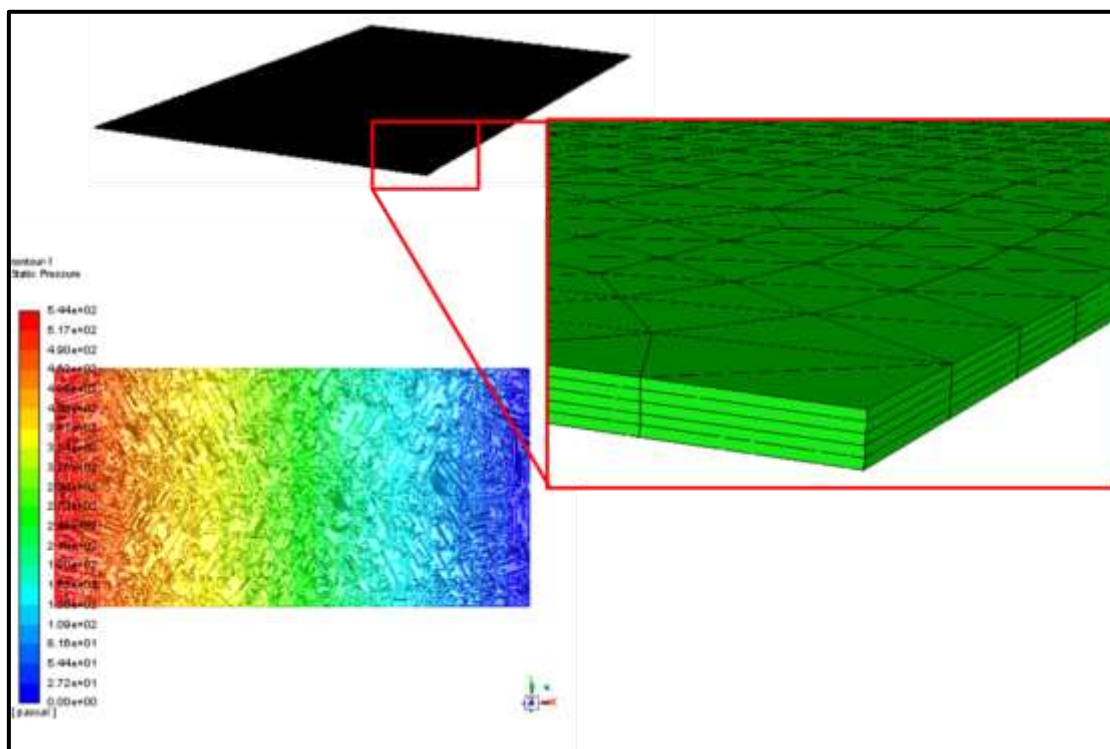
بر این اساس هندسه مدل عددی (درزه صاف) با ابعاد $5 \text{ cm}^3 * 2/5 * 0/05$ (طول*عرض*بازشدگی) ساخته شده است (شکل (۳-۳۰)). نتایج مقادیر نرخ جریان عبوری در اختلاف فشارهای ۵۴۴ و ۵۴۴۰ پاسکال به ترتیب برابر $2/82e-6 \text{ kg/s}$ و $2/82e-5 \text{ kg/s}$ بدست آمده است که با توجه به فرمول داری (معادلات (۳-۳)) اختلاف زیادی نداشته و اختلاف ۳ درصدی در نتایج نیز قابل اغماض است. در نتیجه انتخاب ابعاد مش‌ها در مدل‌سازی انجام شده مناسب می‌باشد.

$$Q = -\frac{we^3}{12\mu} \nabla P$$

$$Q = -\frac{0.025 \cdot 0.00005^3}{12 \cdot 0.001003} 544 \cdot 998.2 = 2.82e - 6 \frac{kg}{s} \implies \text{for } \Delta P = 544 Pa$$

(۳-۳)

$$Q = -\frac{0.025 \cdot 0.00005^3}{12 \cdot 0.001003} 5440 \cdot 998.2 = 2.82e - 5 kg/s \implies \text{for } \Delta P = 5440 Pa$$



شکل (۳-۳) تصویری از هندسه مدل سازی، ابعاد مش و توزیع فشار در طول مدل.

فصل ۴

تحلیل و بررسی نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی و مدل‌های عددی

در این فصل در ادامه انجام اهداف تحقیق، نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل قبل نحوه انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی و فرضیات مربوطه شرح داده‌شد. در این فصل با بررسی تغییرات تراوایی ماتریکس در تنش‌های مختلف، چگونگی تغییرات تراوایی ماتریکس تعیین می‌شود. با استفاده از نتایج مدل‌های عددی و آزمایش‌های آزمایشگاهی رفتار سیال در مجاورت ماتریکس تراوا تحلیل و بررسی می‌شود. با توجه به محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی و نتایج محدود آن، اثر بسته‌شدن درزه در مدل‌سازی‌های عددی به تفصیل بررسی شده است.

۴-۲- بررسی زبری درزه‌ها در روش‌های مختلف

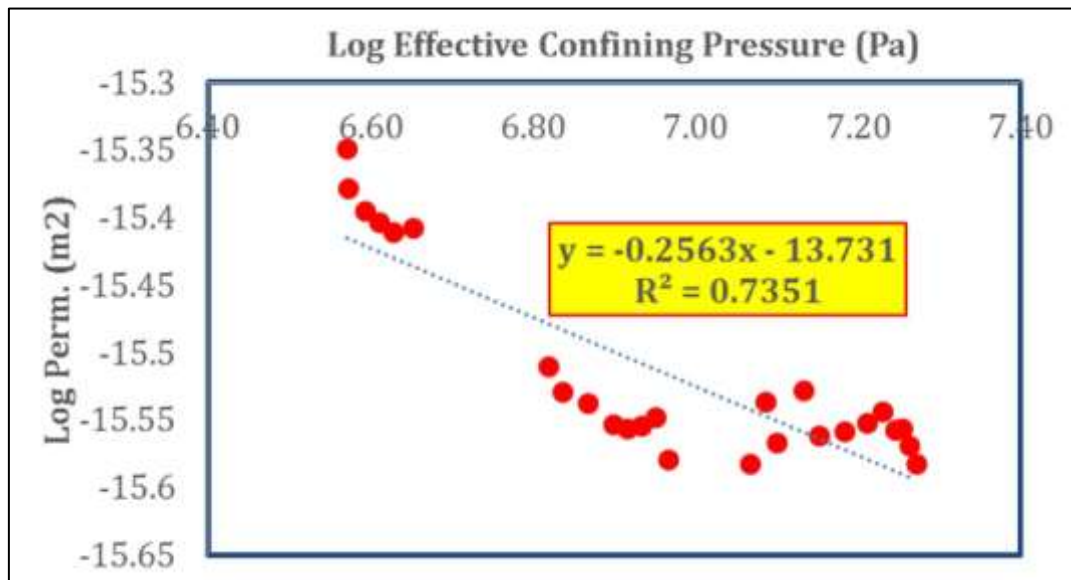
به منظور مقایسه زبری سطوح نمونه‌های مورد استفاده نتایج اندازه‌گیری‌های بخش ۳-۶-۲ به صورت خلاصه در جدول (۴-۱) ارائه شده است. طبق نتایج این جدول تغییرات زیادی بین زبری سطوح بالا و پایین نمونه‌ها وجود ندارد و تنها بیشترین تغییر در بعد فراکتال نمونه S2-1 می‌باشد. تغییرات مقدار JRC از عدد ۱۰ تا ۲۰ متغیر است که نشان از زبری‌های متفاوت سطوح دارد. با این حال این تغییرات زیاد در مورد بعد فراکتال مشاهده نمی‌شود. در نمونه S2-2 و S2-3 مقدار JRC برابر ۱۵ و ۱۰ است ولی طبق اندازه‌گیری بعد فراکتال صفحه بالایی این تغییرات برابر ۲/۱۶ و ۲/۱۵ می‌باشد. در ارتباط با زبری سطوح درزه، از نظر بعد فراکتال تغییرات زبری از نمونه S2-1 به S2-3 افزایش می‌باشد در حالی که این روند در معیار JRC و Z_2 معکوس است. نظر به اینکه در روش‌های Z_2 و JRC از میانگین‌گیری مقادیر مختلف پروفیل برداشت شده، مقدار نهایی استخراج شده است و اینکه این روش‌ها در اصل برای پروفیل‌های دوبعدی طراحی شده‌اند، مبنای تغییرات زبری بعد فراکتال در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه مقدار زبری در نمونه دوم و سوم تقریباً برابر بوده و در نمونه اول زبری کاهش می‌یابد. عدم برابری زبری در سطوح نیز مؤید عدم تطابق کامل بین سطوح است.

جدول (۴-۱) زبری سطوح نمونه‌های سری دوم

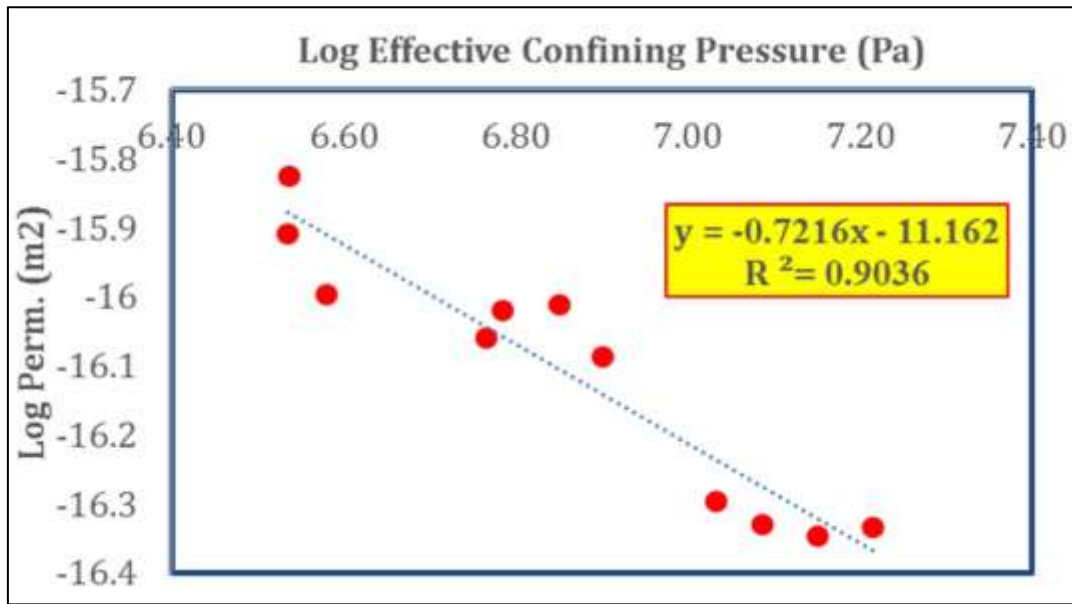
شماره نمونه	صفحه بالایی			صفحه پایینی		
	Fractal	JRC	Z_2	Fractal	JRC	Z_2
S2-1	۲/۰۷	۲۰	۰/۴۲	۲/۱۱	۲۰	۰/۴۴
S2-2	۲/۱۷	۱۵	۰/۳	۲/۱۶	۱۵	۰/۲۹
S2-3	۲/۱۶۵	۹	۰/۱۹	۲/۱۵۴	۱۰	۰/۲

۳-۴- بررسی تغییرات تراوایی ماتریکس (روش آزمایشگاهی)

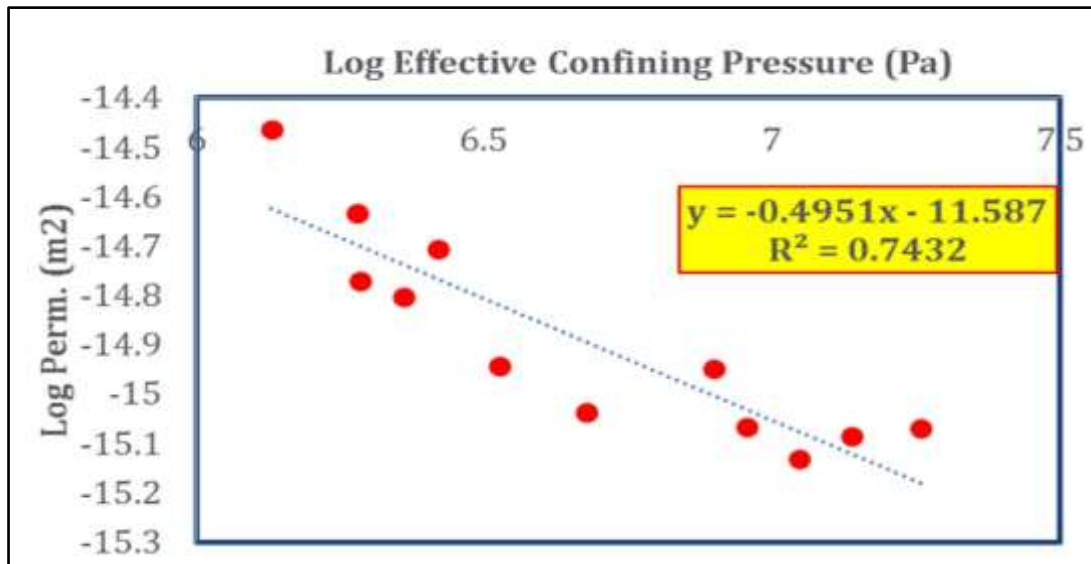
به منظور بررسی تغییرات تراوایی ماتریکس نمونه‌ها در ارتباط با فشار جانبی، مقادیر ارائه شده در بخش ۳-۳- به صورت نمودار ارائه شده است. با بررسی نتایج آزمایش‌ها این نتیجه حاصل شده است که ارتباط بین تراوایی نمونه سنگ و تنش جانبی یک رابطه تمام لگاریتمی طبق شکل (۴-۱) تا شکل (۴-۶) می‌باشد. این موضوع با نتایج مطالعات محققین مختلف همخوانی دارد و در آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های S1-1، S1-2، S1-3 و S2-2 نیز مشاهده می‌شود. اما در مورد نمونه‌های S2-1 و S2-3 برازش رابطه تمام لگاریتمی دارای ضریب همبستگی مناسبی نمی‌باشد. از آنجاکه هر سه نمونه سری دوم (نمونه‌های S2) از یک مخزن تهیه شده‌اند، با فرض یکی بودن مشخصات، نمودار مربوط به نمونه شماره S2-2 را به عنوان معرف برای هر سه در نظر گرفته شده است.



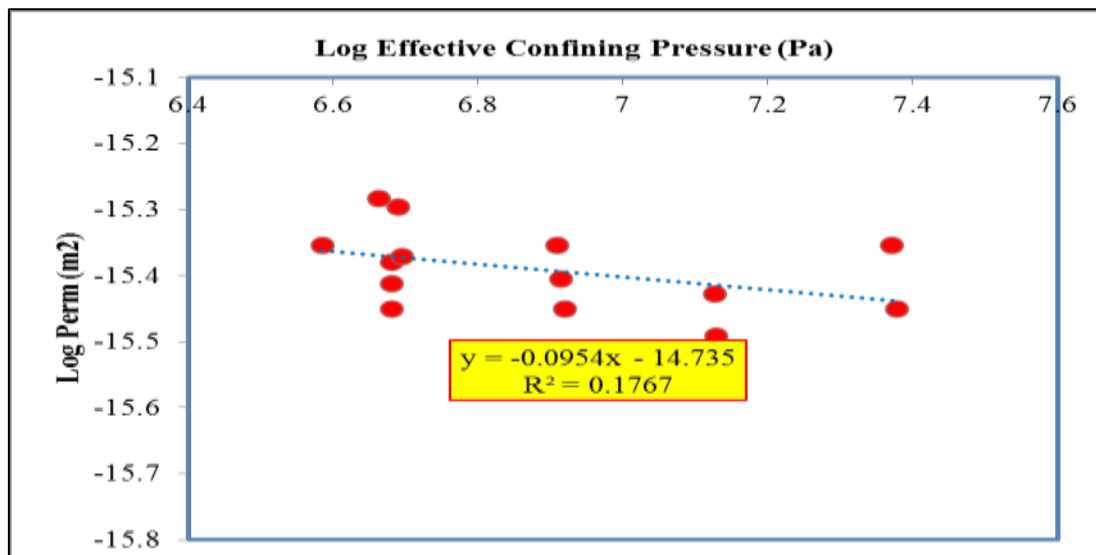
شکل (۴-۱) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-1.



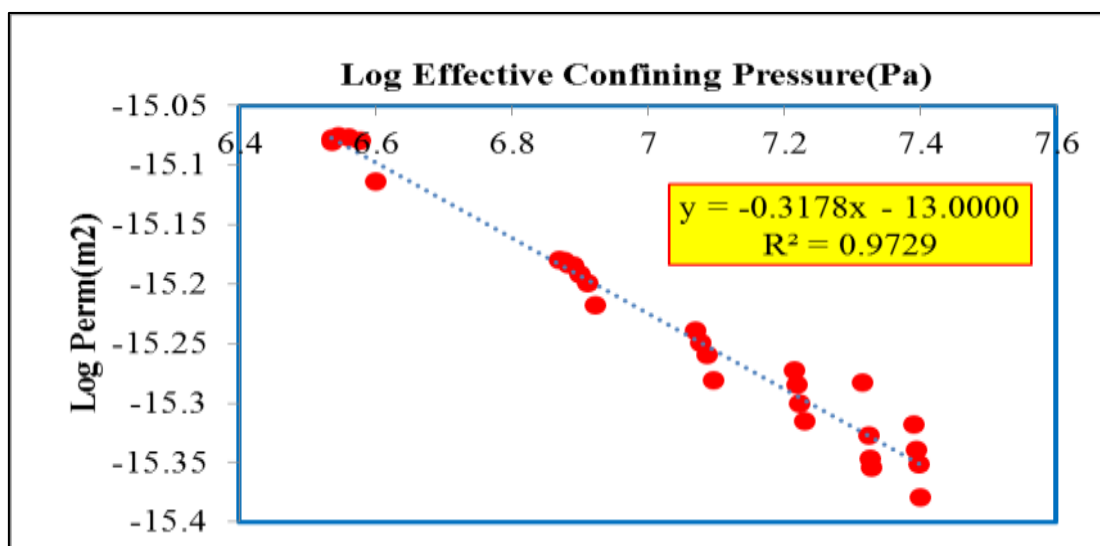
شکل (۲-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-2.



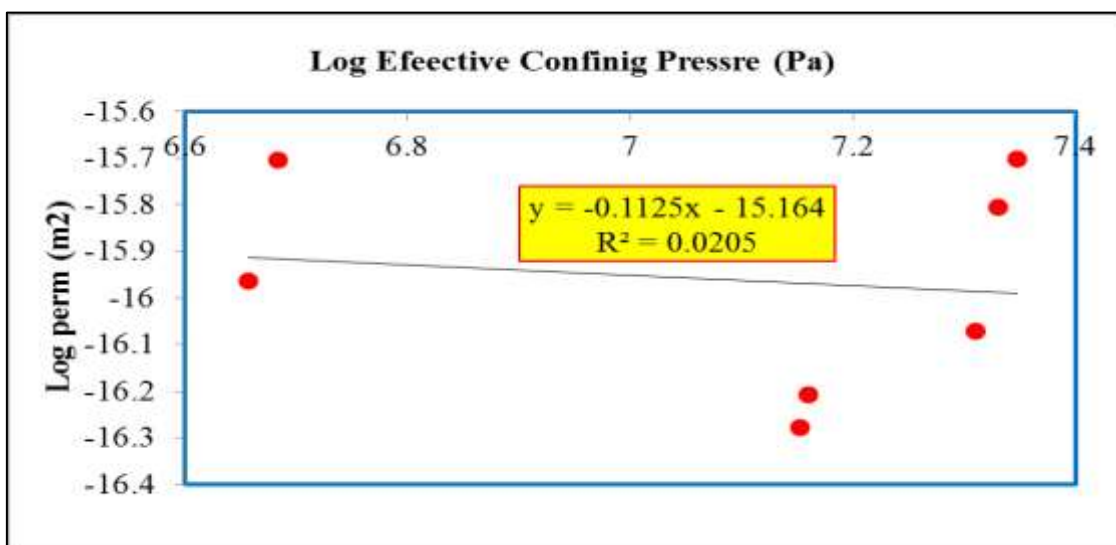
شکل (۳-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S1-3.



شکل (۴-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-1.



شکل (۵-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-2.

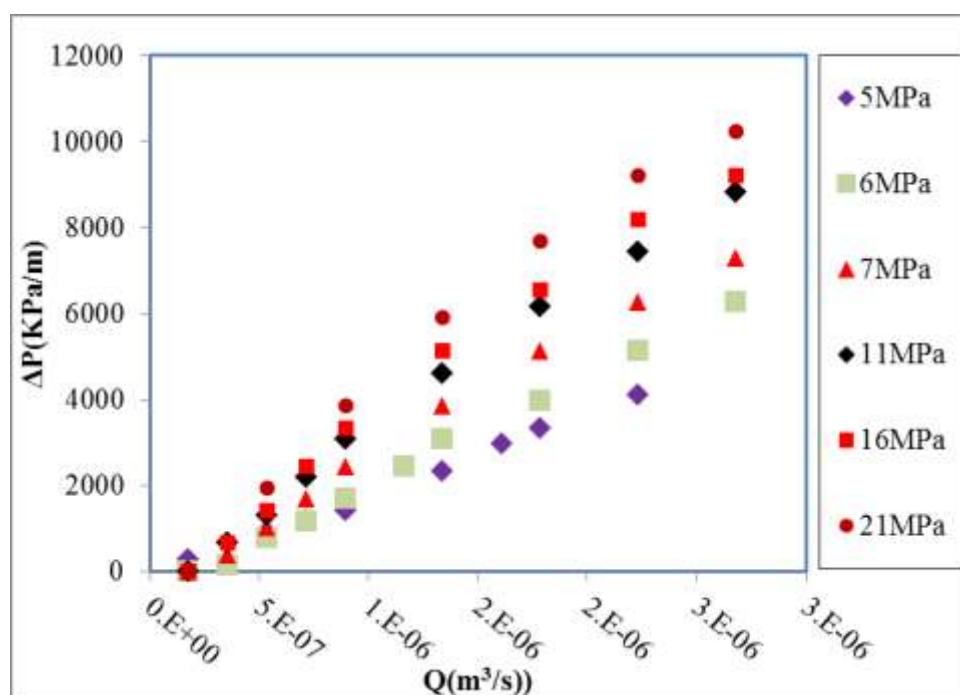


شکل (۶-۴) نمودار تغییر تراوایی برحسب تنش جانبی برای نمونه S2-3.

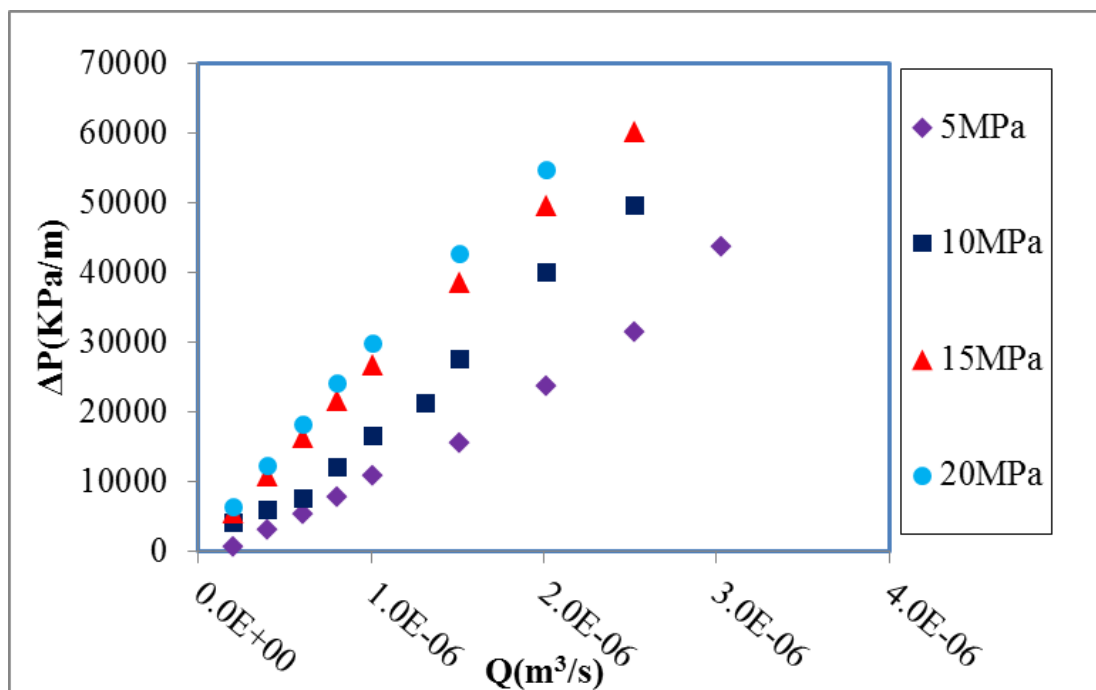
رفتار کاهش تراوایی با افزایش تنش جانبی در مخازن نفتی بسیار پر اهمیت می‌باشد. چراکه با گذشت زمان و کاهش فشارمنفذی (در حین بهره‌برداری از مخزن) مقدار تنش موثر افزایش می‌یابد. افزایش تنش موثر باعث بسته شدن خلل و فرج داخل سنگ می‌شود که این امر به صورت پیوسته در طول زمان باعث کاهش مقدار تراوایی در چاه می‌شود. در نظر گرفتن این موضوع نشان از تغییرات تراوایی در مخازن نفت در دوران بهره‌برداری می‌باشد. چراکه با گذشت زمان که فشار مخزن افت می‌کند مقدار تراوایی نیز کاهش خواهد یافت. نکته مهم‌تر اینکه در زمان بهره‌برداری مقدار تراوایی در همه جهات برابر نبوده و بسته به تنش برجا در جهات مختلف مقدار تراوایی متفاوت خواهد بود. نکته مهم دیگر اینکه در نمودارهای فوق چون در یک بازه مشخص از فشار، آزمایش‌ها انجام شده‌اند، همواره با افزایش فشار جانبی تراوایی نمونه کاهش پیدا کرده است. اما می‌بایست در نظر گرفت تا یک محدوده مشخصی کاهش تراوایی با افزایش فشار جانبی ادامه دارد که در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی این موضوع تعیین نشده است. به عبارتی می‌توان یک حد کمینه برای تراوایی در بیشینه مقدار فشار جانبی لحاظ نمود.

۴-۴- بررسی تغییرات تراوایی درزه (روش آزمایشگاهی)

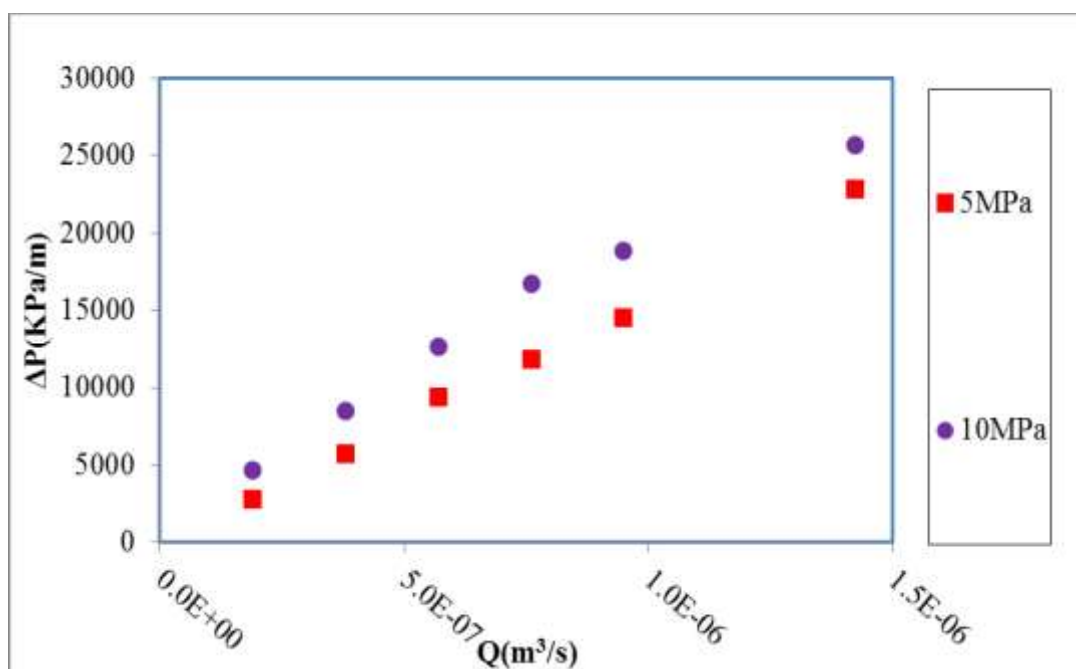
نتایج آزمایش‌های سیلابزنی درزه با فشارهای جانبی متفاوت بر درزه‌های مختلف طبق مطالب بخش ۳-۵- ارائه شد. به منظور بررسی نتایج این آزمایش‌ها نمودارهای تغییرات فشار-نرخ جریان برای هر نمونه به شرح شکل (۴-۷) تا شکل (۴-۹) ارائه گردیده است.



شکل (۴-۷) نمودار تغییرات فشار برحسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-1.



شکل (۸-۴) نمودار تغییرات فشار بر حسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-2.



شکل (۹-۴) نمودار تغییرات فشار بر حسب نرخ جریان عبوری از درزه در نمونه S2-3.

در صورت برازش منحنی های درجه ۲ (معادلات فورچمیر) نتایج طبق جدول (۲-۴) خواهند بود.

جدول (۲-۴) معادله فورچمیر برازش شده بر خروجی آزمایش‌های تعیین تراوایی درزه

شماره نمونه	فشار جانبی (MPa)	رابطه فورچمیر ($-\Delta P=A Q+B Q^2$)		
		R ²	A	B
S2-1	۵	۰.۹۹۷۳	۲.۰۰E+۱۲	۱.۰۰E+۱۷
	۶	۰.۹۸۵۸	۲.۰۰E+۱۲	۳.۰۰E+۱۷
	۷	۰.۹۹۴۹	۴.۰۰E+۱۲	-۳.۰۰E+۱۷
	۱۱	۰.۹۹۹۹	۵.۰۰E+۱۲	-۴.۰۰E+۱۷
	۱۶	۰.۹۹۸۷	۵.۰۰E+۱۲	-۵.۰۰E+۱۷
	۲۱	۰.۹۹۴۹	۶.۰۰E+۱۲	-۷.۰۰E+۱۷
S2-2	۵	۰.۹۹۷۰	۷.۰۰E+۱۲	۲.۰۰E+۱۸
	۱۰	۰.۹۹۳۹	۱.۰۰E+۱۳	۳.۰۰E+۱۸
	۱۵	۰.۹۹۹۹	۳.۰۰E+۱۳	-۱.۶۰E+۱۷
	۲۰	۰.۹۹۹۹	۳.۰۰E+۱۳	-۲.۲۰E+۱۷
S2-3	۵	۰.۹۹۷۸	۲.۰۰E+۱۳	۵.۰۰E+۱۷
	۱۰	۰.۹۹۳۹	۲.۰۰E+۱۳	-۵.۰۰E+۱۸

از آنجایی که درزه ایجاد شده در نمونه‌ها به صورت مصنوعی و با استفاده از دستگاه شکل (۳-۹) ایجاد شده است، در زمان انجام آزمایش‌ها از بین رفتگی خاصی در صفحات دو طرف درزه ایجاد نشده و می‌توان بیان نمود که دو سطح تقریباً با هم منطبق هستند. به عبارتی همواره دو سطح درزه متصل می‌باشند و افزایش فشار جانبی باعث افزایش سطح اتصال به مقدار چشمگیر نشده است.

این مهم با مقادیر کمی ارائه شده (مقادیر A و B) در جدول (۲-۴) تطابق دارد. در نتیجه در فشارهای متفاوت مقدار بسته‌شدگی درزه زیاد تغییر نکرده است.

با توجه به اینکه دستگاه آزمایش سیلاب‌زنی، فشار روغن اطراف نمونه را ثابت نگه‌داشته و مقدار جریان ورودی و خروجی را کنترل و رفتارنگاری می‌کند، در مقادیر فشار جانبی بالا اتصال دو سطح درزه افزایش می‌یابد که باعث کاهش محل عبور سیال از بین دو سطح درزه می‌شود. همانطور که در نتایج جدول فوق مشخص است در مقادیر فشار جانبی کم، رفتار سیال از رابطه فورچمیر تبعیت می‌کند. اما در مقادیر فشار جانبی بالا روند تغییر افزایش فشار با نرخ جریان کاهشی می‌شود طبق مطالعات نصری و همکاران (Nasri-Fakherdavood, et al., 2019)، دلیل این امر اتساع درزه به صورت لحظه‌ای به علت افزایش فشار سیال در یک انتهای نمونه می‌باشد. پس از عبور سیال در یک لحظه کوتاه بر اثر اتساع دوباره درزه بسته شده و افزایش فشار رخ می‌دهد. این موضوع در معادلات ارائه شده در جدول (۲-۴) نشان داده شده است. مقادیر منفی ضریب غیرخطی معادله فورچمیر دقیقاً حالت اتساع را نشان می‌دهند.

۴-۵- بررسی تغییرات تراوایی درزه در مجاورت ماتریکس تراوا (روش عددی)

با توجه به اینکه در روش آزمایشگاهی امکان اندازه‌گیری دقیق مقدار اتصال سطوح درزه در مقادیر مختلف تنش جانبی وجود ندارد، اثر این فاکتور در بررسی رفتار سیال در روش آزمایشگاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از ضعف‌های دیگر روش آزمایشگاهی عدم تهیه نمونه‌هایی با تراوایی متفاوت و سطح زبر یکسان می‌باشد. اثر درصد اتصال متفاوت سطوح و تراوایی جانبی ماتریکس می‌تواند تأثیر زیادی بر رفتار سیال در درزه زبر داشته‌باشد. برای بررسی این موضوع استفاده از روش عددی، تنها روش ممکن است.

به منظور بررسی اثر این فاکتورها مقادیر تراوایی محیط جانبی درزه و همچنین درصد اتصال دو سطح در هر نمونه طبق جدول (۴-۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

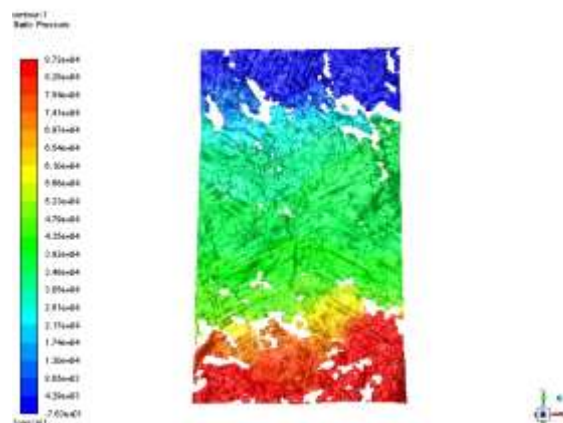
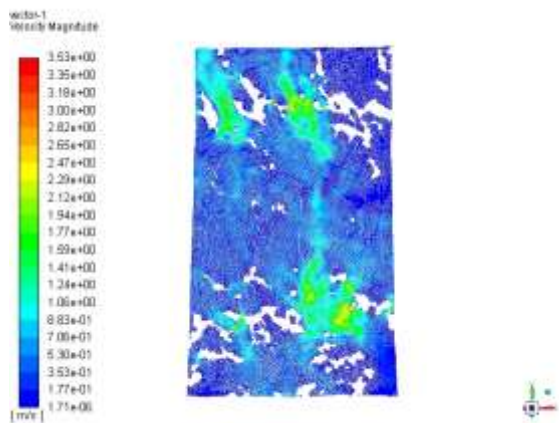
جدول (۴-۳) مقادیر تراوایی ماتریکس و مقدار بازشدگی برای هر نمونه

شماره نمونه	تراوایی (mD)	درصد اتصال (%)
S2-1	۱، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰	۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰
S2-2	۱، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰	۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰
S2-3	۱، ۵۰۰ و ۱۰۰۰	۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰

در ادامه به بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر رفتار سیال درون درزه پرداخته می‌شود. به طوری کلی در این تحقیق در روش عددی با ثابت نگه‌داشتن تراوایی در مقادیر مختلف بازشدگی رفتار سیال درون درزه در مجاورت محیط متخلخل تراوا بررسی شده است. خروجی استخراج شده از نرم‌افزار مقدار جریان عبوری از درزه می‌باشد. با داشتن مقدار نرخ‌جریان خروجی و اختلاف فشار دو سر نمونه امکان ترسیم نمودار تغییرات فشار نسبت به نرخ‌جریان عبوری وجود دارد. در ادامه در تصاویر شکل (۴-۱۰) تا شکل (۴-۱۴) تغییرات فشار و مسیر جریان در هر نمونه برای شرایطی که تراوایی محیط جانبی ۱۰۰ میلی‌داریس است نمایش داده شده است. لازم به توضیح است مدلسازی در شرایط فشار ثابت انجام شده است.

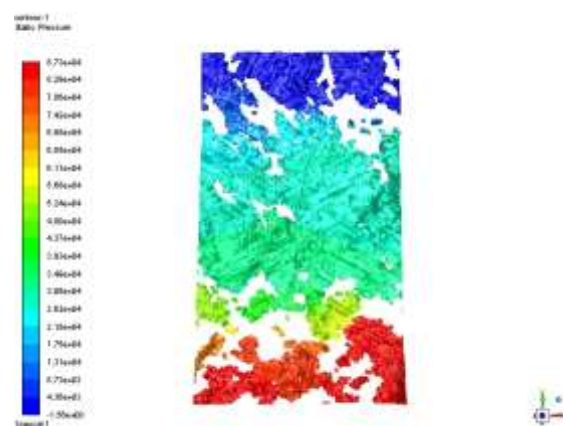
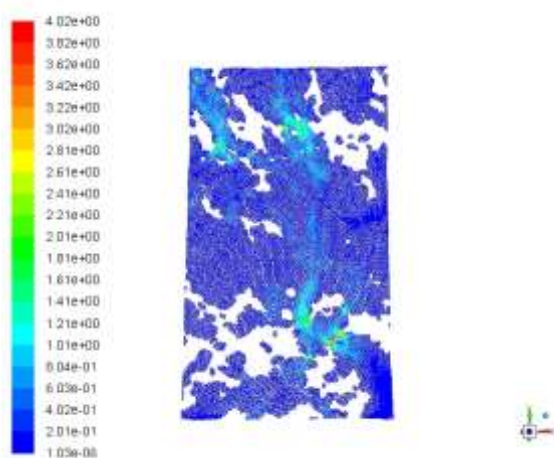
طبق شکل (۴-۱۰) تا شکل (۴-۱۴) توزیع فشار تقریباً به صورت خطی از ابتدا تا انتهای مدل تغییر می‌کند. با این حال تغییرات جزئی نیز با توجه به محل اتصال سطوح وجود دارد. نکته قابل توجه در این اشکال وجود فشار متناسب با اطراف است. این موضوع حتی در محدوده‌هایی محصور به یک فضای بسته نیز دیده می‌شود. به عنوان مثال در شکل (۴-۱۰) در سطح اتصال ۴۵٪ در محدوده ابتدایی مدل با اینکه در وسط درزه بازشدگی‌های مجزا وجود دارد اما توزیع فشار در آنها متناسب با موقعیت کلی است. دلیل این امر ورود سیال به داخل بازشدگی از محیط متخلخل جانبی می‌باشد و فشار آن نیز متناسب با توزیع فشار در محیط متخلخل است. در ارتباط با مسیر جریان و سرعت آن طبق شکل (۴-۱۰) در سطح اتصال ۴۵٪ با اینکه عملاً اتصال درزه در سطح نمونه از بین رفته است اما سرعت جریان در انتهای مدل بیشتر

شده است. علت این موضوع ورود سیال به درزه از محیط متخلخل در انتهای مدل می‌باشد. این دو نکته به صورت کلی و دقیق اهمیت در نظر گرفتن محیط متخلخل در اطراف درزه را به روشنی اثبات می‌کند. همچنین می‌بایست در نظر داشت در محدوده‌هایی که درزه منحصر به فرد وجود دارد عملاً یک مسیر میانبر برای سیال محسوب می‌شود. سیال از ماتریکس به این فضاها ی خالی وارد شده و در این فضاها به راحتی به جلوتر حرکت می‌کند. در انتها دوباره از آنجا به محیط ماتریکس ورود می‌کند.



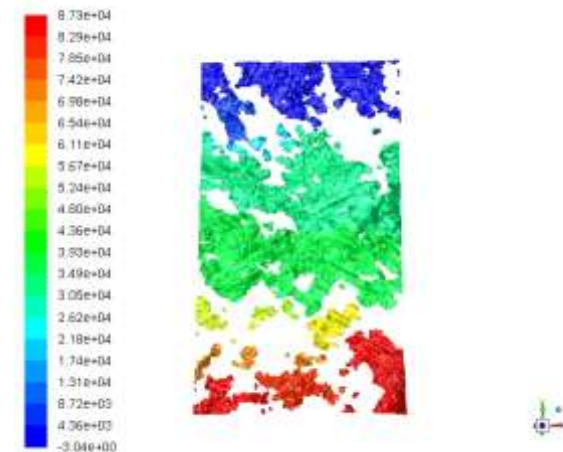
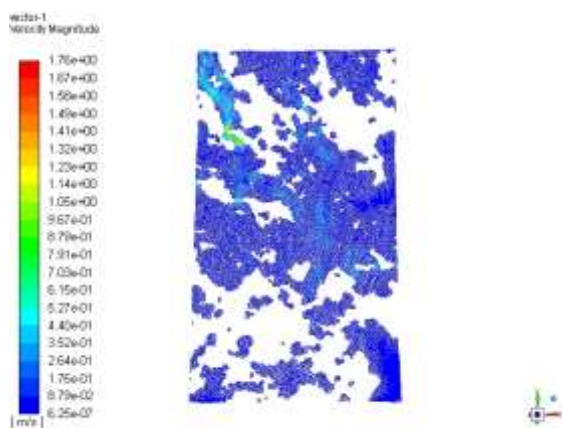
نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪

توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪



نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪

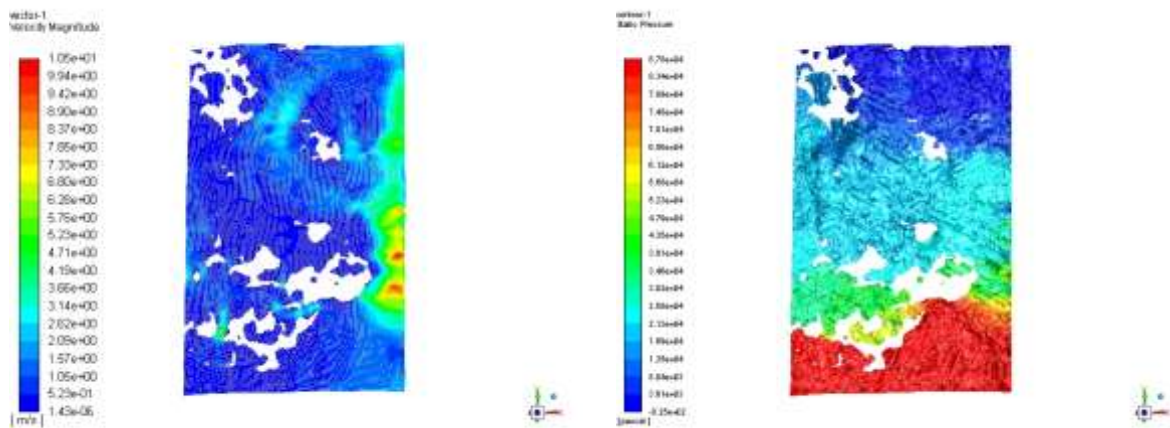
توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪



نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪

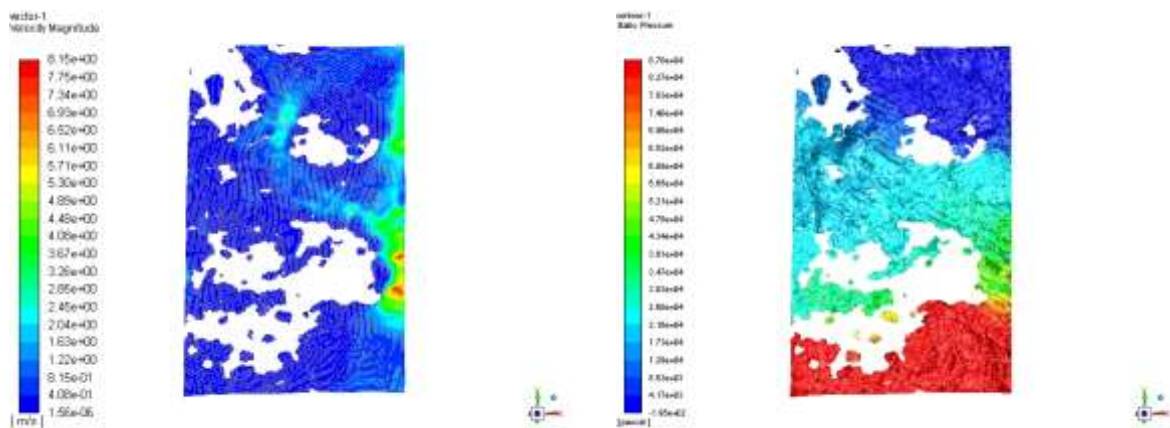
توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪

شکل (۴-۱۰) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-1 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۴۵٪.



نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪

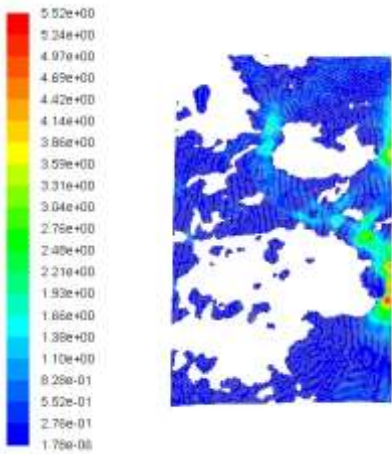
توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪



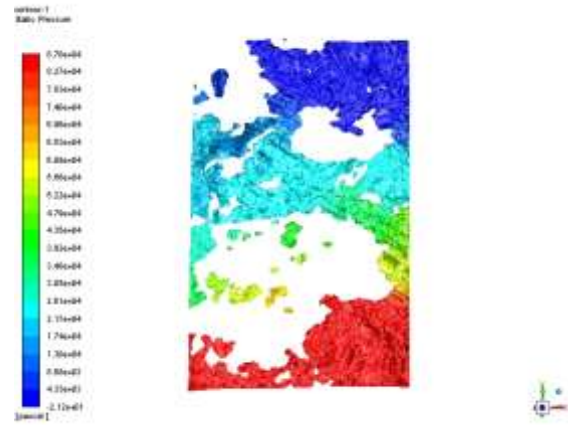
نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪

توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪

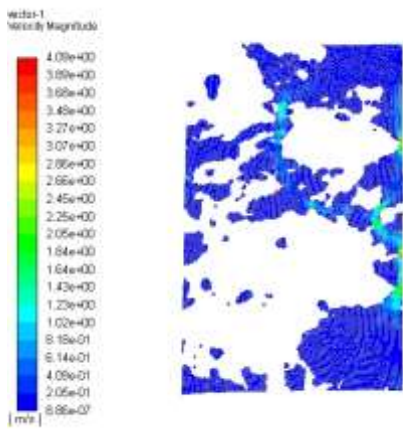
شکل (۴-۱۱) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-2 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۳۰٪.



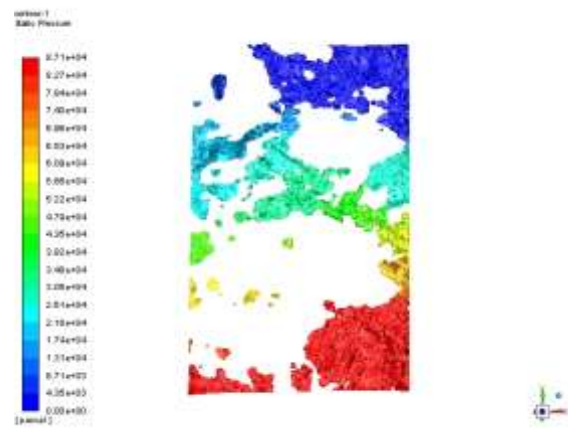
نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪



توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪

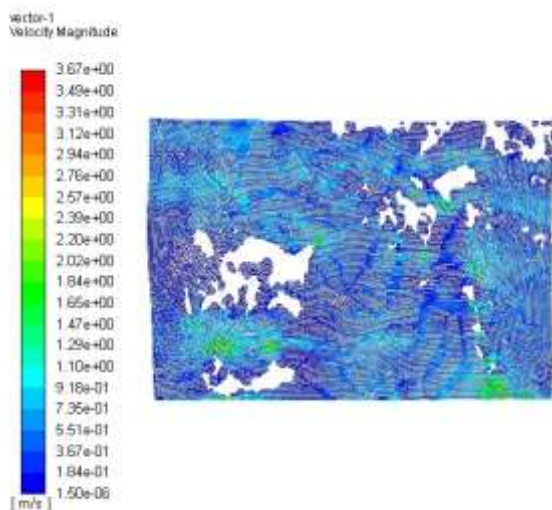


نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۶۰٪

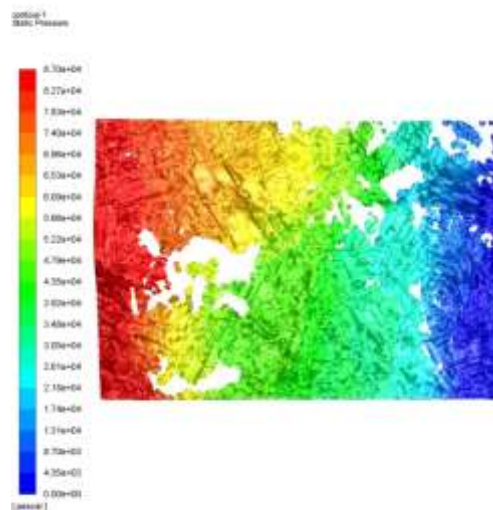


توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۶۰٪

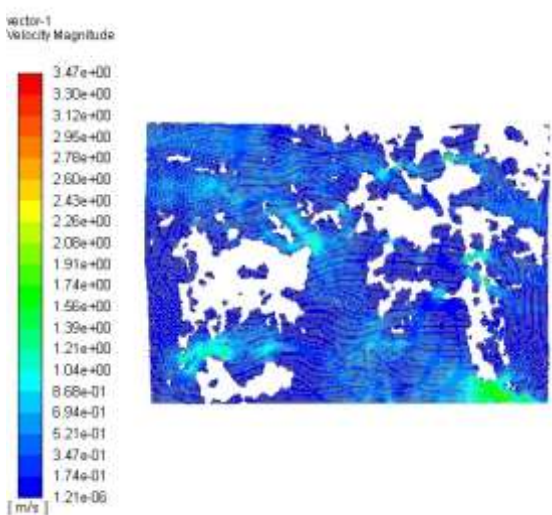
شکل (۴-۱۲) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-2 در مقادیر سطوح اتصال ۴۵٪ تا ۶۰٪.



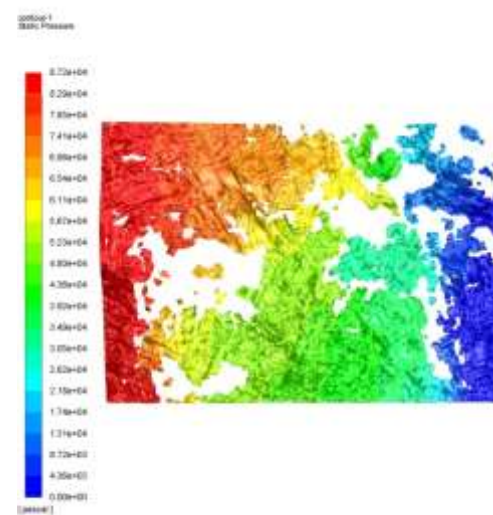
نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪



توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۱۵٪

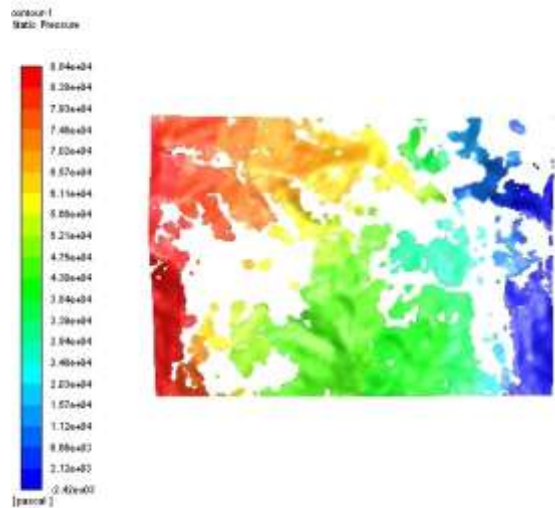
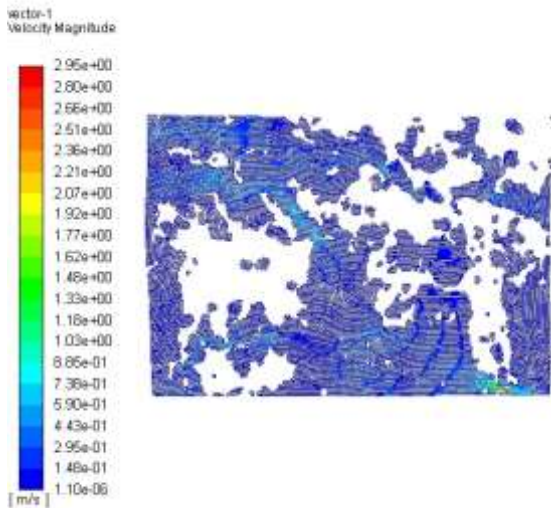


نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪



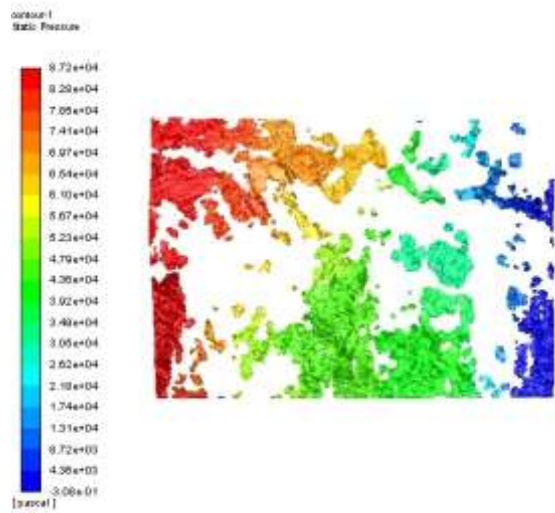
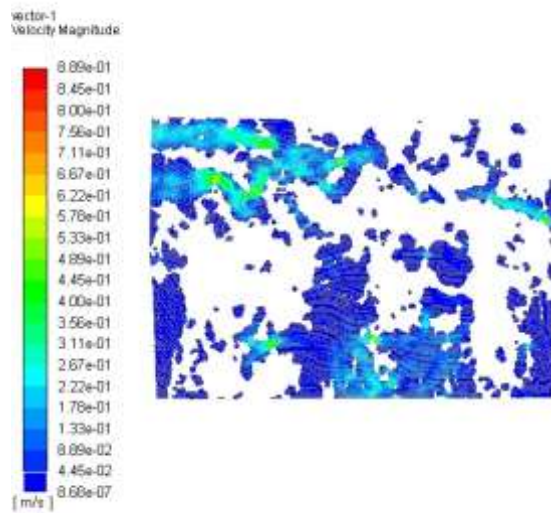
توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۳۰٪

شکل (۴-۱۳) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-3 در مقادیر سطوح اتصال ۱۵٪ تا ۳۰٪.



نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪

توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۴۵٪



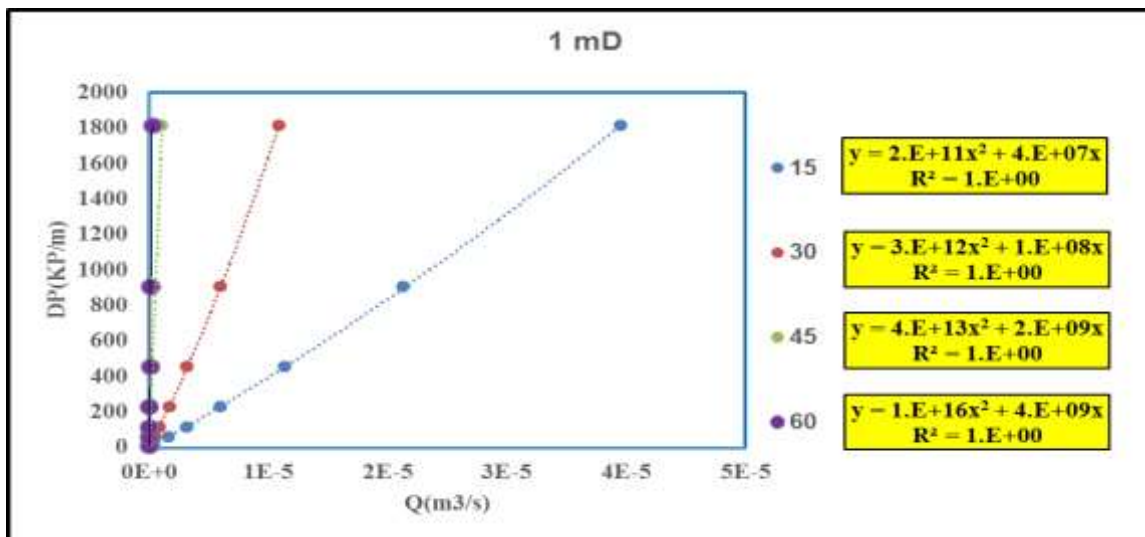
نمایش مسیر جریان درون درزه با سطح اتصال ۶۰٪

توزیع فشار سیال درون درزه با سطح اتصال ۶۰٪

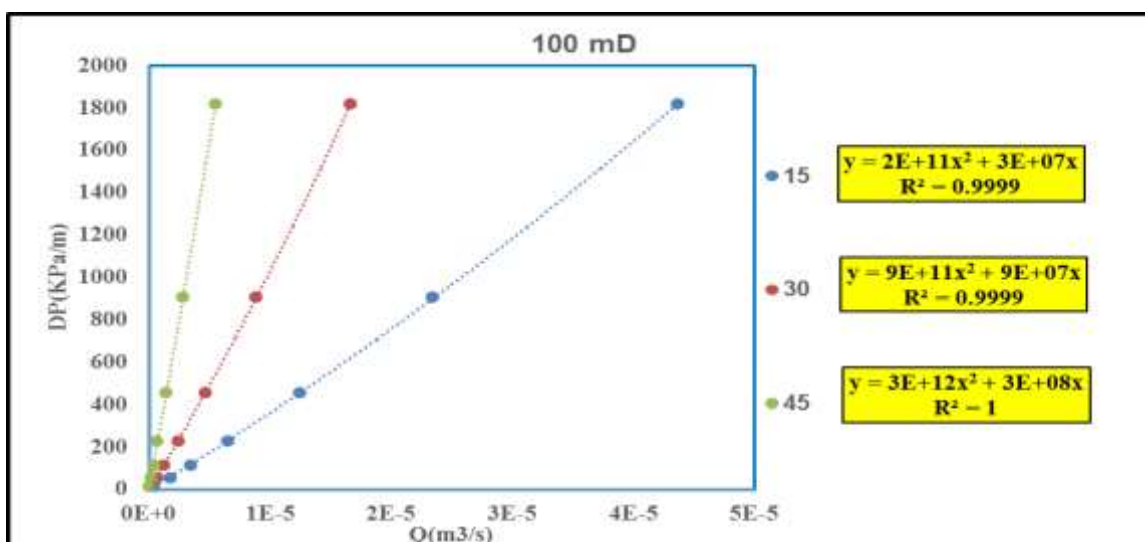
شکل (۴-۱۴) توزیع فشار و مسیر جریان در نمونه S2-3 در مقادیر سطوح اتصال ۴۵٪ تا ۶۰٪.

۴-۵-۱- بررسی تغییرات غیرخطی جریان نسبت به مقدار سطح اتصال درزه

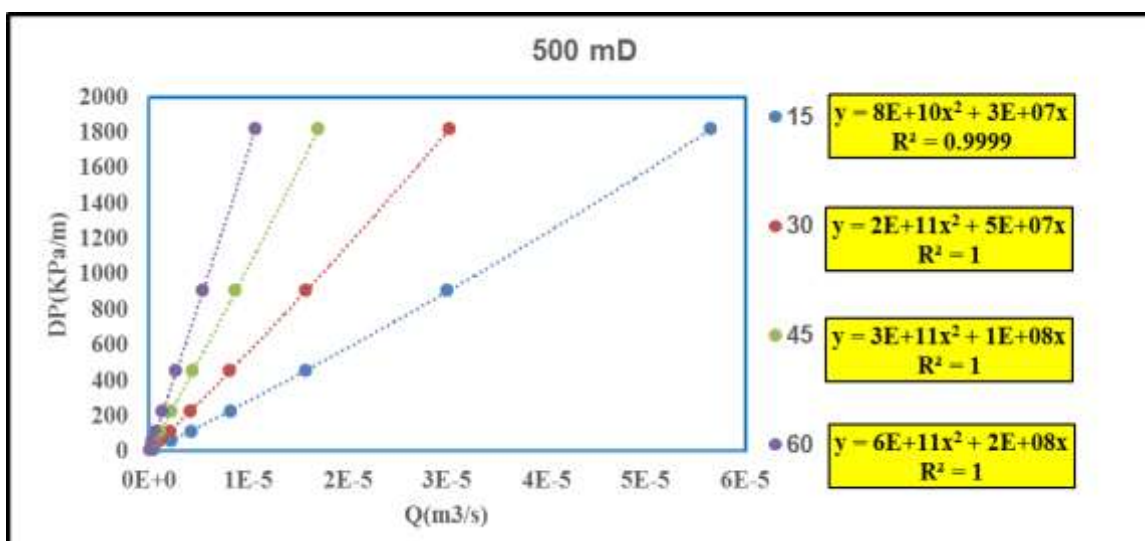
در این بخش تغییرات رفتار سیال درون درزه نسبت به مقدار سطح اتصال سطوح درزه (میزان بازشدگی درزه) با ثابت نگه داشتن مقدار تراوایی در هر نمونه بررسی شده است.



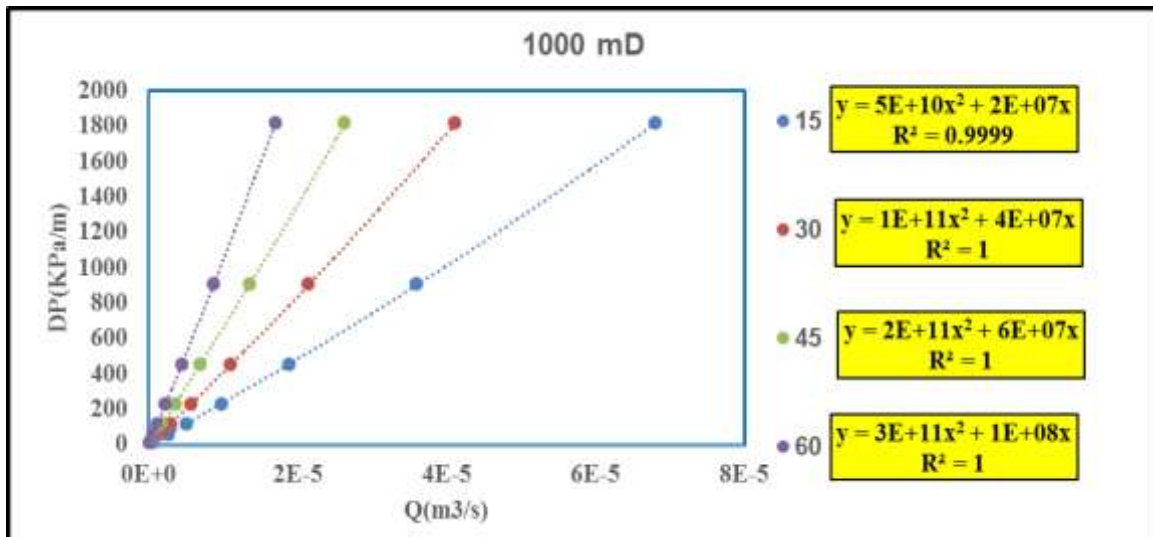
شکل (۴-۱۵) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی‌داری.



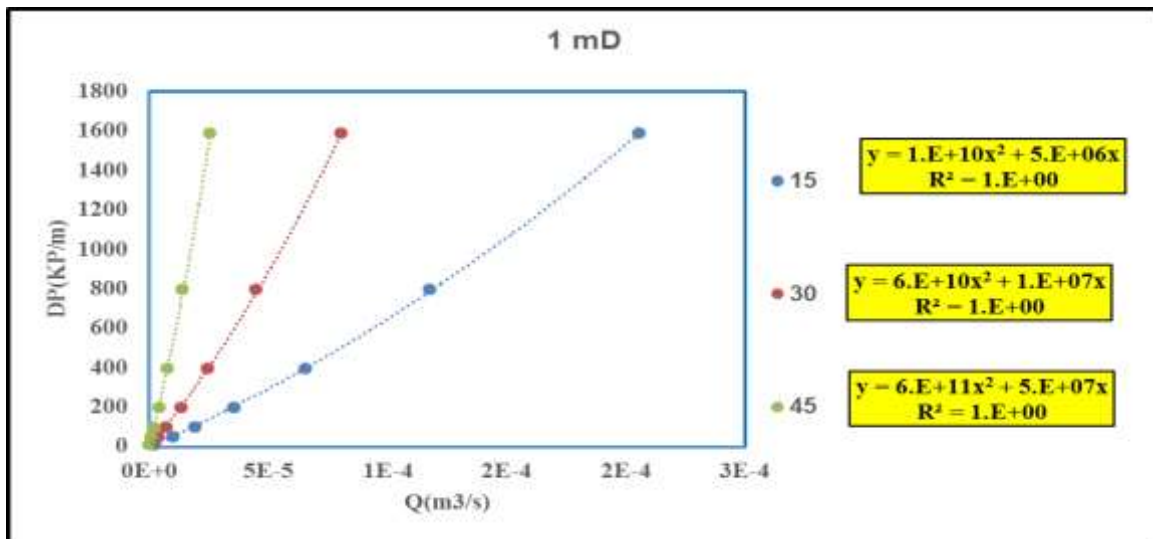
شکل (۴-۱۶) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰ میلی‌داری.



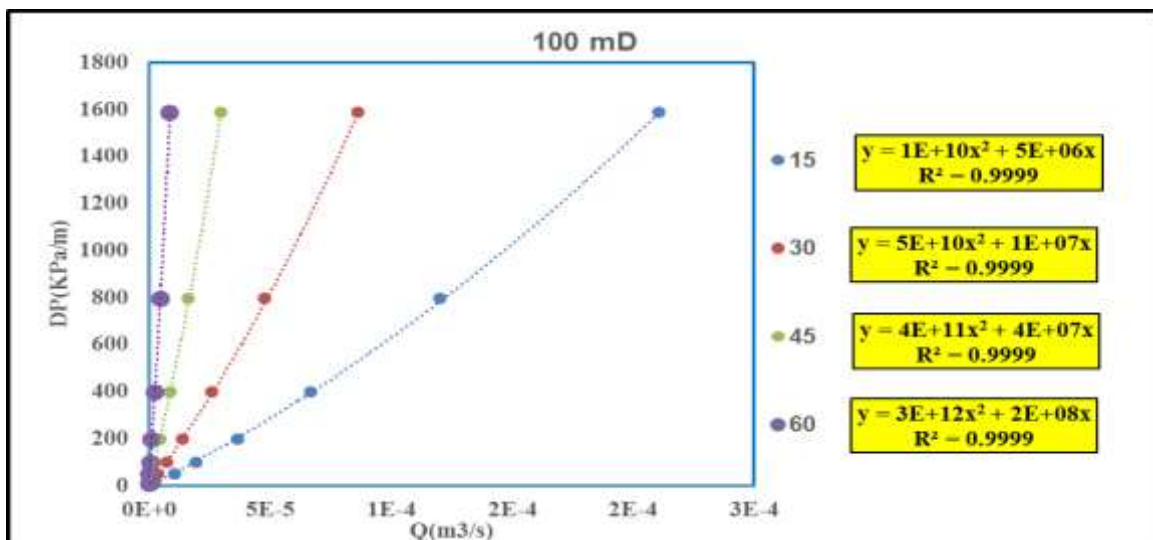
شکل (۴-۱۷) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داری.



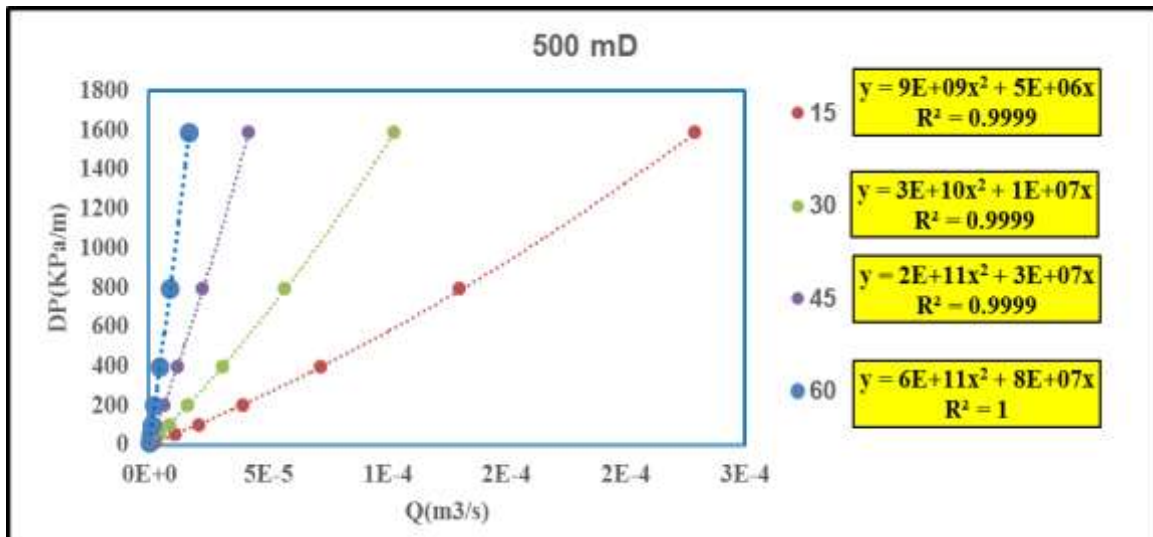
شکل (۴-۱۸) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی داری.



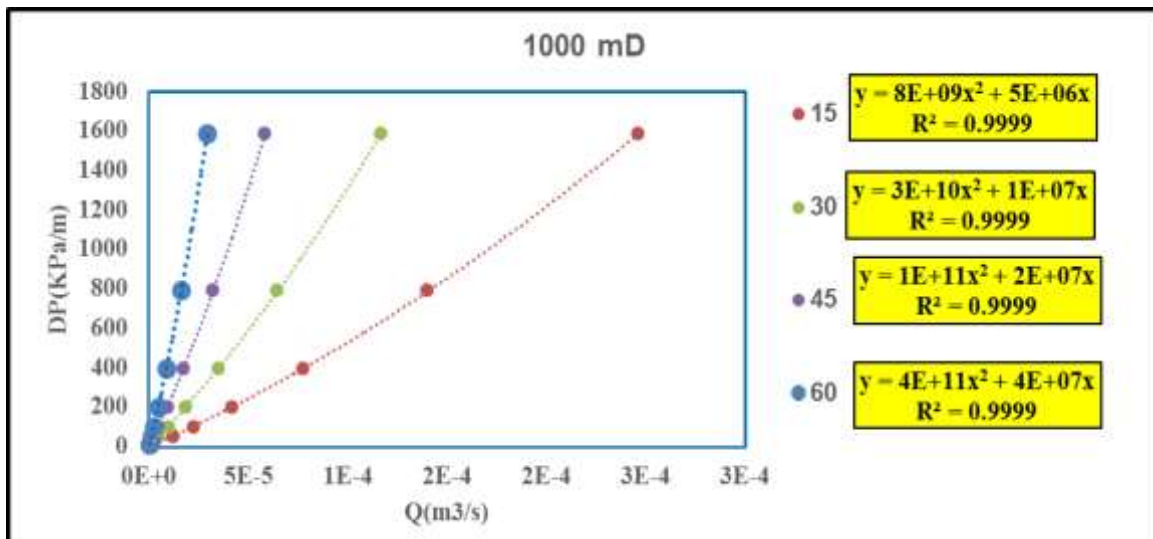
شکل (۴-۱۹) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی داری.



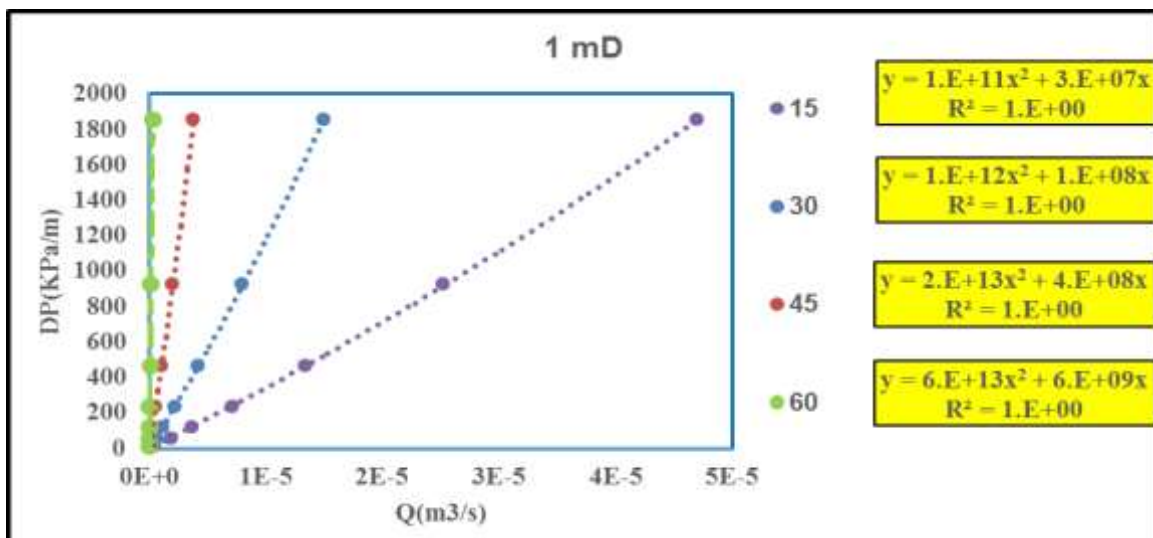
شکل (۴-۲۰) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰ میلی داری.



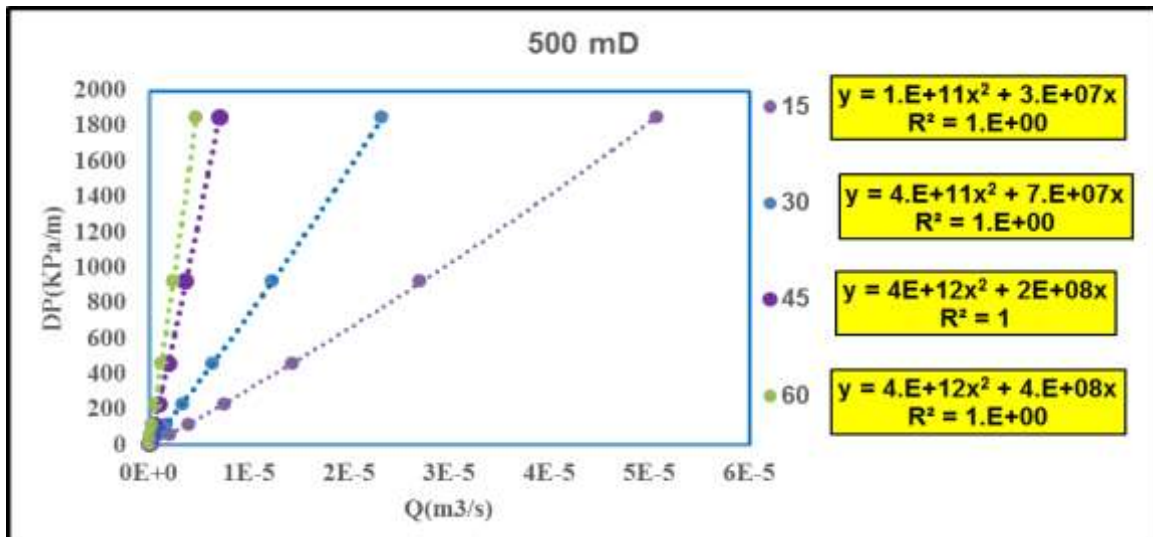
شکل (۴-۲۱) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داریسی.



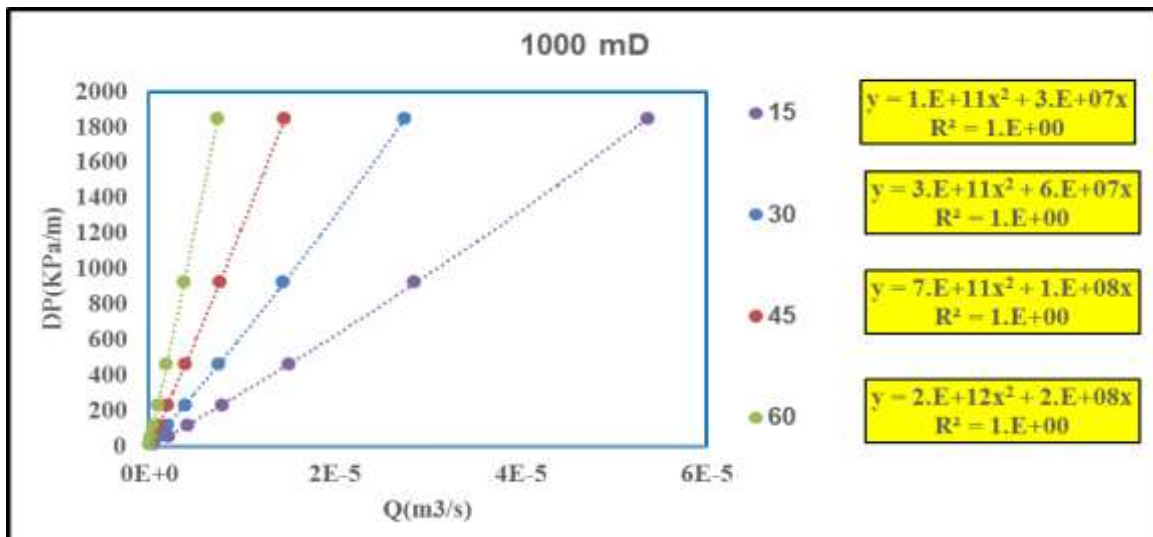
شکل (۴-۲۲) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی‌داریسی.



شکل (۴-۲۳) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱ میلی‌داریسی.



شکل (۴-۲۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۵۰۰ میلی‌داریسی.

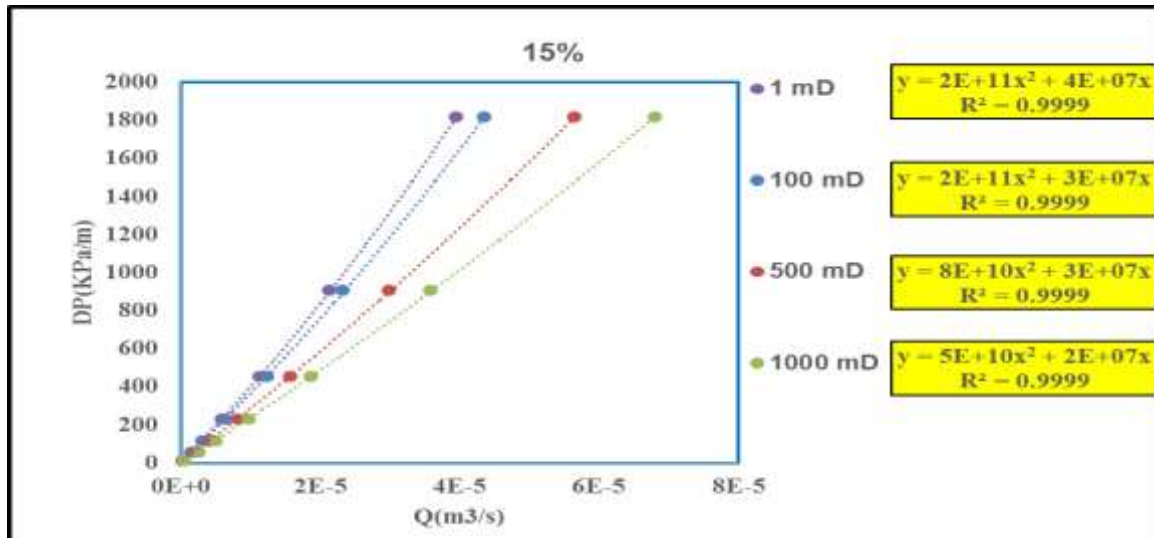


شکل (۴-۲۵) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در درصدهای اتصال مختلف درزه و تراوایی جانبی ۱۰۰۰ میلی‌داریسی.

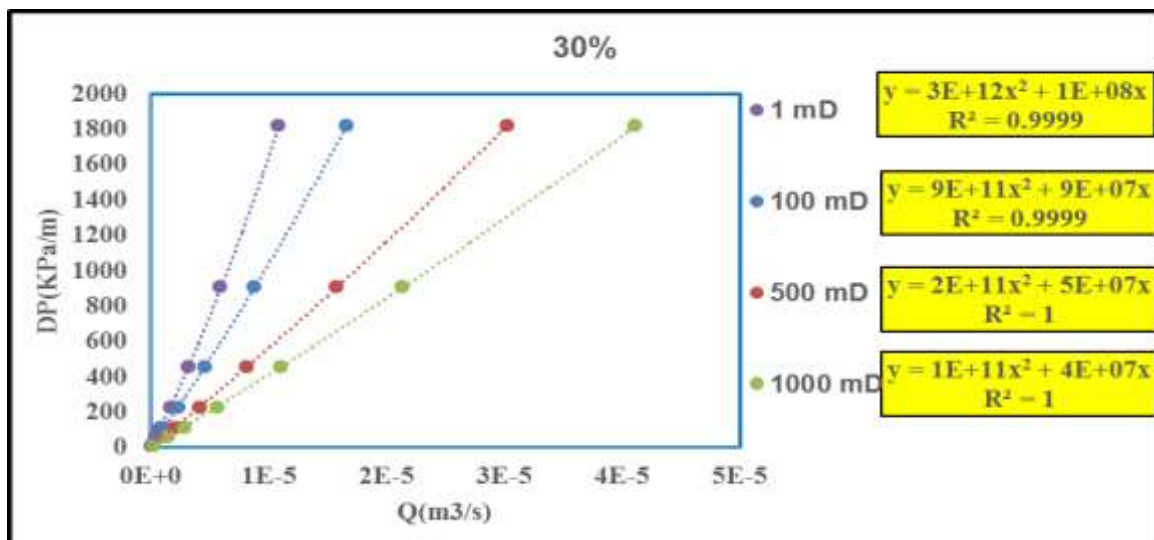
با توجه به شکل‌های ارائه شده مشخص است رفتار سیال در مقادیر اتصال‌های مختلف سطوح درزه رفتار غیرخطی طبق رابطه فورچمیر است. این مهم در همه مقادیر تراوایی برای ماتریکس مجاور درزه نیز برقرار است. همانگونه که در همه اشکال مشخص است با افزایش درصد اتصال سطوح درزه‌ها ضرایب رابطه فورچمیر افزایش یافته است. همچنین مقادیر ضریب همبستگی تمامی نمودارها تقریباً نزدیک به یک می‌باشد که نشان از برازش درست و صحیح معادله درجه دوم فورچمیر بر نتایج حاصل از مطالعات مدل‌سازی عددی است. افزایش میزان بازشدگی مکانیکی در تمامی نمودارها با مقادیر مختلف تراوایی جانبی مؤید این موضوع است که هر چه مقدار بازشدگی مکانیکی کاهش یافته، مقادیر پارامترهای رابطه فورچمیر نیز افزایش یافته است.

۴-۵-۲- بررسی تغییرات غیرخطی جریان نسبت به تراوایی ماتریکس مجاور

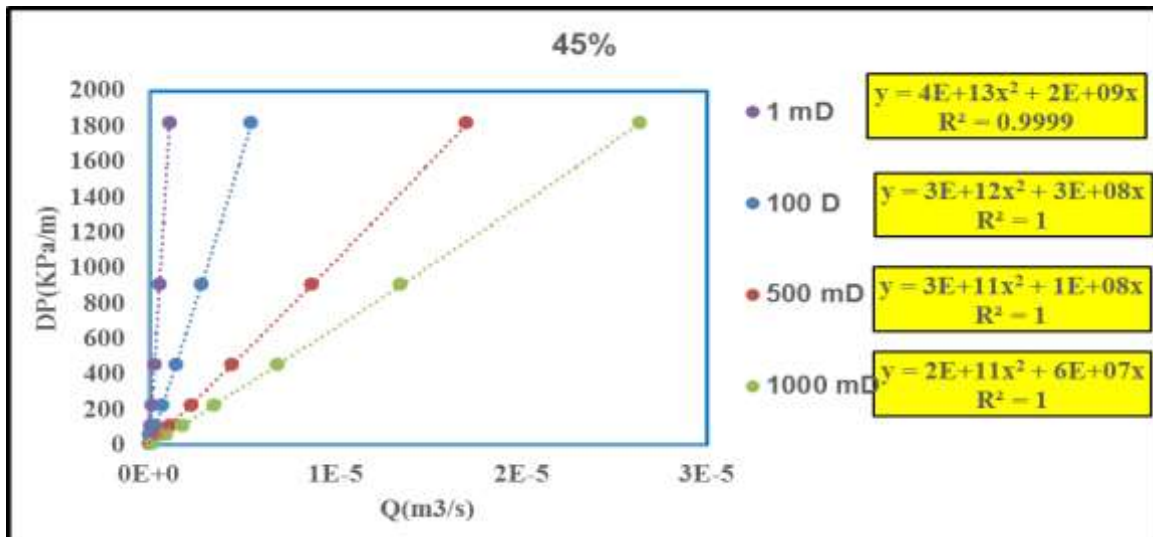
در این بخش به منظور بررسی اثر تراوایی بر رفتار سیال درون درزه، در حالتی که سطح اتصال سطوح درزه برابر است مقدار تراوایی تغییر داده شده است.



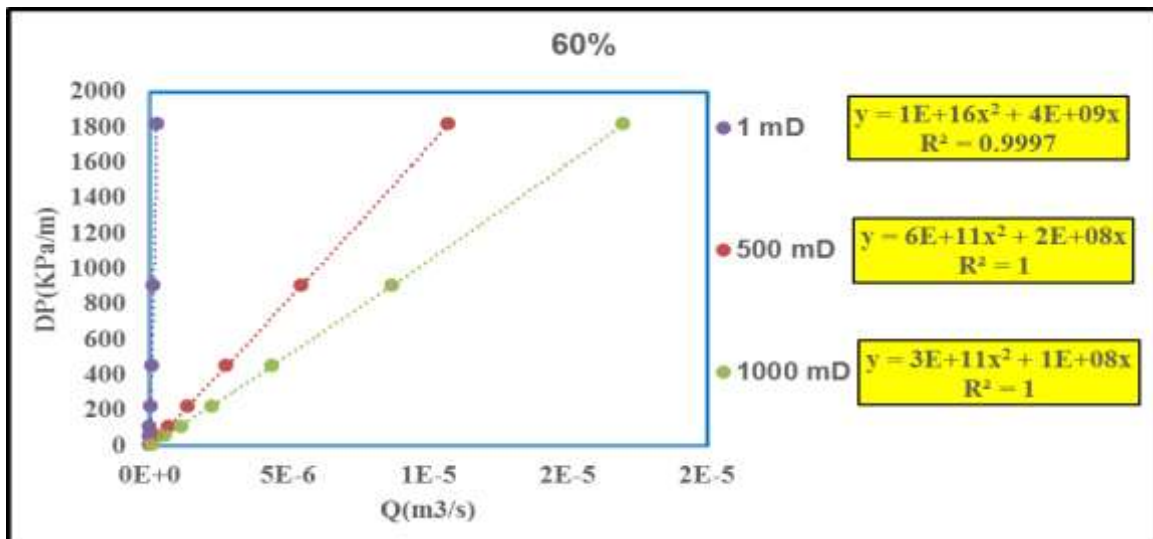
شکل (۴-۲۶) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪.



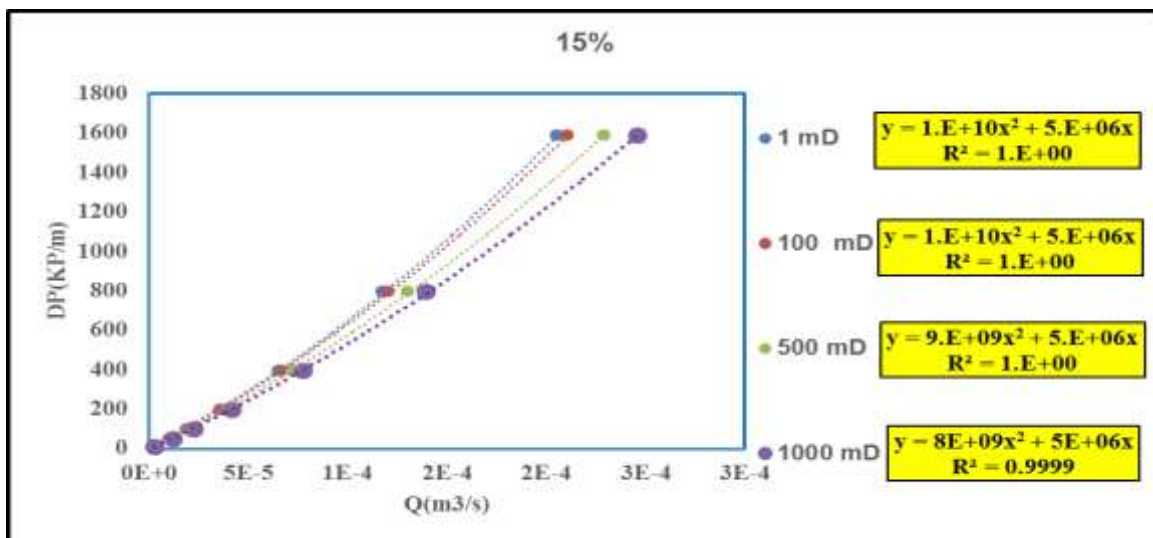
شکل (۴-۲۷) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪.



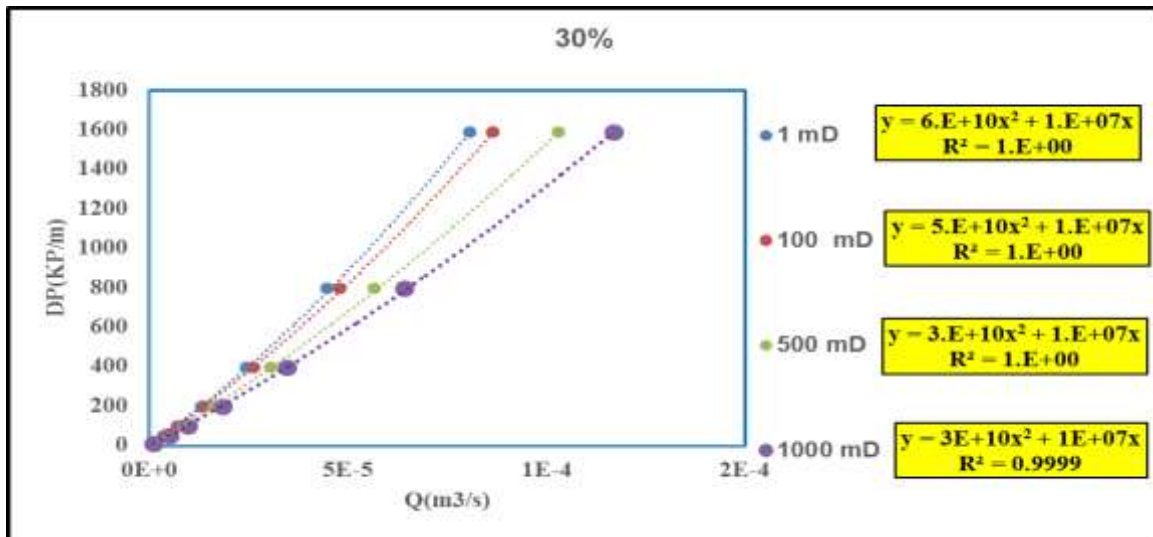
شکل (۴-۲۸) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪.



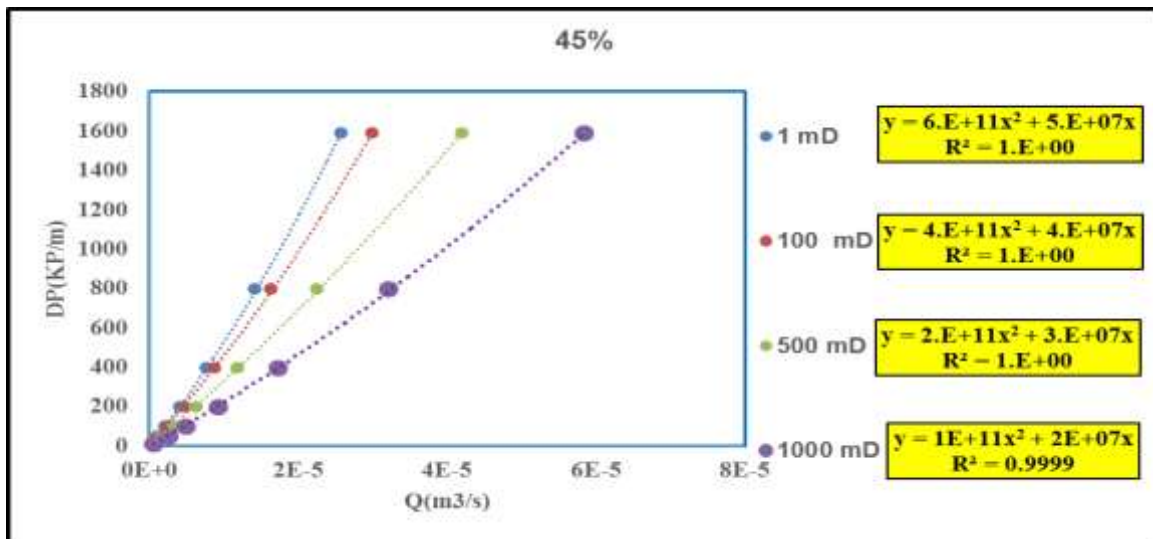
شکل (۴-۲۹) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-1 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪.



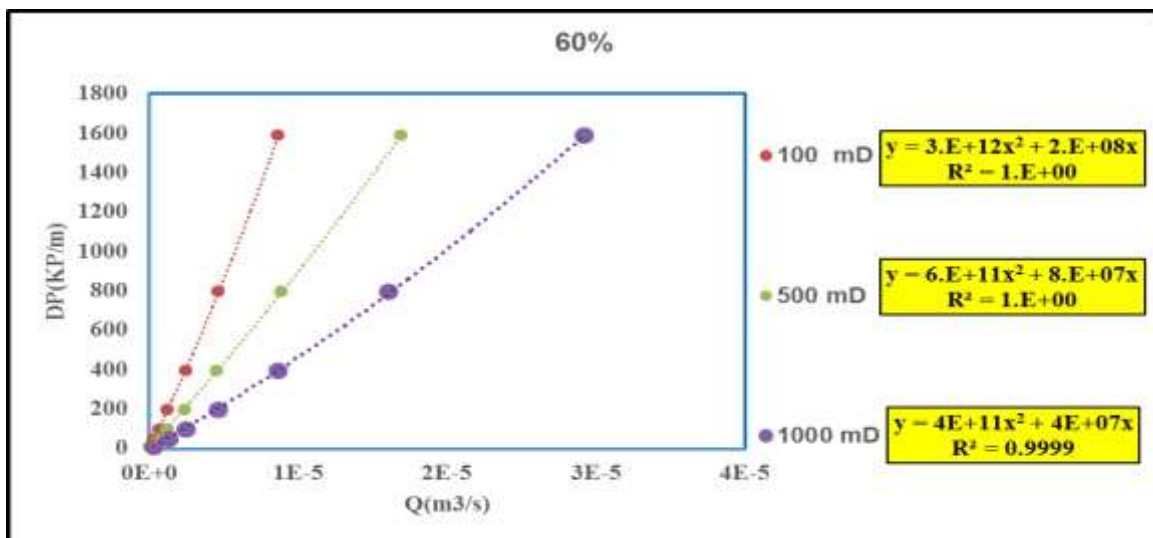
شکل (۴-۳۰) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪.



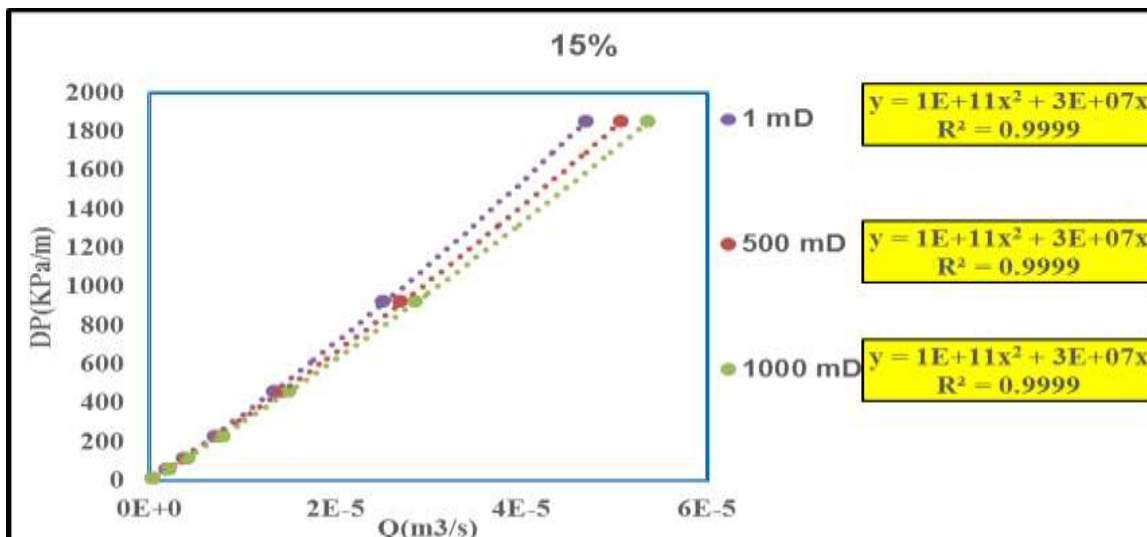
شکل (۴-۳۱) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪.



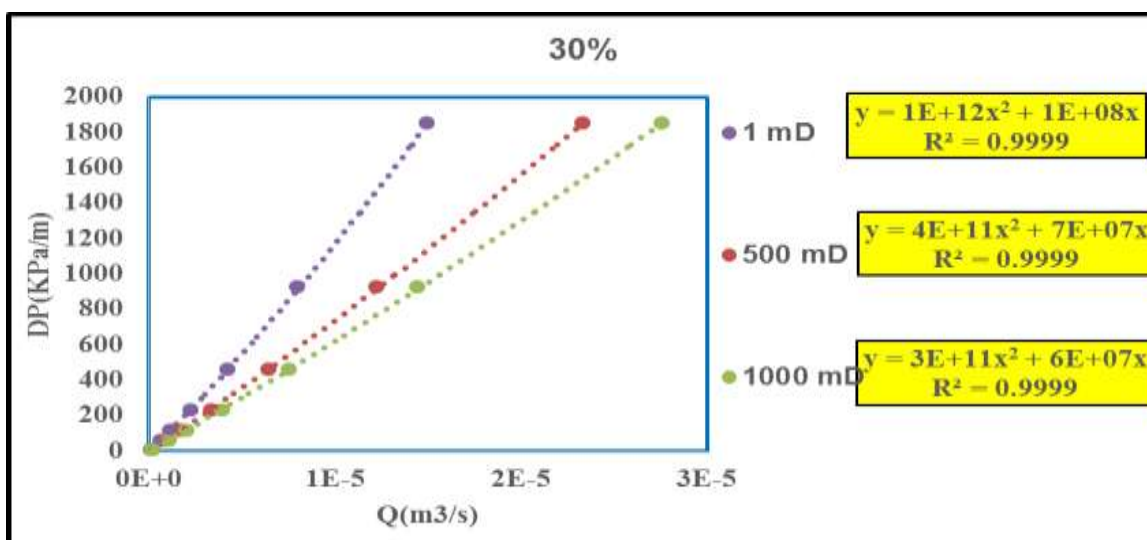
شکل (۴-۳۲) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪.



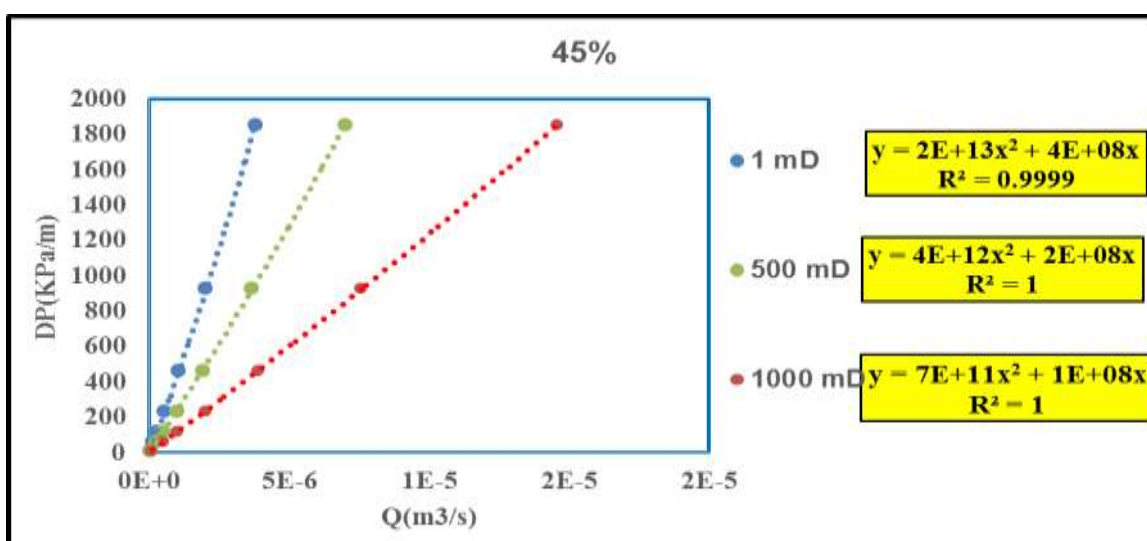
شکل (۴-۳۳) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-2 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪.



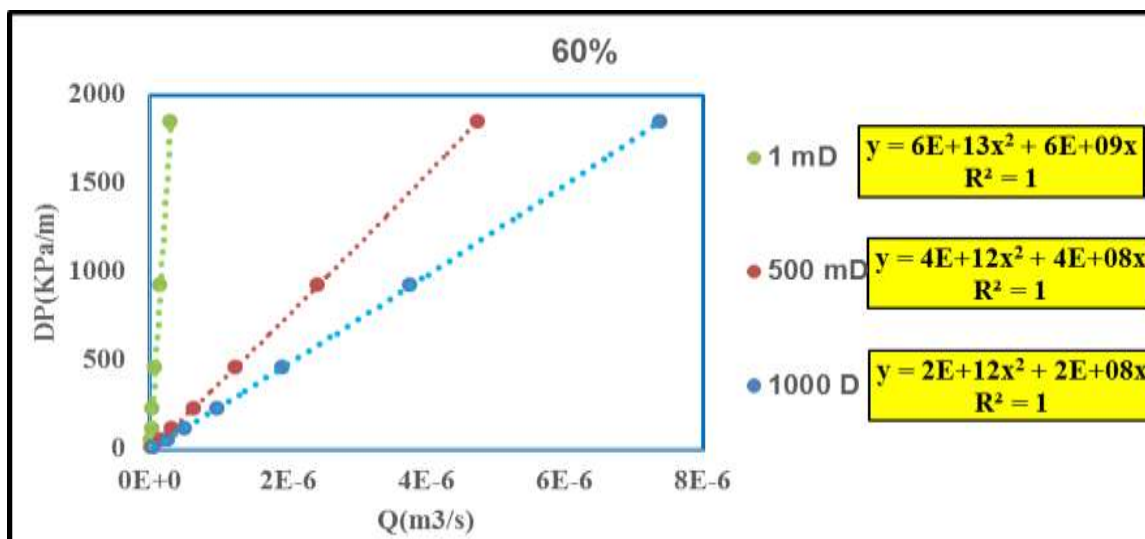
شکل (۴-۳۴) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۱۵٪.



شکل (۴-۳۵) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۳۰٪.



شکل (۴-۳۶) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۴۵٪.



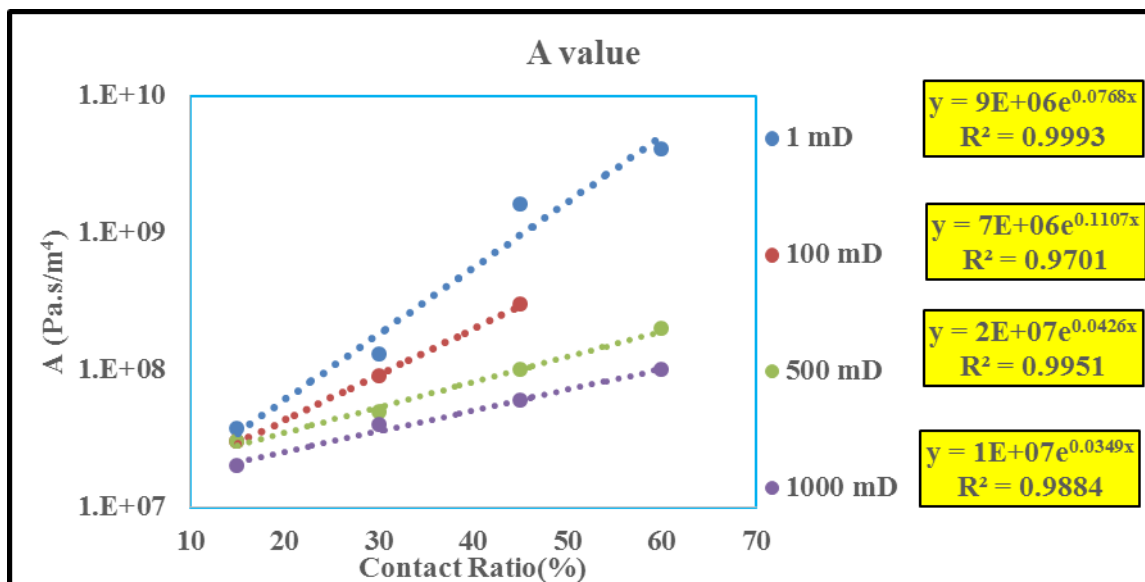
شکل (۴-۳۷) رفتار غیرخطی سیال در نمونه S2-3 در تراوایی‌های جانبی مختلف و سطح اتصال ۶۰٪.

در شکل (۴-۲۶) تا شکل (۴-۳۷) اثر تراوایی ماتریکس جانبی بر رفتار سیال درون درزه در مقادیر اتصال مختلف سطوح درزه ارائه شده است. نکته قابل توجه در همه نمودارها افزایش جریان عبوری از درزه با افزایش تراوایی ماتریکس می‌باشد. این روند در نمودارهایی که درصد سطوح اتصال بیشتر است واضح‌تر می‌باشد. این روند در نمودارهای با درصد اتصال ۱۵٪ هم مشاهده می‌شود اما اثر گذاری آن کمتر است. در نتیجه می‌توان تخمین زد در صورت عدم اتصال دو سطح درزه مقدار تراوایی تأثیر زیادی بر رفتار سیال درون درزه ندارد. این فرض در عمل امکان پذیر نمی‌باشد چرا که به سبب تنش نرمال درزه، همواره سطوح درزه در اتصال با یکدیگر هستند. در نتیجه در نظر گرفتن تراوایی برای محیط مجاور درزه زبر در بررسی رفتار سیال درون درزه مهم می‌باشد.

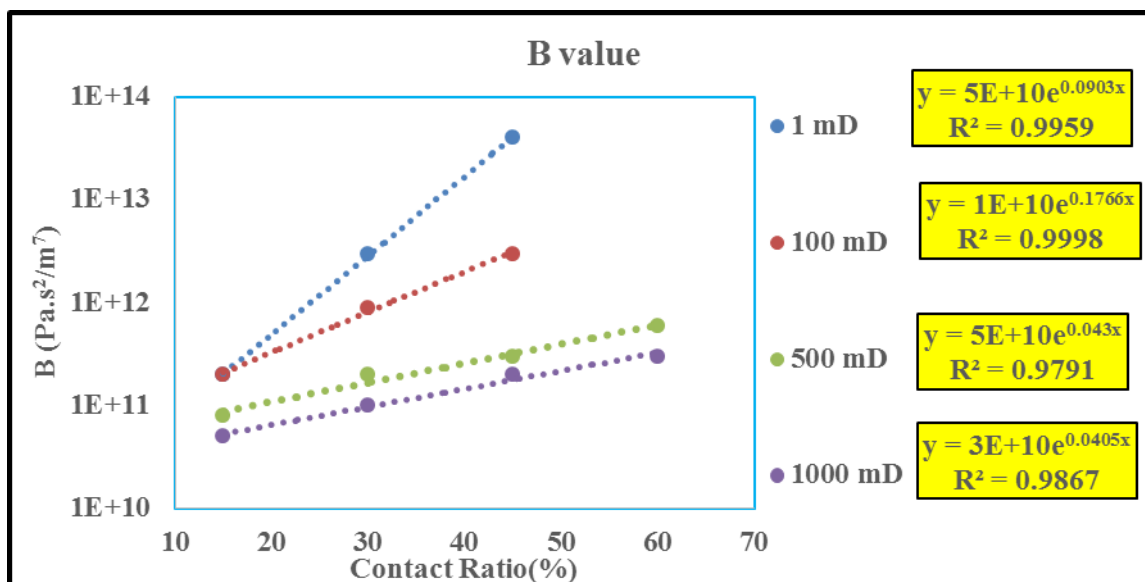
۴-۵-۳- بررسی تغییرات ضرایب رابطه فورچمیر در ارتباط با درصد اتصال سطوح درزه

طبق تصاویر بخش‌های قبلی اثر درصد اتصال درزه بر رفتار سیال به خوبی نشان داده شد. در این بخش به منظور تعیین مقدار تأثیر آن، مقادیر ضرایب A و B در رابطه فورچمیر به صورت خاص نسبت به درصد سطح اتصال درزه به ازای تراوایی‌های مختلف نمایش داده می‌شود. این مهم در شکل (۴-۳۸) تا شکل (۴-۴۳) نمایش داده شده است. طبق این اشکال رابطه افزایش ضرایب A و B برحسب درصد اتصال یک رابطه نمایی (خطی نیمه لگاریتمی) با ضریب همبستگی بالای ۹۵٪ می‌باشد. طبق تصاویر چنین نتیجه‌گیری می‌شود که هر چه سطوح اتصال بیشتر باشد رفتار سیال غیرخطی‌تر خواهد بود (مقادیر A و B افزایش می‌یابند). لازم به توضیح است در واقعیت افزایش تنش جانبی باعث افزایش اتصال می‌شود. اما افزایش خطی تنش معادل افزایش خطی سطح اتصال نمی‌باشد. طبق شکل (۴-۳۸) تا شکل (۴-۴۳) روند تغییرات فشار نسبت به نرخ جریان عبوری در مقادیر تراوایی کمتر بیشتر بوده و در تراوایی‌های بالاتر کمتر است. این موضوع نیز به این نکته دلالت دارد که افزایش تراوایی جانبی بر رفتار سیال درون درزه بسیار

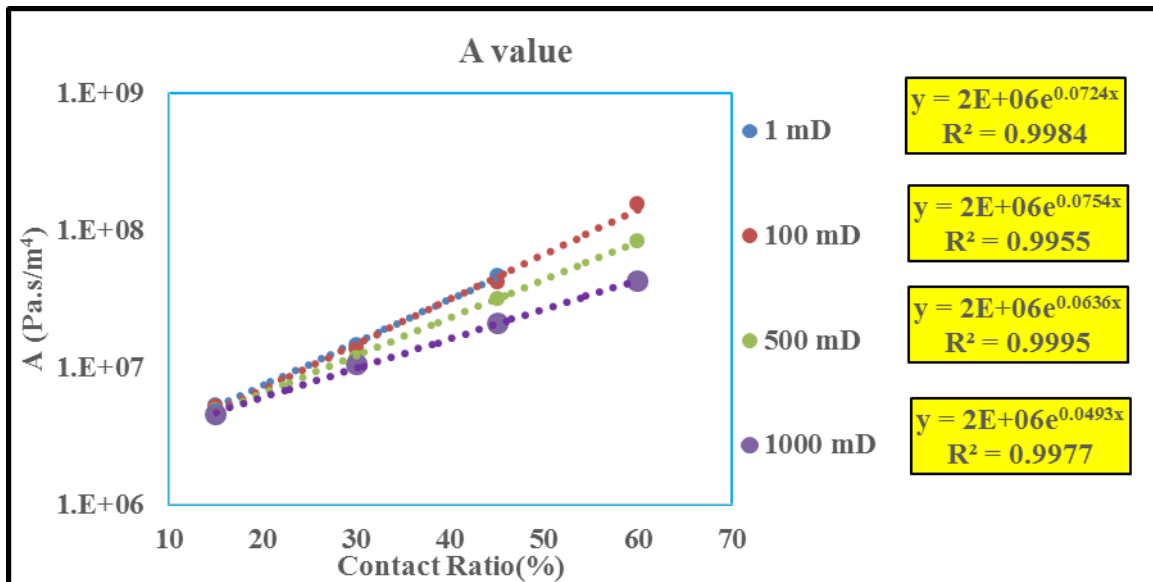
تأثیرگذار است، به طوری که تنها با تغییر مقدار تراوایی از ۱ میلی‌داریسی به ۱۰۰ میلی‌داریسی ضرایب رابطه فورچمیر به شدت تغییر می‌کنند. به عبارتی ماتریکس اطراف درزه (حتی در فاصله ناچیز از درزه) عملکرد بسیار تأثیرگذاری بر رفتار سیال درون درزه دارد. این مهم نشان می‌دهد که لحاظ نمودن درزه به صورت منفرد و عدم تأثیر متقابل آن نسبت به محیط اطراف باعث ایجاد خطاهای بسیار زیادی بر محاسبات می‌شود.



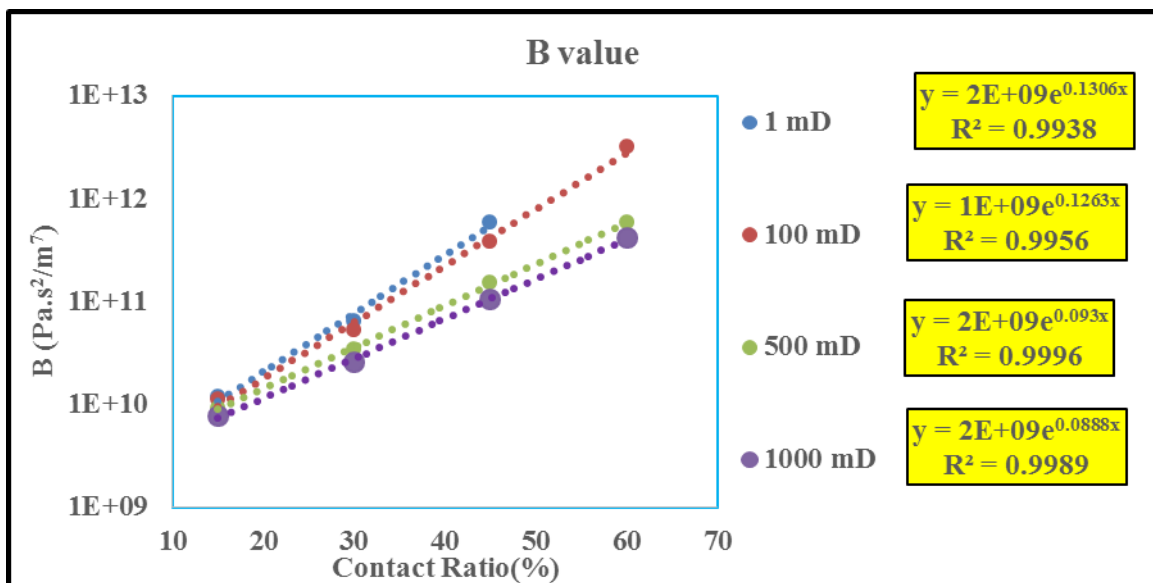
شکل (۴-۳۸) تغییرات ضریب A برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-1.



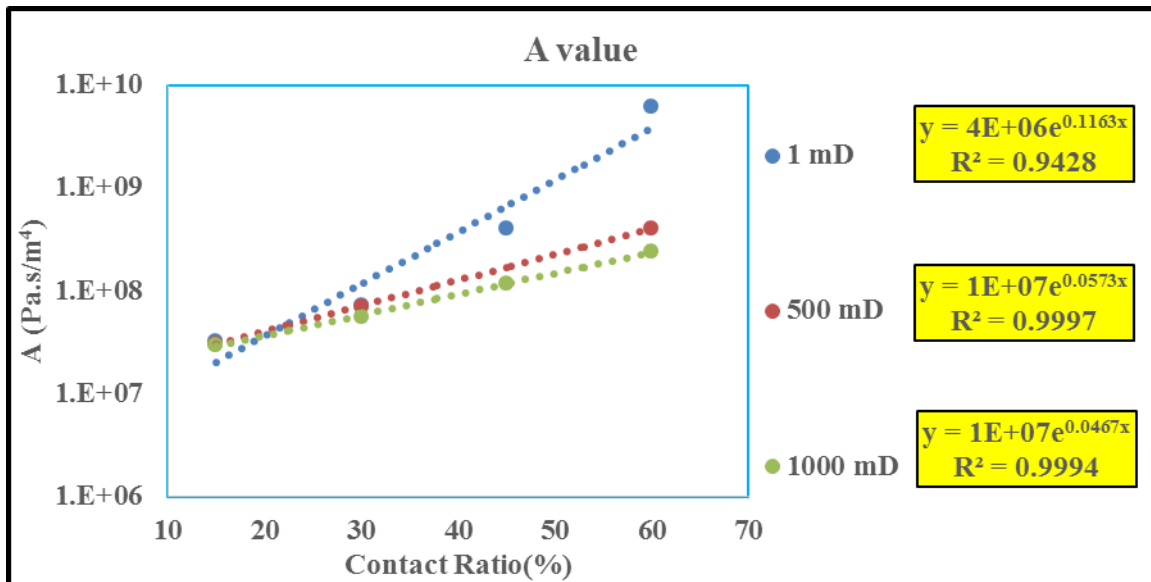
شکل (۴-۳۹) تغییرات ضریب B برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-1.



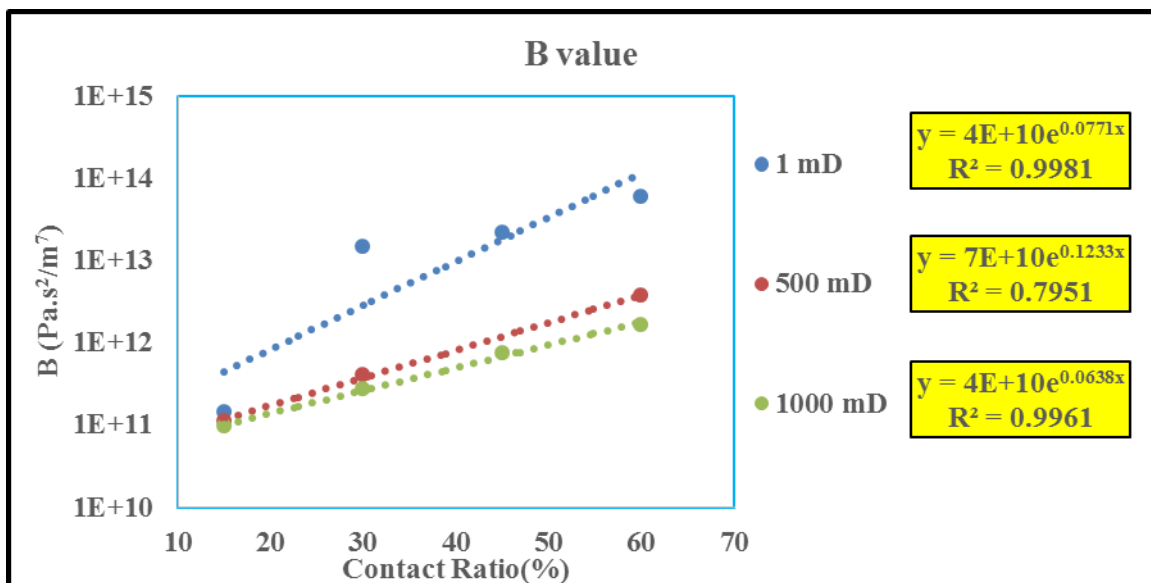
شکل (۴-۴) تغییرات ضریب A بر حسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-2.



شکل (۴-۴) تغییرات ضریب B بر حسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-2.



شکل (۴-۴۲) تغییرات ضریب A برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-3.

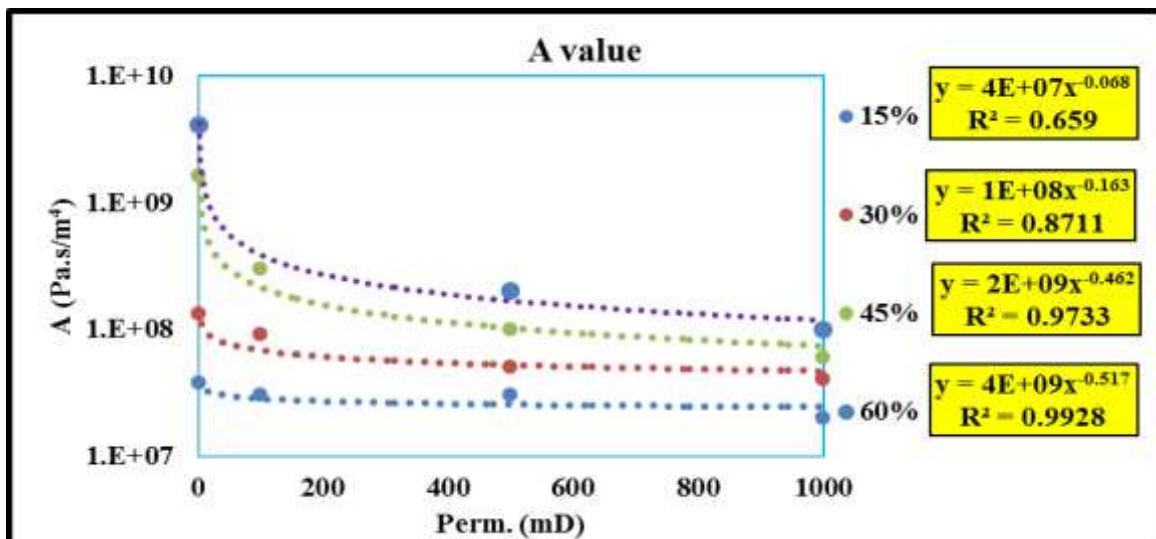


شکل (۴-۴۳) تغییرات ضریب B برحسب درصد اتصال در مقادیر مختلف تراوایی ماتریکس برای نمونه S2-3.

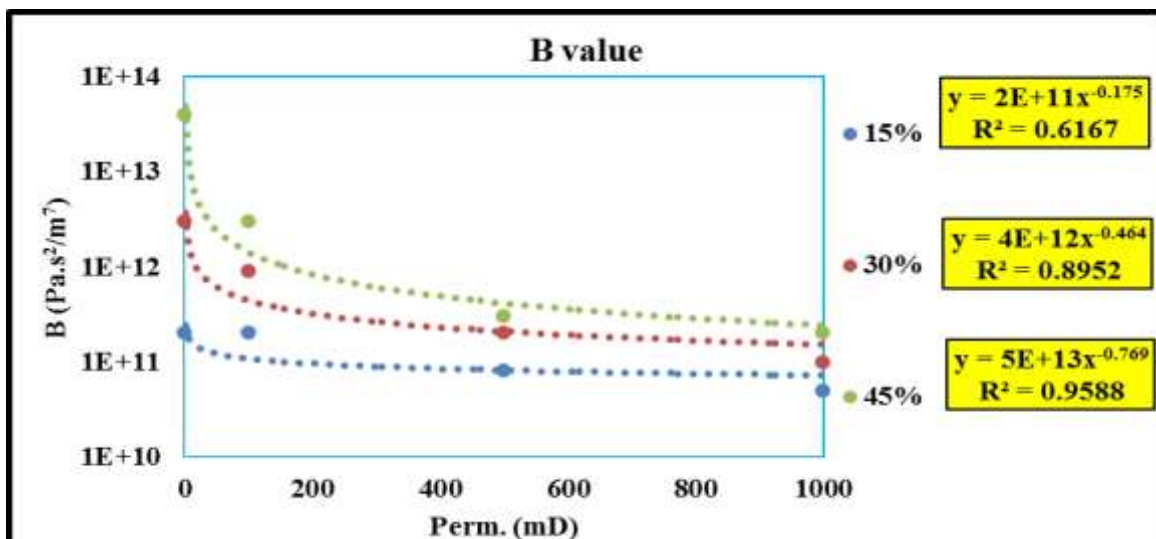
همچنین مشخص است که با افزایش تراوایی جانبی مقدار رشد ضرایب A و B به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. تغییر ضرایب A و B عمدتاً مرتبط به مقدار زبری ارتباط داده می‌شود که این موضوع نشان داد تراوایی جانبی ماتریکس نیز نقش مهمی ایفا می‌کند.

۴-۵-۴- بررسی تغییرات ضرایب رابطه فورچمیر در ارتباط با تراوایی محیط جانبی درزه

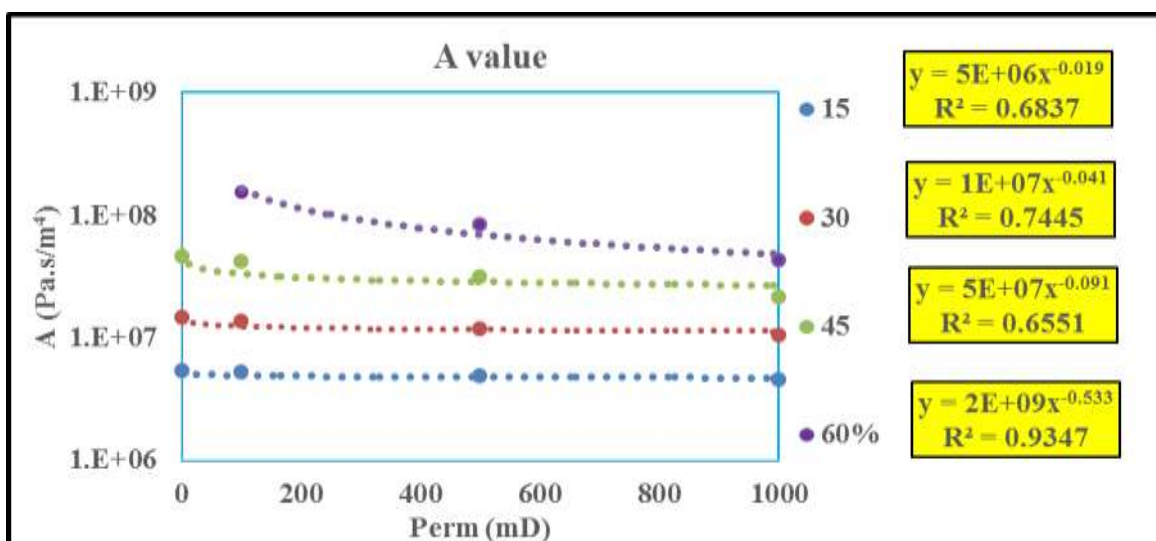
طبق تصاویر بخش قبلی اثر درصد اتصال درزه بر رفتار سیال به خوبی نشان داده شد. در این بخش به منظور تعیین مقدار تأثیر تراوایی جانبی بر مقادیر ضرایب A و B در رابطه فورچمیر اطلاعات خروجی مدل‌سازی بر این مبنا دسته‌بندی شده و در شکل (۴-۴۴) تا شکل (۴-۴۹) نمایش داده شده است.



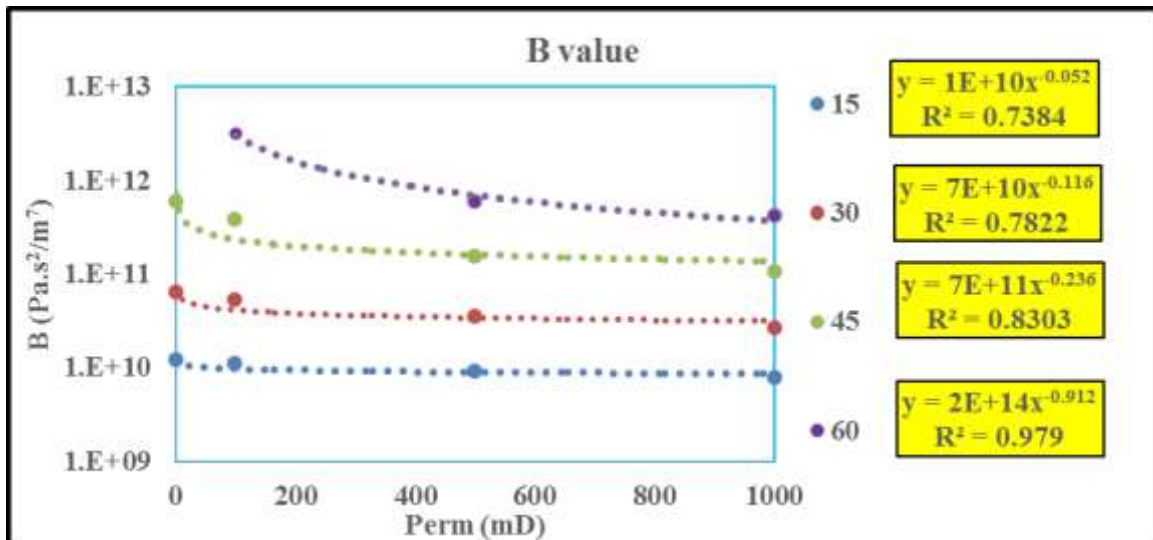
شکل (۴۴-۴) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-1.



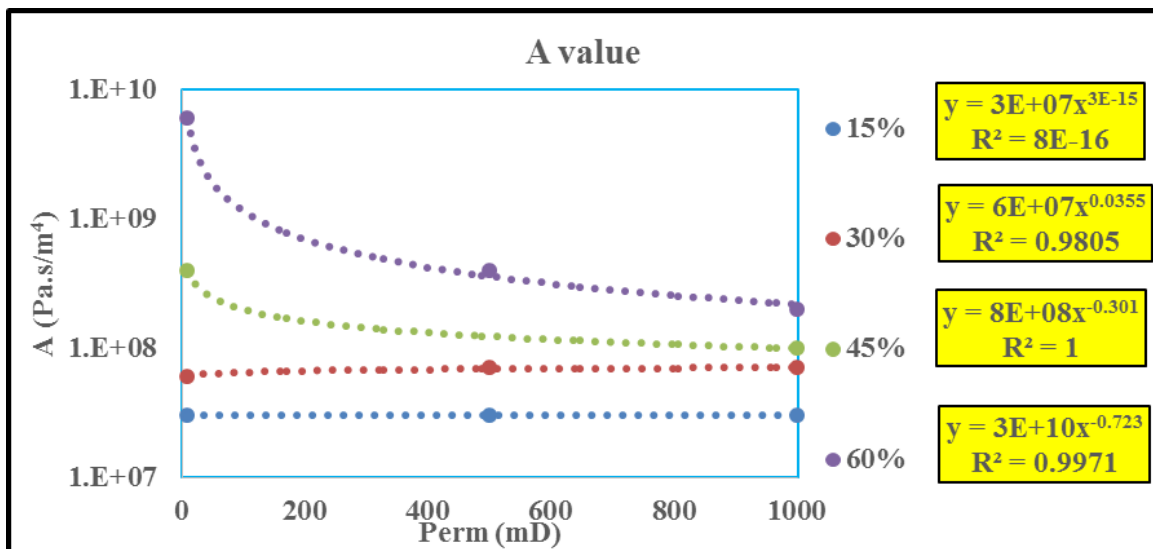
شکل (۴۵-۴) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-1.



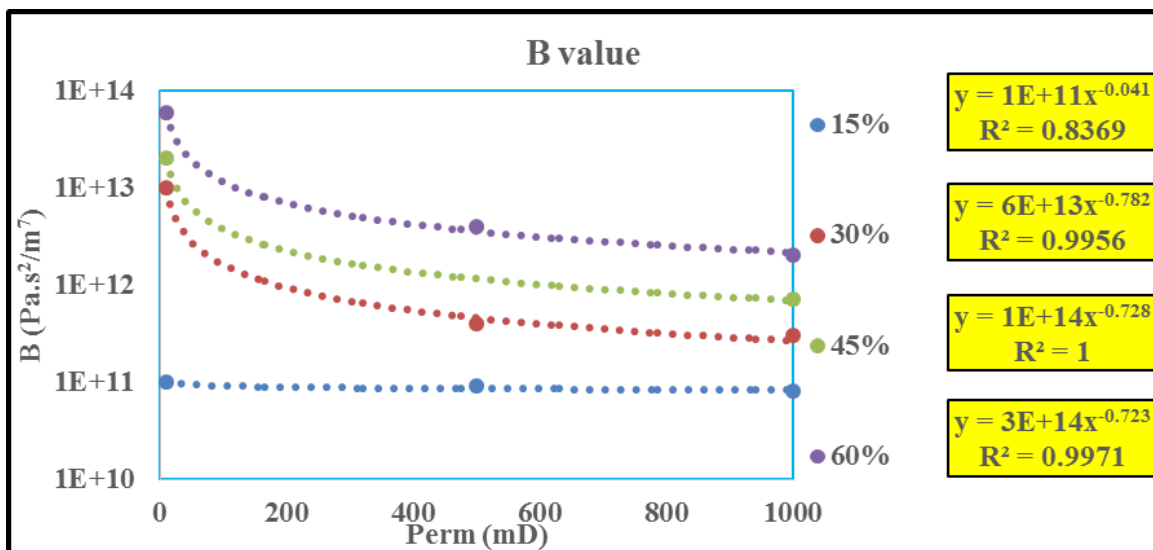
شکل (۴۶-۴) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-2.



شکل (۴۷-۴) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-2.



شکل (۴۸-۴) تغییرات ضریب A برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-3.

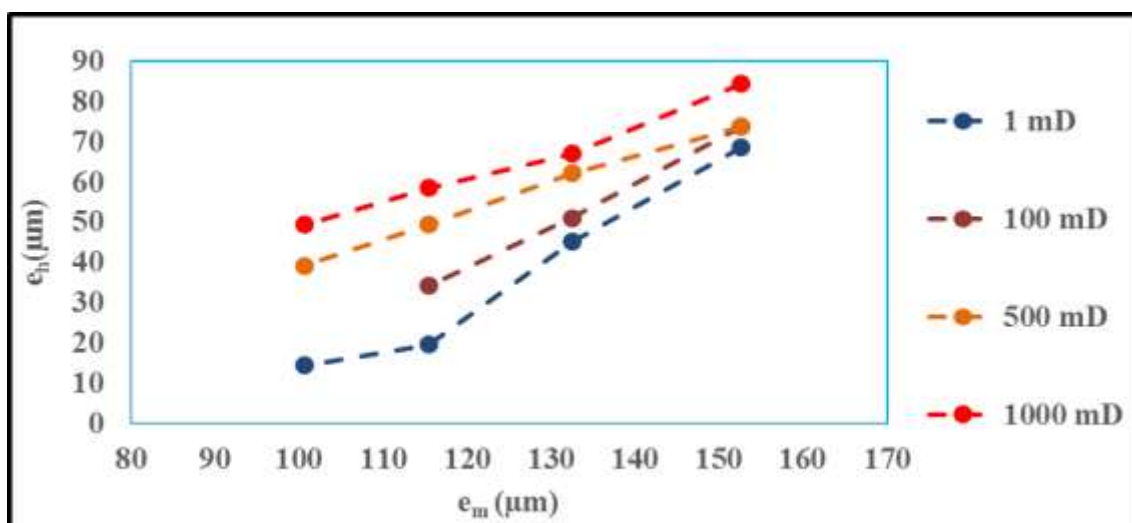


شکل (۴۹-۴) تغییرات ضریب B برحسب تراوایی ماتریکس در مقادیر مختلف درصد اتصال برای نمونه S2-3.

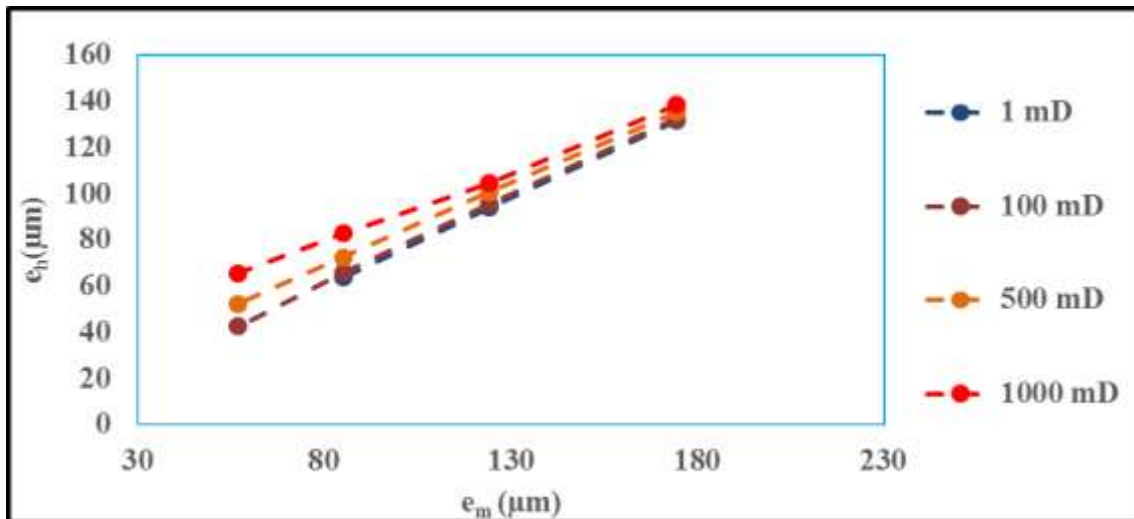
طبق این نمودارها با افزایش تراوایی مقادیر ضرایب A و B به صورت یک رابطه توانی (با ضریب همبستگی بالا) کاهش پیدا می‌کنند. این مهم در مقادیر تراوایی بالا باعث می‌شود که ضرایب به یک مقدار همگرا شوند. از طرفی طبق نمودارها مشخص است که هر چه اتصال درزه بیشتر باشد مقدار کاهش ضرایب با افزایش تراوایی بیشتر نمایان است. علت این موضوع را چنین می‌توان در نظر گرفت که با افزایش سطوح اتصال درزه و وجود فشار بالا، سیال به ناچار در مسیر خود باید از ماتریکس تراوا عبور نماید. از آنجاکه رفتار سیال در ماتریکس تراوا رفتار خطی است باعث کاهش ضریب غیرخطی معادله فورچمیر می‌شود. در رابطه با ضریب خطی این رابطه نیز چنین توضیح داده می‌شود که افزایش سطح اتصال باعث کاهش جریان عبوری از درزه می‌شود در نتیجه مقدار جریان عبوری کل از درزه کاهش یافته و این موضوع در کاهش ضریب خطی رابطه فورچمیر خود را نشان می‌دهد.

۴-۵-۵- بررسی تغییرات مقادیر بازشدگی هیدرولیکی نسبت به بازشدگی مکانیکی درزه در مجاورت ماتریکس تراوا

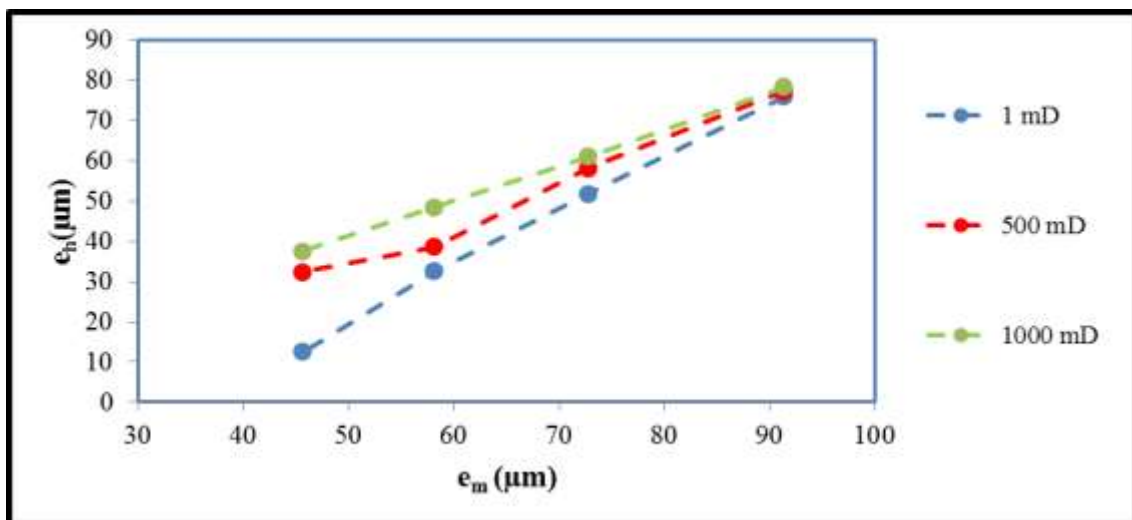
موارد بررسی شده در بخش‌های قبلی در ارتباط با رفتار سیال درون درزه زیر و عموماً به صورت بحث در خصوص مبانی موضوع می‌باشد. از آنجاکه در مدل‌سازی‌ها با نرم‌افزارهای تجاری امکان مدل‌سازی دقیق زبری درزه نمی‌باشد به منظور افزایش دقت مدل‌سازی می‌بایست رابطه‌ای تعریف شود تا اثر این موارد به صورت دقیق دیده شود. عموماً از عنوان بازشدگی هیدرولیکی در مقابل بازشدگی مکانیکی برای بیان این منظور استفاده می‌شود. با تعیین بازشدگی مکانیکی (میانگین واقعی بازشدگی سطح) و همچنین بازشدگی هیدرولیکی (طبق رابطه (۲-۱۴)) و ارتباط آنها این مهم پوشش داده می‌شود. بر این اساس طبق شکل (۴-۵۰) تا شکل (۴-۵۲) تغییرات بازشدگی هیدرولیکی نسبت به بازشدگی مکانیکی در نمونه‌های مختلف برای مقادیر تراوایی متفاوت نمایش داده شده است.



شکل (۴-۵۰) تغییرات بازشدگی هیدرولیکی برحسب بازشدگی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-1.



شکل (۴-۵۱) تغییرات بازشدهی هیدرولیکی برحسب بازشدهی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-2.

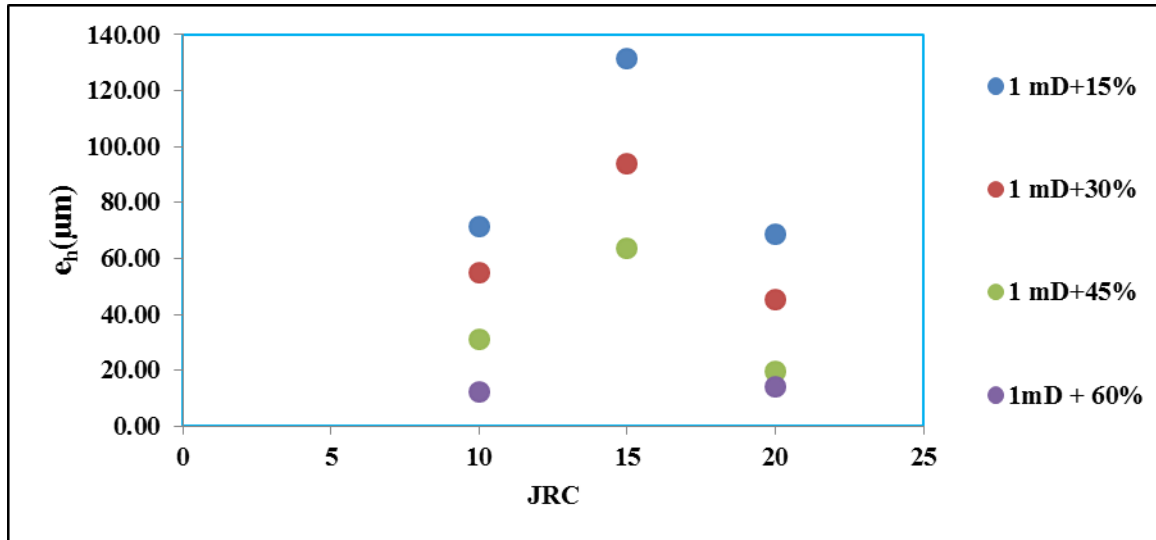


شکل (۴-۵۲) تغییرات بازشدهی هیدرولیکی برحسب بازشدهی مکانیکی در مقادیر تراوایی مختلف در نمونه S2-3.

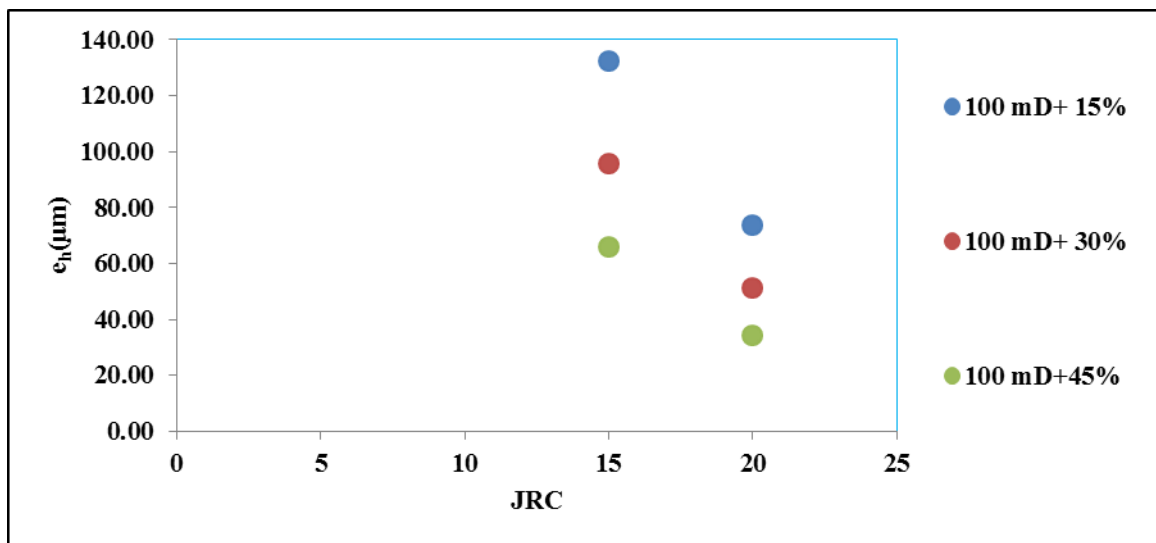
طبق نمودارهای فوق در همه مقادیر تراوایی با افزایش بازشدهی مکانیکی بازشدهی هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارها، تراوایی ماتریکس مجاور در مقدار بازشدهی هیدرولیکی بسیار تأثیرگذار است بنحوی که در یک مقدار بازشدهی مکانیکی ثابت هر چه تراوایی ماتریکس مجاور افزایش یابد مقدار بازشدهی هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. این مهم در مقادیر پایین بازشدهی مکانیکی بیشتر مشخص است. علت این موضوع نیز اثر ماتریکس در عبور جریان در مقادیر بسته‌شدهی زیاد درزه (بازشدهی مکانیکی کم) می‌باشد. با افزایش بازشدهی مکانیکی تأثیر تراوایی جانبی کمتر می‌شود به طوری که در مقادیر بازشدهی بالا اثر آن ناچیز خواهد بود.

۴-۵-۶- بررسی تغییرات بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری درزه

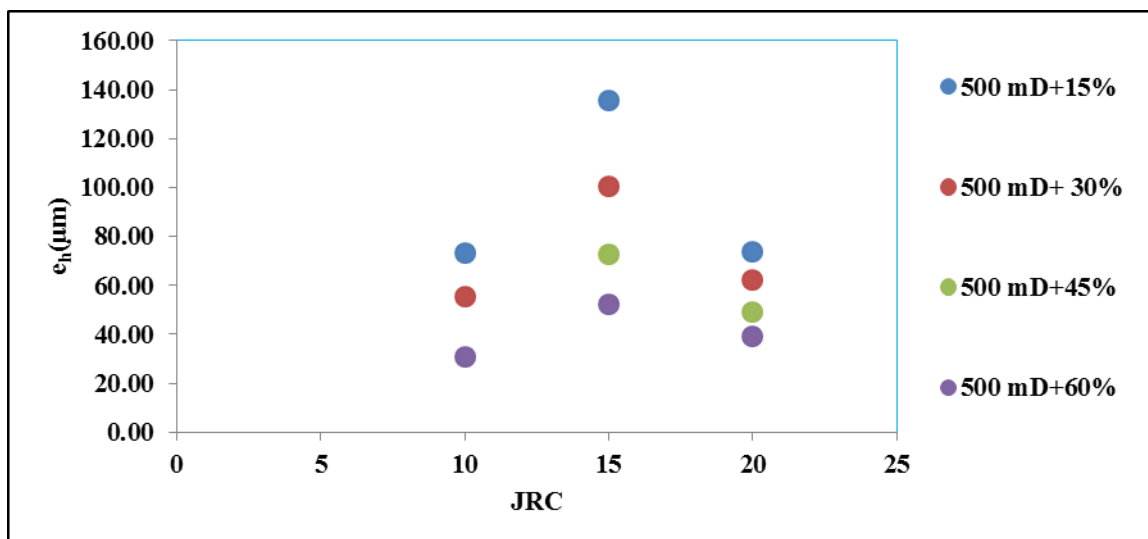
برای بررسی اثر زبری درزه بر تراوایی از فاکتور بازشدگی هیدرولیکی استفاده شده است. بر این اساس تغییرات بازشدگی هیدرولیکی برحسب زبری در مقادیر مختلف تراوایی جانبی طبق شکل (۴-۵۳) تا شکل (۴-۶۰) نمایش داده شده است.



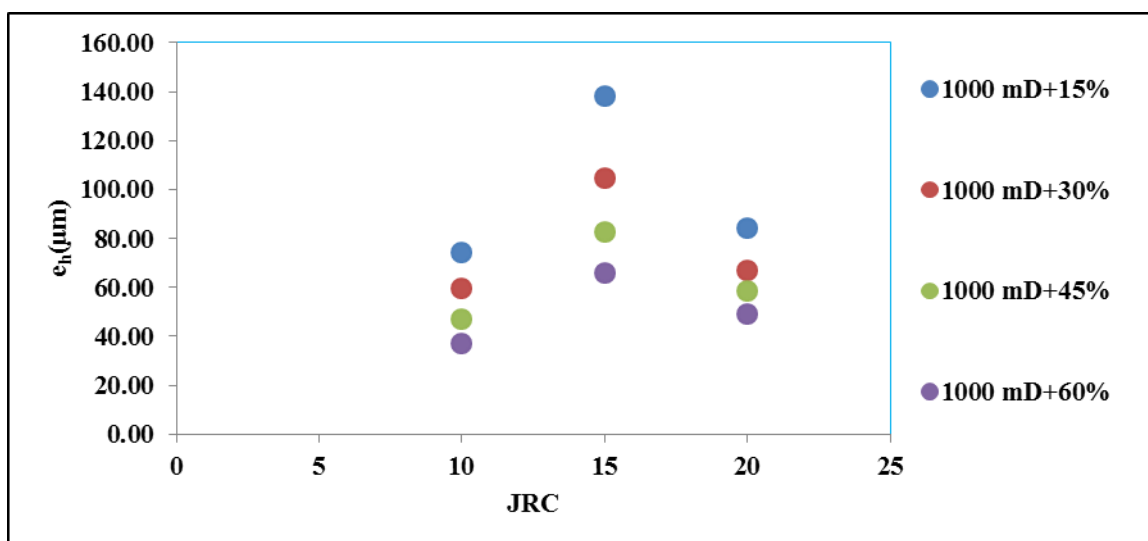
شکل (۴-۵۳) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱ میلی‌داریسی.



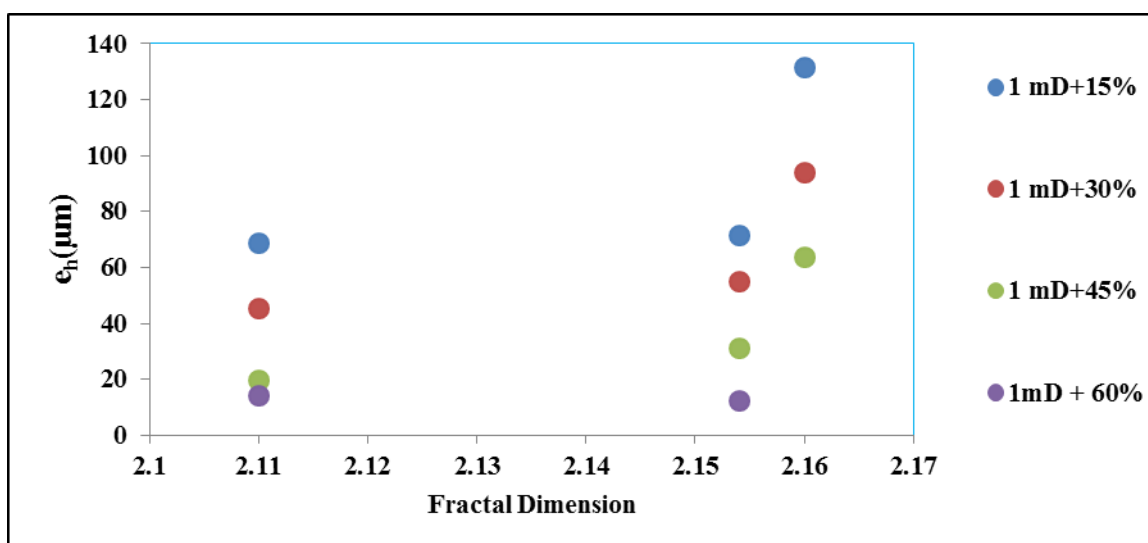
شکل (۴-۵۴) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰ میلی‌داریسی.



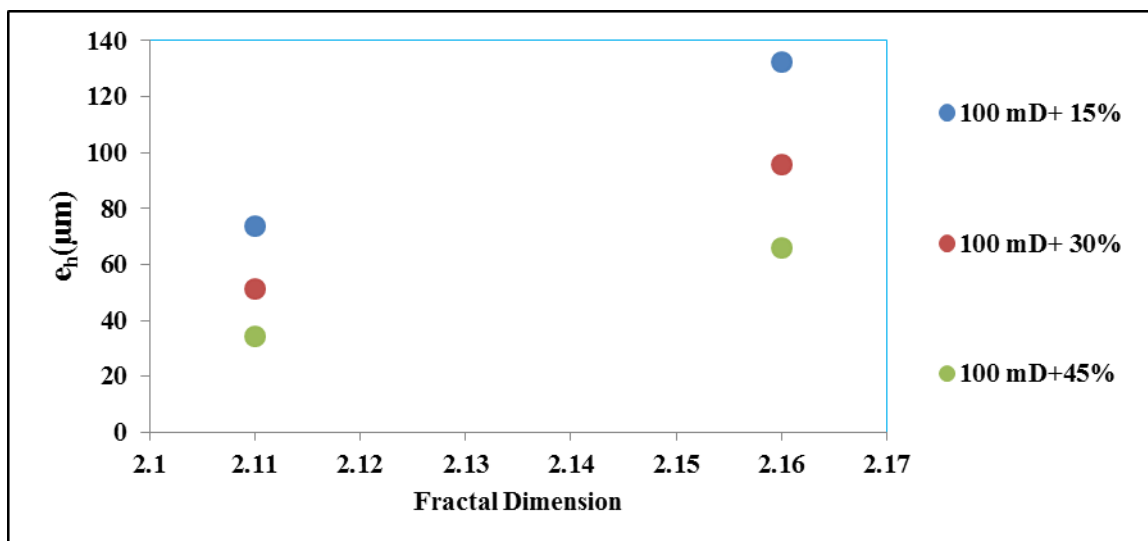
شکل (۴-۵۵) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۵۰۰ میلی‌داری.



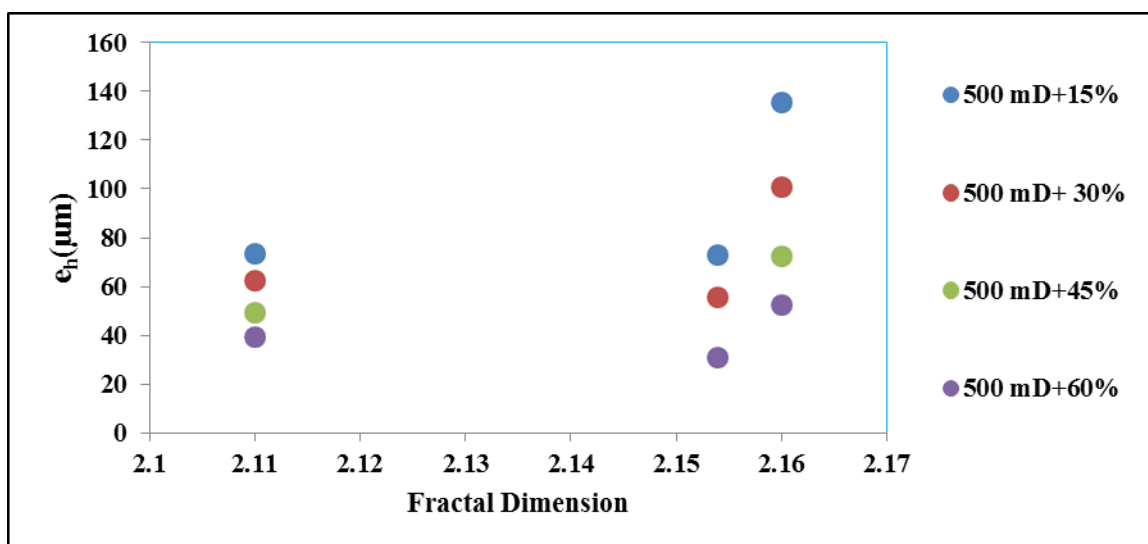
شکل (۴-۵۶) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری JRC در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰۰ میلی‌داری.



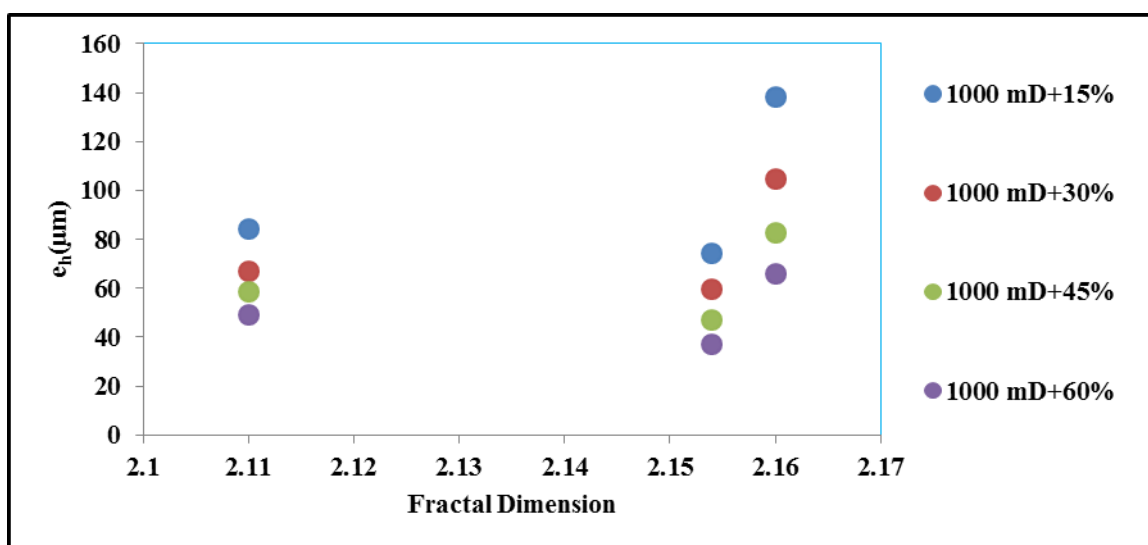
شکل (۴-۵۷) بازشدگی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدگی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱ میلی‌داری.



شکل (۴-۵۸) بازشدهی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدهی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰ میلی‌داریسی.



شکل (۴-۵۹) بازشدهی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدهی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۵۰۰ میلی‌داریسی.



شکل (۴-۶۰) بازشدهی هیدرولیکی نسبت به زبری فراکتال در بازشدهی‌های مختلف و تراوایی ماتریکس ۱۰۰۰ میلی‌داریسی.

طبق نمودارهای ارائه شده مقدار بازشدگی هیدرولیکی در ارتباط با JRC یک روند افزایشی و سپس کاهش نشان می‌دهد. این موضوع برای تمام مقادیر تراوایی جانبی و مقدار بازشدگی درزه وجود دارد. از آنجاکه پارامتر Z_2 نیز تابعی از JRC است از ارائه نمودار مربوطه به سبب جلوگیری از تکرار پرهیز شده است. در ارتباط با تغییرات بازشدگی هیدرولیکی نسبت به بعد فراکتال مشخص است که با افزایش بعد فراکتال ابتدا روند کاهش سپس افزایش بازشدگی هیدرولیکی وجود دارد. اما نکته قابل توجه روند افزایشی سریع بازشدگی با افزایش مقدار ناچیز در بعد فراکتال می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های تعداد نمونه‌ها و بالتبع آن تعداد درزه‌ها، مشاهده می‌شود که نتیجه‌گیری مشخصی از روند تغییرات بازشدگی هیدرولیکی نسبت به پارامترهای زبری حاصل نشده است.

۴-۶- جمع‌بندی

در این فصل به تفصیل نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی شرح داده شد. به طور کلی می‌توان بیان نمود که مقدار تراوایی جانبی، اتصال درزه و زبری درزه در شکستگی‌ها اثر مهمی بر رفتار سیال درون شکستگی دارند. تأثیر فاکتورهای عنوان شده به صورت یکجا می‌تواند در بازشدگی هیدرولیکی هر نمونه خلاصه شود. با تعیین بازشدگی هیدرولیکی هر زبری می‌توان رفتار سیال را با دقت مناسبی مدل‌سازی نموده و از پیچیدگی‌های مدل‌سازی دقیق درزه‌رهایی یافت. نکته‌ی مهم دیگر، تغییر تراوایی جانبی بر اثر تغییر تنش‌های محیطی است که به این مهم در ابتدای فصل پرداخته شد. با توجه به اینکه از سه نمونه موجود، تنها نتایج یک آزمایش رفتار تغییرات تراوایی را با دقت مناسب نشان داده‌است و از آنجاکه هر سه نمونه مربوط به یک مخزن هستند از نتایج این نمونه (نمونه S2-2 مطابق شکل (۴-۵)) برای مدل‌سازی تغییرات تراوایی برحسب تنش جانبی استفاده می‌شود.

به منظور جمع‌بندی نتایج حاصل از مدل‌سازی درزه و استفاده از آنها در فصل بعد، از تغییرات بازشدگی هیدرولیکی بر حسب بازشدگی مکانیکی نمونه‌های سری دوم استفاده شده است.

به طور خلاصه به عنوان ورودی نرم‌افزار مدل‌سازی چاه (ارائه شده در فصل ۵)، معیار تغییرات تراوایی ماتریکس نمودار شکل (۴-۵) می‌باشد.

فصل ۵

مدل سازی توامان هیدرومکانیک چاه های

منتخب

در این فصل به منظور بررسی رفتار سیال در محیط اطراف چاه از مدل‌سازی توامان هیدرومکانیکی استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی محیط اطراف چاه شامل ماتریکس متخلخل و تراوا و دسته درزه‌های زبر هستند. همچنین شرایط اولیه تنش همه جانبه برجا و فشار منفذی در نظر گرفته شده است. از آنجا که نمونه‌های سری دوم آزمایشگاهی استفاده در فصل ۳ و ۴، از نمونه‌های تهیه شده از چاه‌های منتخب می‌باشد، می‌توان فرض نمود که اختلاف زیادی بین شرایط سنگ واقعی و مدل‌سازی شده وجود ندارد. در این بررسی رفتار سیال درون محیط متخلخل از رابطه داری تبعیت می‌کند. همچنین رفتار سیال درون درزه و شکاف از رابطه مکعب شبیه‌سازی شده است. با فرض اینکه مقدار بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی برابر نمی‌باشد، طبق نمودار ارائه شده در فصل قبل، به صورت لحظه‌ای و در طول زمان حل مدل، مقدار بازشدگی هیدرولیکی برحسب بازشدگی مکانیکی تعیین می‌گردد. به منظور مدل‌سازی رفتار تراوایی دوگانه از مدل Leak off در نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است.

۵-۲- معرفی چاه‌های مورد بررسی

چاه‌های مدل‌سازی شده در این تحقیق هر دو از میدان کرنج در سازند آسماری در منطقه جنوب کشور می‌باشند. با توجه به مسائل محرمانگی و الزام شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب که حامی صنعتی این تحقیق می‌باشد، ارائه مشخصات دقیق چاه‌ها امکان‌پذیر نیست. بر این اساس تنها به ارائه مشخصات کلی مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته می‌شود.

در رابطه با چاه شماره ۱، از نظر زمین‌شناسی در عمقی که نفت تولید می‌شود، جنس زمین عمدتاً از آهک خالص، آهک دولومیتی و دولومیت آهکی تشکیل شده است که دارای توسعه تخلخلی خوب (۸ تا ۱۵ درصد) و در بخش انتهایی آن هم ضعیف و متراکم (تخلخل برابر ۰/۰۶ تا ۳ درصد) می‌باشد. در تمامی فواصل بررسی شده نفت با درصد اشباع آب نسبتاً پایین همراه است. از نظر شکستگی‌های موجود در عمق مورد نظر عموماً دارای شکستگی‌های باز با فاصله‌داری ۲/۵ متر می‌باشند. عمق برداشت در این چاه ۳۰۰۰ متر است.

در چاه شماره ۲ بر اساس نتایج مطالعات پتروگرافی سازند مربوطه در محدوده برداشت، سازند آسماری است. جنس سنگ از آهک خالص، آهک دولومیتی و دولومیت آهکی به همراه درصد جزئی و پراکنده رس و کربنات شیلی تشکیل شده است. از توسعه تخلخلی متوسط تا کم و ندرتاً متراکم (بین ۱ تا ۱۲ درصد) برخوردار می‌باشد. در محیط متخلخل معمولاً نفت همراه با اشباع آب نسبتاً بالا می‌باشد. بر

اساس نتایج نمودارهای تصویری فاصله درزه و شکستگی‌ها در این چاه به طور متوسط ۰/۵ متر است و از نظر بازشدگی درزه‌ها، مقدار بازشدگی کم است. عمق برداشت در این چاه حدود ۲۵۰۰ متر می‌باشد.

۳-۵- محاسبه بازشدگی هیدرولیکی در مدل‌سازی

از آنجاکه نمونه‌های استفاده شده در مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی از نمونه‌های تهیه شده از سازند چاه‌های منتخب می‌باشد، خروجی مطالعات ارائه شده در فصل‌های قبل برای این مخزن قابل استفاده است. همانطور که پیش‌تر بیان شد رفتار سیال در مخزن، رفتار تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه است که در این فصل به مدل‌سازی آن پرداخته می‌شود. وضعیت اولیه محیط اطراف هر چاه با استفاده از اطلاعات مخزن ساخته می‌شود. این مقادیر برای هر چاه به صورت دقیق در بخش مربوطه ارائه خواهد شد. پس از ساخت شرایط اولیه، مدل‌سازی شرایط حفاری و شروع برداشت از چاه با لحاظ رفتار توامان هیدرومکانیکی شبیه‌سازی می‌گردد. رفتار سیال درون درزه محصور با محیط تراوا از رابطه مکعب تبعیت می‌کند. با این تفاوت که مقدار بازشدگی هیدرولیکی با بازشدگی مکانیکی برابر نمی‌باشد و مقدار بازشدگی هیدرولیکی که عامل عبور جریان در درزه است از نمودار **Error! Reference source not found.** برحسب بازشدگی مکانیکی تعیین می‌شود. همچنین با لحاظ مدل Leak Off امکان تبادل جریان بین درزه و ماتریکس فراهم می‌باشد که معادل رفتار تراوایی دوگانه است. تغییرات تراوایی ماتریکس نیز از شکل (۴-۵) تبعیت می‌کند. بر این اساس ارتباط بین بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی طبق رابطه (۵-۱) و ارتباط بین تراوایی ماتریکس و تنش موثر جانبی از رابطه (۵-۲) در مدل‌سازی لحاظ می‌شود.

$$e_h = 0.8845e_m - 16.35 \quad (1-5)$$

$$\log k = -0.3178 * P - 13.00 \quad (2-5)$$

که e_h و e_m به ترتیب برابر بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی و k تراوایی ماتریکس و P تنش موثر جانبی است.

در این تحقیق اثر سرعت تخلیه مخزن بر تراوایی اطراف چاه با لحاظ رفتار تراوایی دوگانه بررسی شده است. در سه مقدار فشار داخلی چاه (فشار بهره‌برداری) این مدل‌سازی انجام می‌شود. این مقادیر برابر ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ مگاپاسکال می‌باشند.

۴-۵- نحوه مدل سازی چاه

به منظور مدل سازی چاه کلیه مشخصات محیط اطراف چاه اعم از مشخصات مکانیک سنگی ماده سنگ، مشخصات درزه ها و سیال تعیین شده و براساس آن هندسه مدل و شرایط اولیه تهیه شده است. مشخصات مکانیک سنگی ماده سنگ با استفاده از نتایج مدل ژئومکانیکی یک بعدی تعیین و تخصیص داده می شود. خصوصیات درزه ها نیز با استفاده از نتایج بررسی نگاره های تصویری تعیین و به مدل اعمال شده است. مدل رفتاری ماده سنگ مدل موهر کولمب می باشد همچنین برای رفتار مکانیکی درزه مدل کولمب فرض شده است.

۴-۵-۱- ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی

مدل ژئومکانیکی زمین روشی برای نمایش و بررسی شرایط تنش و خصوصیات مکانیکی زمین اطراف چاه می باشد. گام اول در هر تحلیل ژئومکانیکی ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی برای سازند مورد نظر می باشد. از مقایسه و تفسیر مدل مکانیکی زمین با اطلاعات آزمایش های انجام شده بر مغزه ها و ارتباط آن با شرایط تنش، می توان فشار ریزش^۱ و فشار شکست^۲ سازند را پیش بینی کرد (Afsari, et al., 2009).

برای ساخت مدل ژئومکانیکی از داده های متنوعی مانند نگاره های چاه، گزارش حفاری، نتایج آزمایش های آزمایشگاهی روی مغزه ها و غیره استفاده می شود. با تطبیق اطلاعات حاصل از نگاره های چاه پیمایی و لحاظ معادلات حاکم (مانند معیار شکست موهر کولمب و موگی کولمب) و همچنین روابط تجربی مقادیر پارامترهای مکانیک سنگ تخمین زده می شود. از آنجاکه هدف این تحقیق نحوه و چگونگی محاسبات مربوط به مدل سازی تک بعدی نمی باشد، نظر به حجم بالای محاسبات و روابط مربوطه از ارائه آنها صرف نظر شده است و تنها در بخش مدل سازی عددی از نتایج آنها استفاده می شود.

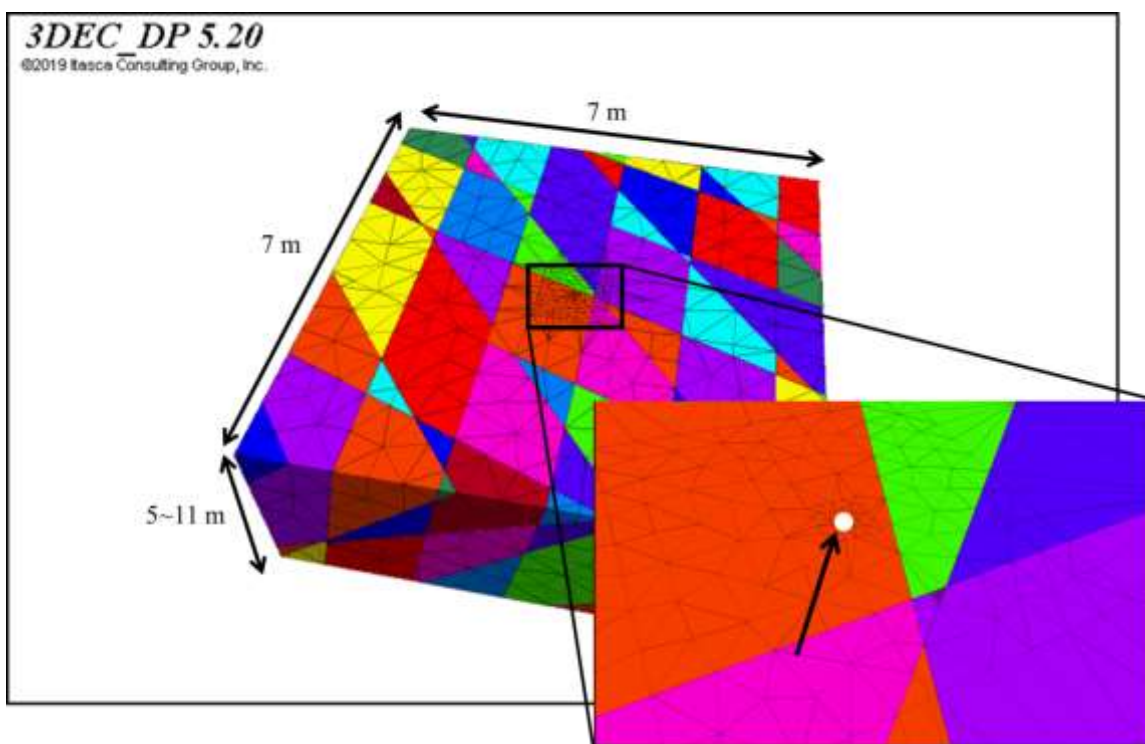
۴-۵-۲- ساخت مدل عددی سه بعدی

در ساخت مدل عددی سه بعدی از نرم افزار 3DEC نسخه ۵.۲ استفاده شده است. از آنجاکه رفتار Leak-off مورد نظر این تحقیق می باشد، از رفتار هیدرومکانیک کامل استفاده می شود. بر این اساس زمان حل مدل بسته به ابعاد مورد نظر مدل افزایش می یابد. با توجه به محدودیت های سخت افزاری و زمان انجام، ابعاد مدل به یک مقدار مشخص محدود شده است. ابعاد لحاظ شده برای مدل ها به ترتیب ۷*۷*۵ مترمکعب برای مدل اول و ۷*۷*۱۱ متر مکعب (طول*عرض*ارتفاع) برای مدل دوم لحاظ شده است. دلیل انتخاب این ابعاد را چنین می توان بیان کرد که از نظر مکانیکی حفر چاهی با قطر حدود ۱۵

1- Breakout Pressure

2- Breakdown Pressure

سانتی‌متر در محیطی به ابعاد ۷*۷ به اندازه کافی کوچک می‌باشد که مرزها بر آن تأثیرگذار نباشد (فاصله دیواره چاه تا مرز مدل حدود ۴۷ برابر قطر می‌باشد). دلیل انتخاب ارتفاع مدل برابر ۵ و ۱۱ متر محدوده زون برداشت از مخزن می‌باشد که در هر چاه متفاوت است. از نظر هیدرولیکی بسته به مقدار زمان تخلیه چاه، شعاع تأثیر افزایش می‌یابد. در نتیجه برای مدل‌سازی واقعی یک چاه در یک مخزن در زمان‌های بسیار زیاد، ابعادی در حدود ابعاد مخزن می‌بایست مدل‌سازی شود. همانطور که بیان شد به سبب مکانیزم حل مدل در نرم‌افزارهای شرکت ITASCA که مبنی بر روش لاگرانژی می‌باشد، حل مدل در گام‌های پیوسته و گام‌به‌گام انجام می‌شود این موضوع سبب زمان‌بر بودن حل مدل می‌گردد که به ناچار می‌بایست مدل‌سازی در ابعاد کوچک‌تر و برای زمان‌های محدود انجام شود و نتایج آن به کل تعمیم داده شود. بنابراین در این تحقیق تنها در زمان‌های محدود مدل‌سازی انجام شده است که در این مدت اثر کاهش فشار منفذی به مرز مدل نمی‌رسد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که انتخاب این ابعاد خللی در رفتار و نتایج هیدرومکانیکی وارد نمی‌کند.



شکل (۱-۵) هندسه کلی مدل و موقعیت چاه.

۵-۴-۳- خصوصیات مکانیکی استفاده شده در مدل

خصوصیات مکانیک سنگی مصالح و هندسی درزه‌های استفاده شده در مدل عددی که مستخرج از مدل ژئومکانیکی یک بعدی می‌باشد به شرح جدول (۱-۵) تا جدول (۵-۶) است.

مشخصات مکانیک سنگی توده سنگ چاه شماره ۱:

جدول (۱-۵) مشخصات هندسی درزه‌های محدوده چاه شماره ۱ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۱، ۱۳۹۳)

شماره	شیب (deg)	جهت شیب (deg)	فاصله داری (m)	بازشدهگی-حداکثر (m)	بازشدهگی-حداقل (m)
۱۰	۵۰	۲۳۰	۲.۵	6.00×10^{-4}	1.70×10^{-4}
۱۱	۷۷	۲۷۰	۲.۵	6.00×10^{-4}	1.70×10^{-4}
۱۲	۵۵	۲۰۰	۲.۵	6.00×10^{-4}	1.70×10^{-4}

جدول (۲-۵) مشخصات مکانیکی سنگ بکر در محدوده چاه شماره ۱ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۱، ۱۳۹۳)

ماتریکس	مدول الاستیک (Gpa)	نسبت پواسون	چگالی (Kg/m^3)	چسبندگی (Mpa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	مقاومت کششی (Mpa)
	۲۱.۴	۰.۲۹۲	۲۷۰۰	۱۴.۷	۴۰.۳	۵.۱

جدول (۳-۵) شرایط تنش اولیه در محدوده چاه شماره ۱

مقادیر اولیه	Szz		SH		Sh		PP
	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)
	۸۱	۰	۱۰۷	۱۰۵	۹۸.۹	۱۵	۲۴۸

مشخصات مکانیک سنگی توده سنگ چاه شماره ۲:

جدول (۴-۵) مشخصات هندسی درزه‌های محدوده چاه شماره ۲ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۲، ۱۳۹۳)

شماره	شیب (deg)	جهت شیب (deg)	فاصله داری (m)	بازشدهگی-حداکثر (m)	بازشدهگی-حداقل (m)
۱۰	۶۰	۲۷۵	۰.۵	1.50×10^{-4}	2.00×10^{-7}
۱۱	۶۷	۳۰۰	۰.۵	1.50×10^{-4}	2.00×10^{-7}

جدول (۵-۵) مشخصات مکانیکی سنگ بکر در محدوده چاه شماره ۲ (گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۲، ۱۳۹۳)

ماتریکس	مدول الاستیک (Gpa)	نسبت پواسون	چگالی (Kg/m^3)	چسبندگی (Mpa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	مقاومت کششی (Mpa)
	۲۱	۰.۲۸۳	۲۷۰۰	۱۸.۴	۴۱.۸	۵.۹۴

جدول (۶-۵) شرایط تنش اولیه در محدوده چاه شماره ۲

مقادیر اولیه	Szz		SH		Sh		PP
	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)	آزیموت	مقدار (MPa)
	۸۸.۳	۰	۱۰۲	۱۱۰	۹۵	۲۰	۲۴۸

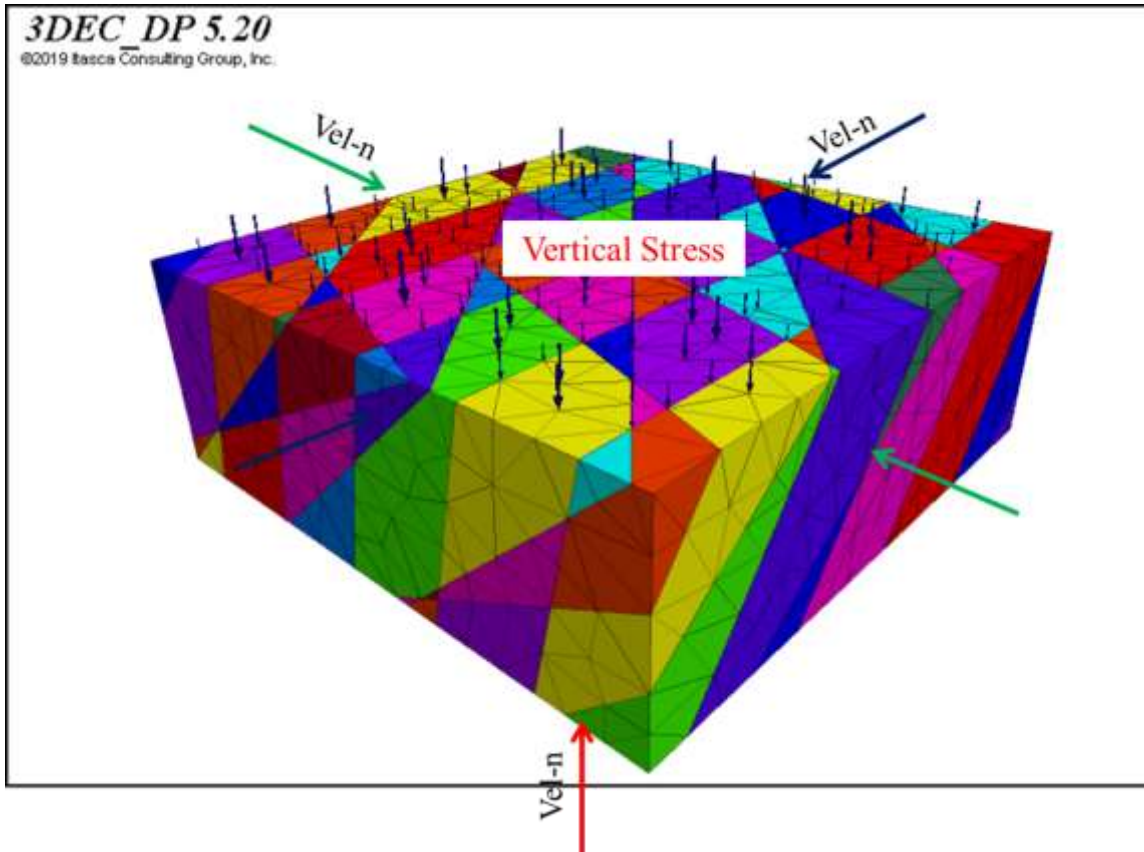
به منظور مدل‌سازی رفتار مکانیکی درزه در نرم افزار 3DEC نیاز است تا مقادیر سختی نرمال (k_n) و سختی برشی (k_s)، چسبندگی و زاویه اصطکاک برای درزه تعریف شود. به منظور تعیین این مقادیر از فرمول ارائه شده توسط پاساک و سینگ و گوئل استفاده شده است (Singh, et al., (Pathak, 2013) بر این اساس مقدار سختی نرمال و سختی برشی به ترتیب برابر $16 GPa/m$ و $1.6 GPa/m$ در نظر گرفته شده است. در رابطه با مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک این مقادیر برابر $1 MPa$ و 28 درجه در نظر گرفته شده است.

همانطور که مشخص است مشخصات مکانیکی سنگ و شرایط اولیه تنشی و فشار سیال در هر دو چاه تقریباً برابر می‌باشد که علت آن نزدیکی چاه‌ها و مخزن مشترک است. اما از نظر تعداد دسته درزه‌ها و مقدار بازشدگی تفاوت زیادی بین این دو چاه دیده می‌شود.

۵-۴-۴- شرایط مرزی

در مدل‌های عددی امکان مدل‌سازی واقعی مساله از نظر ابعادی وجود ندارد به عبارتی مدل‌سازی یک چاه درون یک مخزن با ابعاد واقعی طول و عرض و ارتفاع با توجه به محدودیت‌های زمانی و سخت‌افزاری امکان‌پذیر نیست. بر این اساس ابعاد مدل در یک طول مشخص محدود می‌شود. برای اینکه این مرزها رفتار و اثر غیرمنطقی بر رفتار کل مدل نداشته باشند شرایط آنها به نحوی تعریف می‌شود که مشابه رفتار واقعی باشد. در مدل‌های ساخته شده جایجایی‌های مکانیکی در مرزها در جهت عمود بر سطح مرزی (جهت نرمال) ثابت در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی وزن لایه‌های بالای محدوده مدل‌سازی شده، مقدار بار آن به صورت تنش بر مرز بالایی مدل اعمال شده است.

از نظر هیدرولیکی چون در رفتار تراوایی دوگانه فرض بر ذخیره کل سیال درون ماتریکس سنگ است، در نتیجه شرایط مرزی هیدرولیکی برای مدل در لحاظ نشده است. بنابراین کل سیالی که از چاه استخراج می‌شود، از ماتریکس به درزه و سپس از طریق درزه به چاه می‌رسد. همچنین امکان انتقال سیال از ماتریکس سنگ به چاه در مرز چاه وجود دارد.



شکل (۲-۵) هندسه مدل و شرایط مرزی استفاده شده در مدل‌های عددی.

۵-۴-۵- معادلات حاکم بر رفتار غیرخطی سیال

رفتار سیال در مدل عددی مورد نظر به دو نوع رفتار تقسیم‌بندی می‌شود: رفتار درون ماتریکس سنگ و رفتار درون درزه. مطابق آنچه در فصل قبل بیان شد رفتار سیال درون ماتریکس سنگ، رفتار سیال در محیط متخلخل است و رفتار سیال درون درزه از معادله مکعب تبعیت می‌کند اما باید توجه داشت که مقدار بازشدگی هیدرولیکی در هر گام حل مدل نسبت به بازشدگی مکانیکی چنان تغییر می‌کند که رفتار سیال معادل رفتار غیر خطی لحاظ شود. به منظور مدل‌سازی رفتار معادل غیرخطی جریان در نرم‌افزار 3DEC از یک کد استفاده شده است که در حین حل مدل، مقدار جابجایی هیدرولیکی هر المان درزه را برحسب جابجایی مکانیکی تعیین و به مدل اختصاص می‌دهد. بر این اساس مقدار جریان عبوری تابع رفتار غیرخطی است. از طرفی شرایط مرزی در مرز مشترک درزه و ماتریکس به نحوی تعریف شده است که بسته به فشارمنفذی درزه و ماتریکس امکان تبادل جریان از ماتریکس به درزه و بالعکس وجود دارد. در شکل (۳-۵) وضعیت فشارمنفذی اولیه مدل نمایش داده شده است.

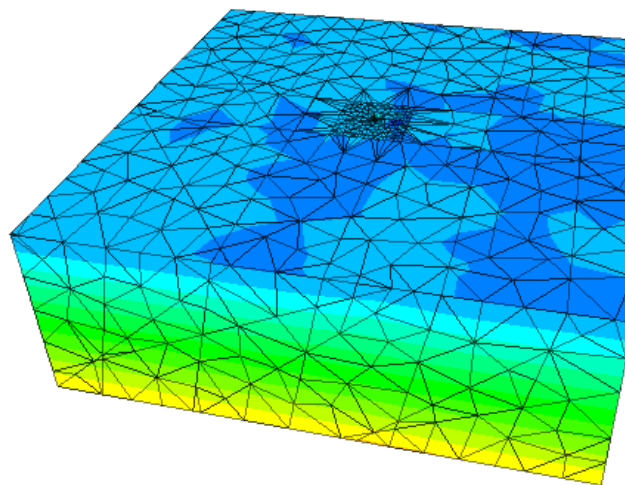
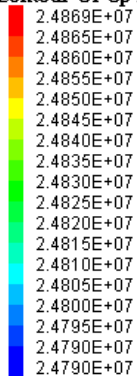
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 2383

1/8/2021 6:13:23 PM

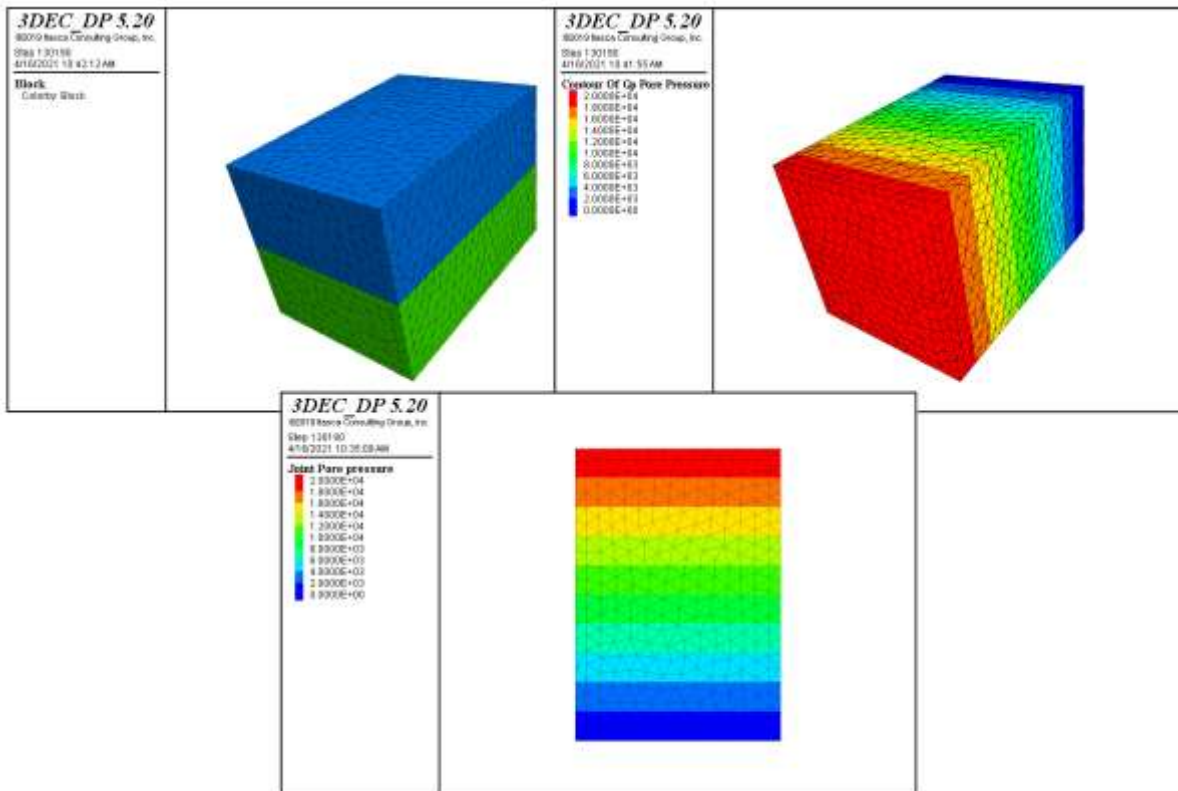
Contour Of Gp Pore Pressure



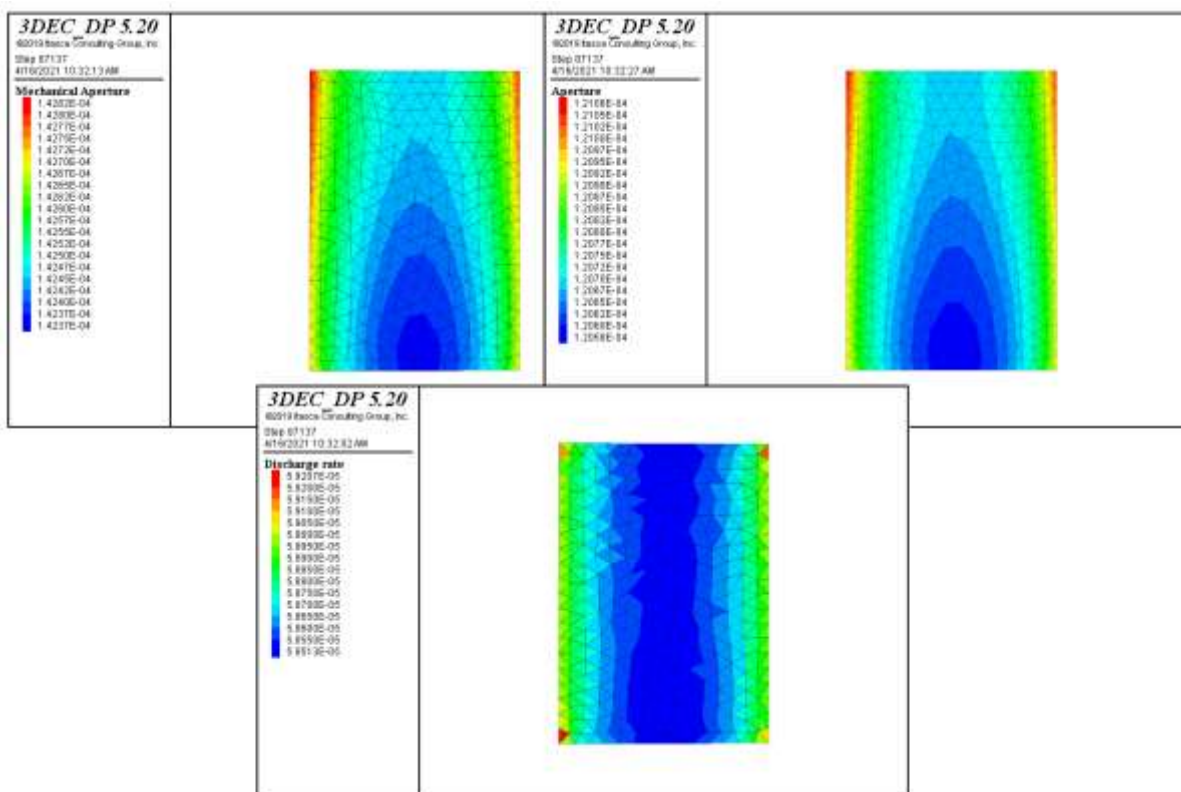
شکل (۳-۵) وضعیت فشارمنفذی سیال.

۵-۴-۶- صحت سنجی کد معادل کننده رفتار غیر خطی سیال

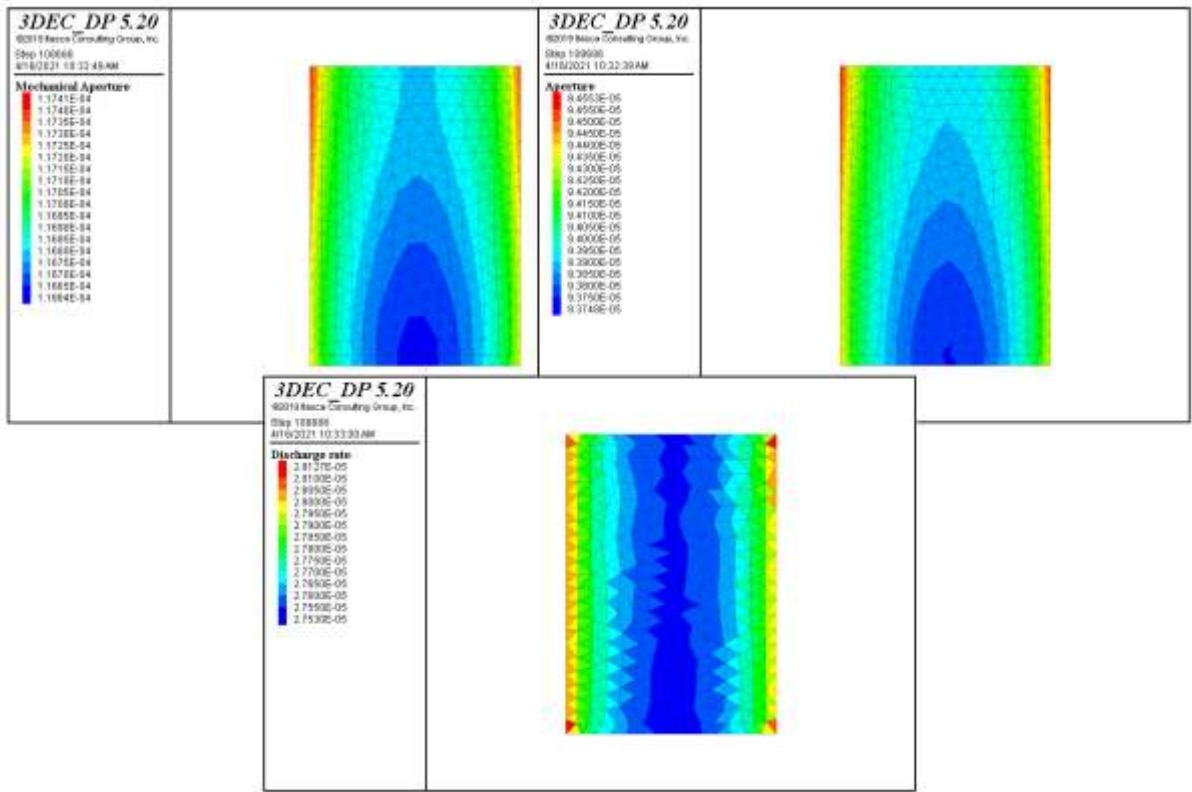
به منظور صحت سنجی کد معادل کننده رفتار غیر خطی سیال در نرم افزار 3DEC یک مدل عددی در مقیاس نمونه های آزمایشگاهی ساخته شده است (ابعاد $5 \times 3.5 \times 3.5$ سانتی متر مکعب) (شکل ۵-۵). در این مدل مشخصات مکانیکی درزه برابر مشخصات ارائه شده برای درزه های چاه، در نظر گرفته شده است. مقدار اختلاف فشار منفذی در دو سر درزه برابر ۲۰ و ۷۰ پاسکال می باشد. مقدار تراوایی محیط جانبی برابر ۱ میلی دارسی در نظر گرفته شده است (شبیه سازی آزمایش شکل ۴-۱۹) در نرم افزار 3DEC). با اعمال بار بر نمونه و پس از به تعادل رسیدن مدل، مقدار بازشدگی مکانیکی و هیدرولیکی معادل هر وضعیت و مقدار جریان عبوری در شکل (۵-۵) تا شکل (۷-۵) ارائه شده است. نتایج این مدلسازی ها در جدول (۷-۵) ارائه شده است.



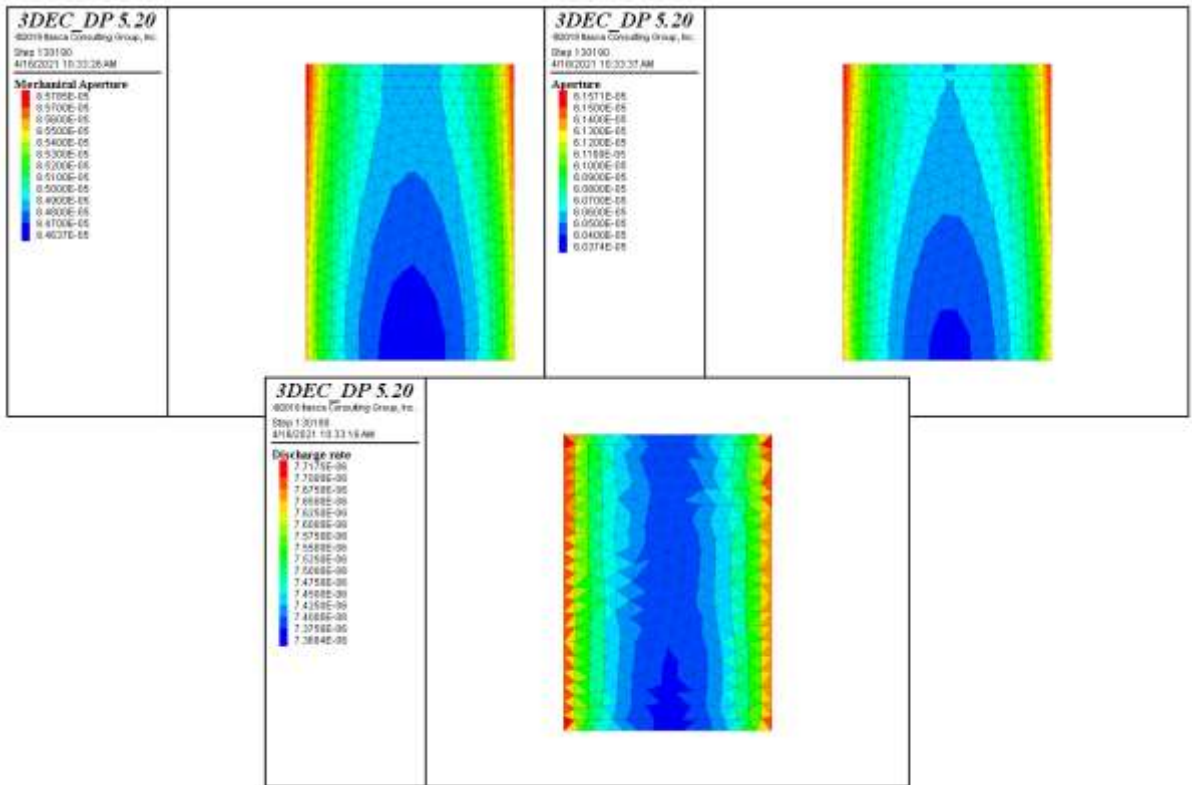
شکل (۴-۵)-هندسه و شرایط فشار منفذی در نمونه در حالت اختلاف فشار ۲۰ کیلوپاسکال.



شکل (۵-۵) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۱۵٪.



شکل (۵-۶) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۳۰٪.

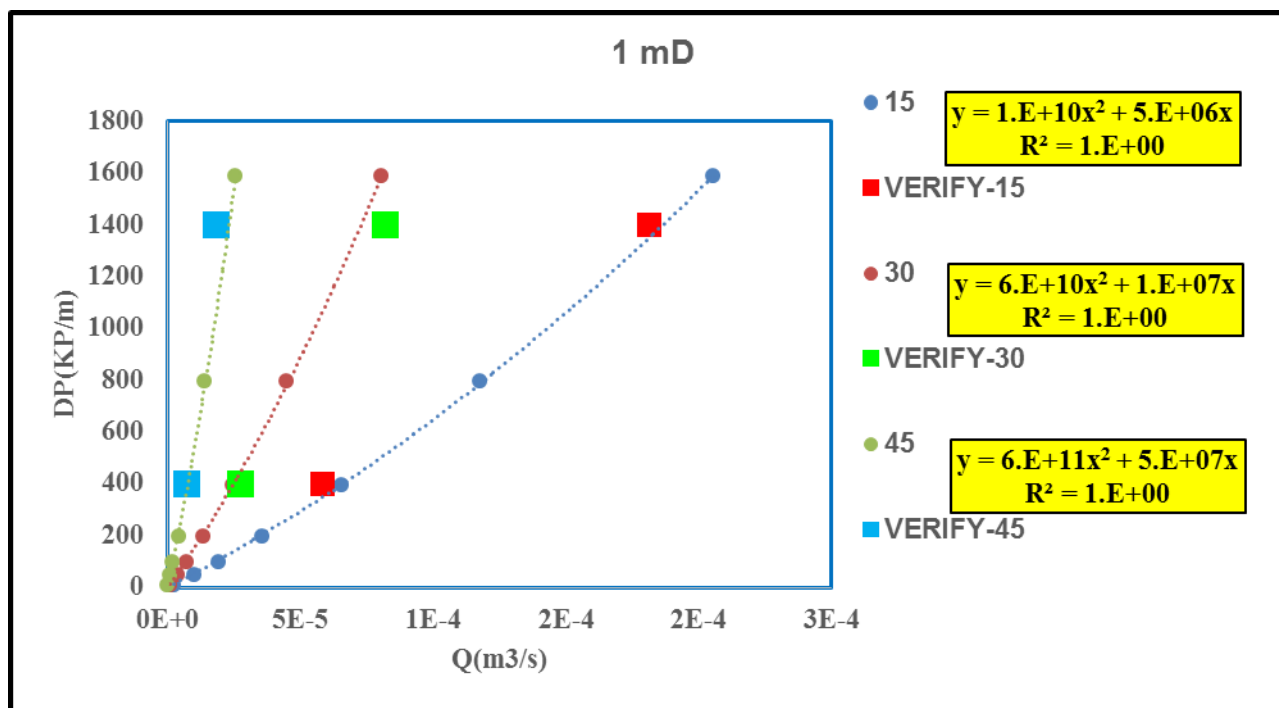


شکل (۵-۷) توزیع مقادیر بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان عبوری معادل درصد اتصال ۴۵٪.

جدول (۷-۵) مشخصات آزمایشات صحت سنجی و مقایسه با مقادیر نتایج شکل (۴-۱۹).

ردیف	DP(KPa/m)	Q(m ³ /s)	بازشدگی هیدرولیکی در 3DEC (میکرون)	بازشدگی هیدرولیکی آزمایش مینا (میکرون)	درصد اتصال آزمایش مینا	مقدار خطا در عدم تطابق سطح اتصال
۱	۴۰۰	۵.۹E-۰۵	۱۲۱	۱۳۱	۱۵٪	۸٪
۲	۱۴۰۰	۱.۹E-۰۴	۱۳۹			
۳	۴۰۰	۲.۸E-۰۵	۹۴	۹۴	۳۰٪	۰٪
۴	۱۴۰۰	۸.۲E-۰۵	۸۹			
۵	۴۰۰	۷.۵E-۰۶	۶۱	۶۴	۴۵٪	۵٪
۶	۱۴۰۰	۱.۸E-۰۵	۵۴			

در شکل (۵-۸) مقادیر ارائه شده در جدول فوق بر روی نمودارهای آزمایش شکل (۴-۱۹) ارائه شده است که نشان می دهد کد استفاده شده برای شبیه سازی رفتار سیال درون درزه ها دارای دقت منطقی و قابل قبولی می باشد.



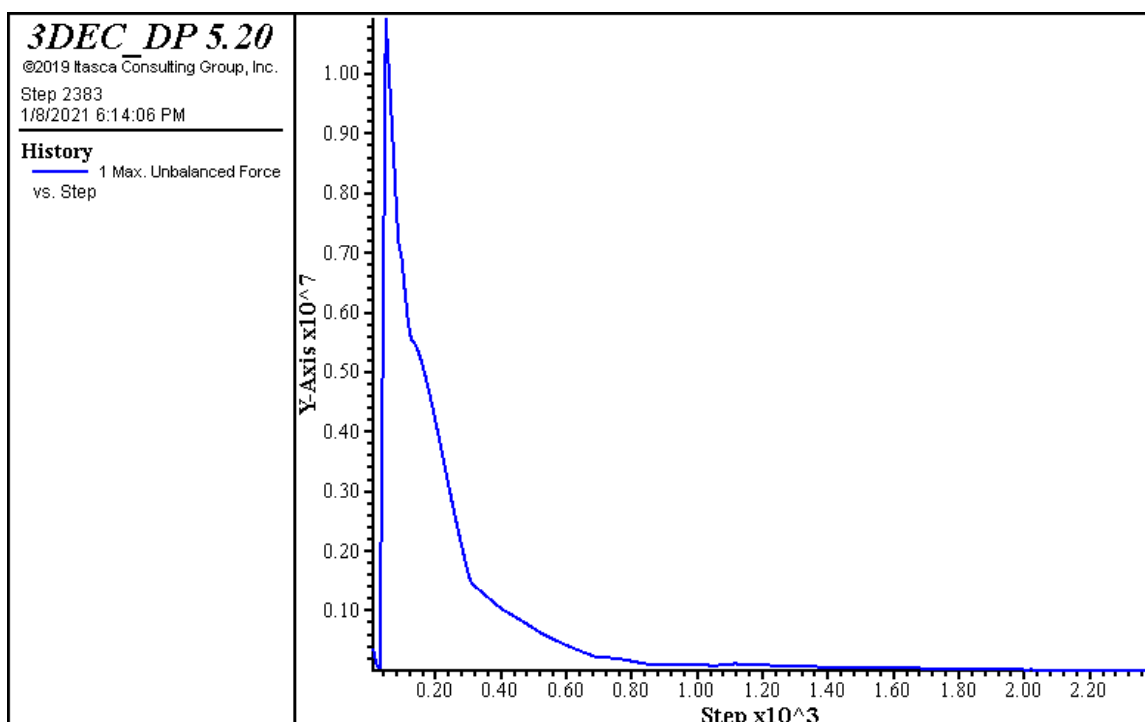
شکل (۵-۸) مقایسه نتایج مدل 3DEC با نتایج آزمایشات عددی پایه.

۷-۴-۵- پارامترهای کنترلی

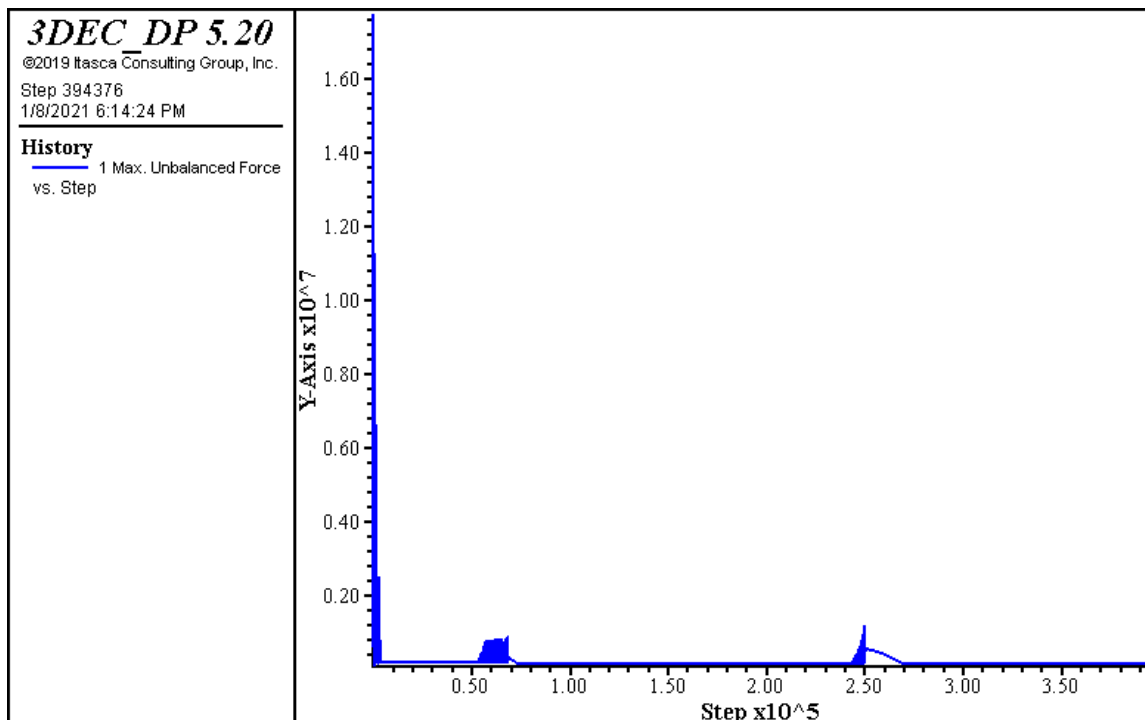
برای بررسی رفتار چاه با لحاظ مدل رفتاری تراوایی دوگانه، مقدار فشار درون چاه کمتر از مقدار فشار مخزن (سه مقدار ۲۱، ۱۸ و ۱۲ مگاپاسکال) در نظر گرفته شده است. همچنین در زمان های ۱، ۳ و ۵ ثانیه اقدام به بررسی و تحلیل مدل شده است (حل هر ثانیه مدل برابر ۱۰۰ ساعت زمان بر می باشد). توزیع فشارمنفذی درون درزه ها، مقدار بازشدگی هیدرولیکی درزه، جریان ورودی از درزه و ماتریکس به چاه،

تغییرات تراوایی ماتریکس و فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور بررسی صحت مدل در گام های مختلف مدل سازی نمودار نیروهای نامتعادل کننده بعد از ساخت مدل اولیه و زمان برداشت از چاه تهیه و طبق شکل (۵-۹) و شکل (۵-۱۰) ارائه شده است. همانطور که مشخص است مقدار نیروی نامتعادل کننده در مدل سازی همواره به مقدار حداقل خود میل نموده و مدل در شرایط اولیه و حین استخراج نفت در تعادل می باشد که صحت مدل سازی را می رساند.



شکل (۵-۹) نمودار نیروی نامتعادل کننده بعد از تعادل اولیه مدل.



شکل (۵-۱۰) نمودار نیروی نامتعادل کننده در حین تولید سیال از چاه.

۵-۵- تحلیل و بررسی نتایج

به منظور تحلیل و بررسی نتایج در هر چاه در زمان‌های مختلف نمودارهای هم‌تراز فشارمنفذی و بازشدگی هیدرولیکی نمایش داده می‌شود. همچنین به منظور بررسی دقیق در هر درزه، مقدار بازشدگی هیدرولیکی و فشارمنفذی در هر درزه به تفکیک ارائه می‌گردد.

۵-۵-۱- بررسی تغییرات هیدرومکانیکی چاه شماره ۱

در بررسی رفتار چاه با توجه به اینکه مقدارفشار داخلی چاه در حین برداشت در دسترس نبوده در سه مقدار فشار داخلی ۱۲، ۱۸ و ۲۱ مگاپاسکال (۵۰ و ۷۵ و ۹۰ درصد فشار اولیه مخزن) مدل‌سازی بهره‌برداری از چاه انجام شده است. در ابتدای حل مدل عددی مقدار بازشدگی درزه‌ها در بیشترین مقدار ممکن طبق جدول (۵-۱) تنظیم شده است و تغییرات بعد از آن بسته به شرایط مدل انجام می‌شود.

۵-۵-۱-۱- فشار درون چاه ۱۲ مگاپاسکال

به منظور تحلیل و بررسی محیط اطراف چاه، تغییرات نمودار هم‌تراز فشارمنفذی و جابجایی در همه درزه‌ها به ترتیب در شکل (۵-۱۱) تا شکل (۵-۱۶) ارائه شده است. مطابق تغییرات ارائه شده در اشکال مذکور، توزیع فشارمنفذی تقریباً به صورت یکنواخت در اطراف چاه دیده می‌شود. در محدوده نزدیک چاه تخلیه سیال از درون درزه‌ها با سرعت بیشتری انجام می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که افت فشار سیال

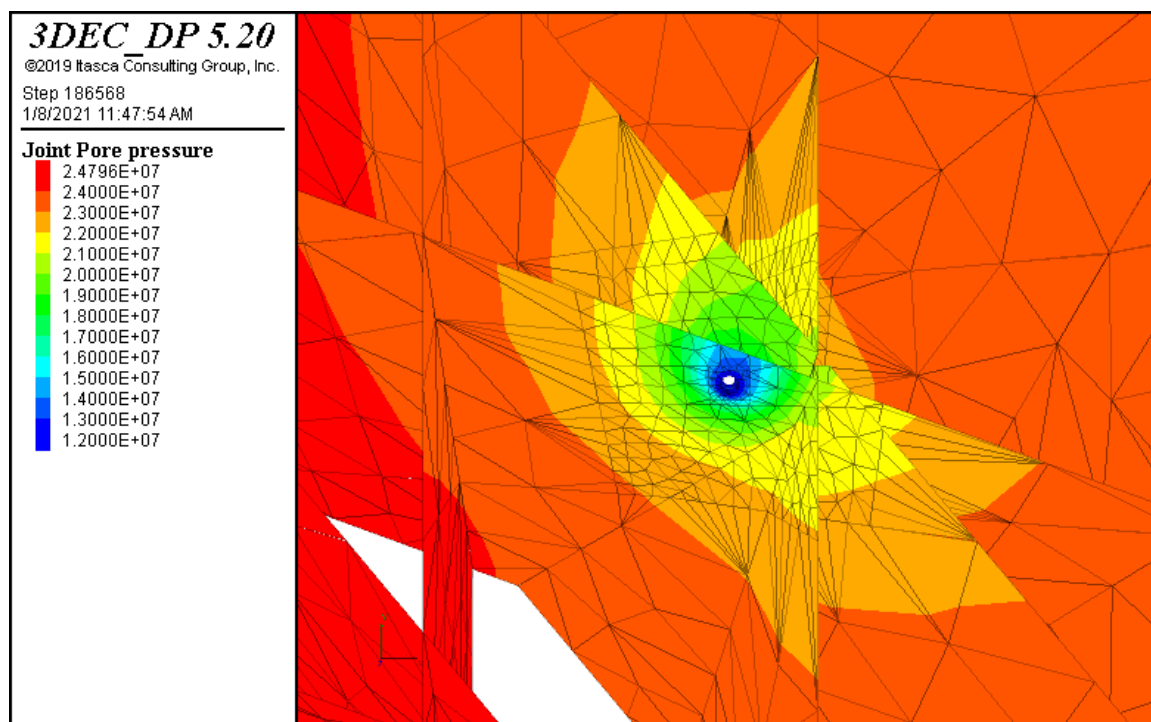
در این محدوده نسبت به فواصل دورتر سریع‌تر باشد که در نمودارهای هم‌تراز افت فشار سیال مشاهده می‌شود. با افزایش زمان توزیع فشار منفذی کمی تغییر می‌کند اما تغییرات آن نسبت به زمان اولیه ناچیز است. علت این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که در زمان‌های اولیه فشار سیال اطراف چاه یکسان است. با خروج سیال از چاه، اختلاف فشار درون چاه با اطراف باعث ایجاد جریان به سمت چاه می‌شود. این اختلاف تنها برای محدوده کمی در اطراف چاه بوجود می‌آید، در نتیجه از یک محدوده کمی در اطراف چاه سیال به سمت چاه حرکت می‌کند. با افزایش زمان و خروج سیال، شعاع تاثیر چاه افزایش یافته و باعث می‌شود سیال از مناطق دورتر (حجم ماتریکس تحت تاثیر افزایش می‌یابد) نیز به سمت چاه حرکت کند. این مساله باعث می‌شود سیال از یک محدوده بیشتری وارد درزه‌ها شود. نظر به محدود بودن تراوایی ماتریکس، افزایش سطح ارتباط درزه و ماتریکس باعث تامین سیال بیشتر می‌گردد.

در ارتباط با تغییرات جابجایی نیز مشابه تغییرات فشار، در کوتاه مدت این تغییرات بیشتر از طولانی مدت در محدوده نزدیک چاه رخ می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد در ابتدای بهره‌برداری که سیال از درزه‌های مجاور و نزدیک به درون چاه وارد می‌شود، تامین سیال جایگزین به سختی درون درزه‌ها انجام می‌پذیرد (تراوایی ماتریکس نسبت به درزه کم است). خروج سیال و عدم تامین کافی آن به وسیله ماتریکس جانبی باعث افزایش تنش موثر و بالتبع بسته‌شدن درزه می‌شود. اما با افزایش زمان، شعاع تاثیر چاه افزایش یافته و در نتیجه تامین سیال درون درزه از محدوده بیشتری انجام می‌شود. با تامین سیال درون درزه بسته‌شدن درزه نیز کاهش می‌یابد. نکته مهم این است که بسته‌شدن درزه‌ها یک مسیر یک‌طرفه است و در ادامه برداشت از چاه، به صورت طبیعی امکان افزایش بازشدگی درزه وجود ندارد.

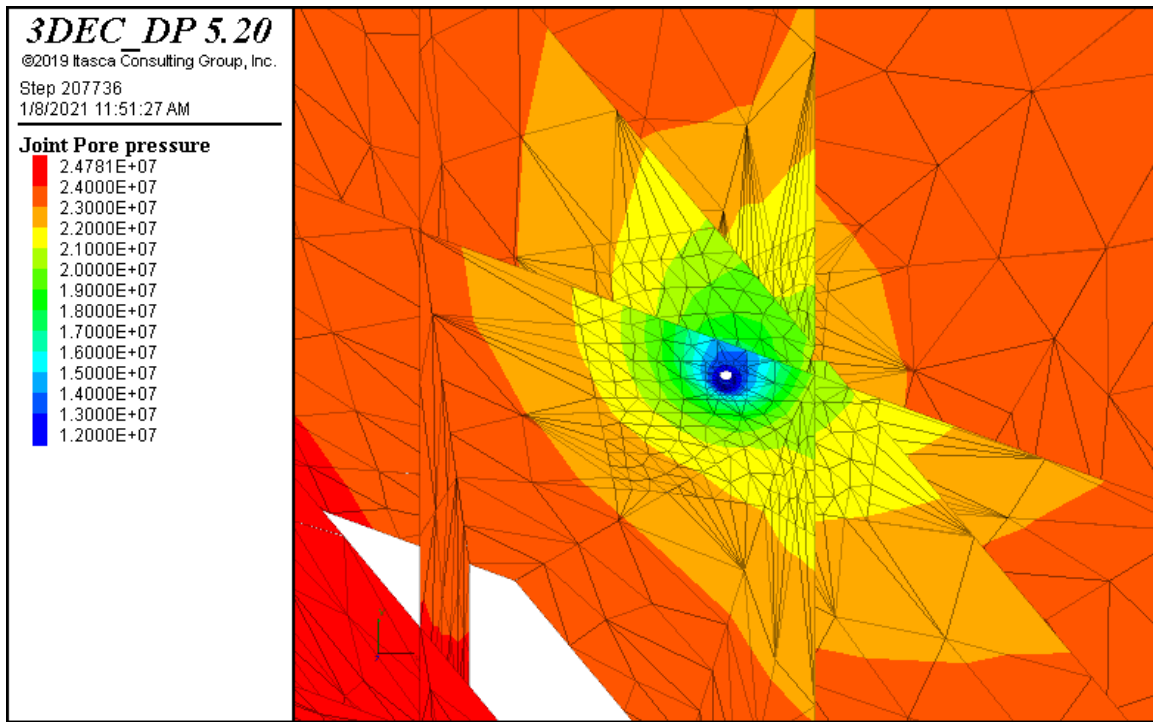
با بررسی دقیق‌تر تغییرات فشار و جابجایی در هر درزه مشخص می‌شود که در درزه شماره ۱۰ و ۱۲ تقریباً این تغییرات مشابه هم هستند ((شکل (۵-۱۷) تا شکل (۵-۱۹) و شکل (۵-۲۹) تا شکل (۵-۳۱)) بطوریکه نمودار هم‌تراز افت فشار و توزیع جابجایی در هر دو درزه از یک الگو تبعیت می‌کند. اما در درزه شماره ۱۱ (شکل (۵-۲۳) تا شکل (۵-۲۵)) این موضوع کمی متفاوت است. در درزه شماره ۱۱ توزیع فشار درون درزه به صورت نواری در جهت شیب درزه ثابت بوده و در جهت امتداد درزه با افزایش زمان رشد می‌کند. علت این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که شیب درزه ۱۱ نسبت به درزه ۱۰ و ۱۲ بیشتر است (شیب درزه ۱۱ برابر ۷۷ درجه و شیب درزه ۱۰ و ۱۲ برابر ۵۰ و ۵۵ درجه است). از آنجاکه درزه شماره ۱۱ تقریباً قائم است، در محل تلاقی دو درزه دیگر با این درزه که تقریباً موازی محور چاه است، افت فشار کلی مشاهده می‌شود (شکل (۵-۲۳) تا شکل (۵-۲۵)) اما از آنجا که در محل تلاقی، سیال ورودی از چند درزه تامین می‌شود، مقدار بازشدگی هیدرولیکی نیز نسبت به جهت دیگر کمتر کاهش

یافته‌است (شکل (۵-۲۶) تا شکل (۵-۲۸)). با افزایش زمان افت فشار سیال در جهت امتداد درزه افزایش می‌یابد و در همین جهت نیز مقدار بازشدگی هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

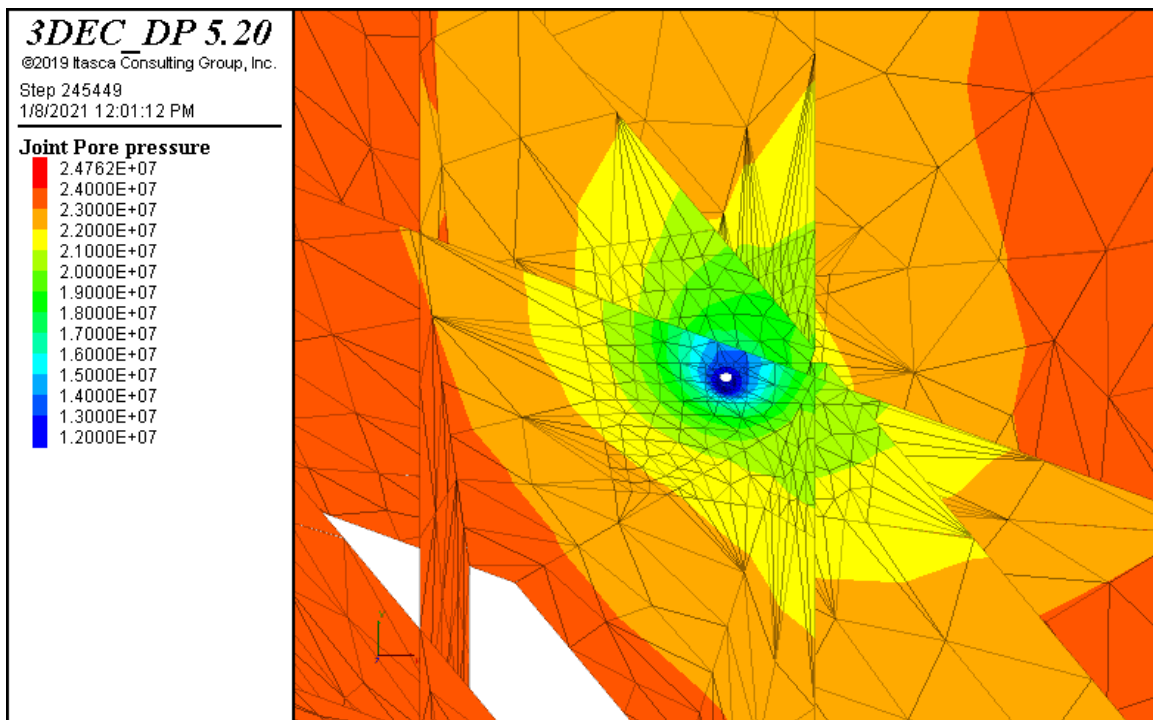
در ارتباط با تغییرات تراوایی ماتریکس، از آنجا که تغییرات تراوایی تابعی از مقدار فشار منفذی و فشار همه جانبه می‌باشد، می‌بایست تغییرات این دو فاکتور در نظر گرفته شود. نظر به ناچیز بودن ابعاد چاه و تغییرات مکانیک حاصله بر روی محیط تنها تغییرات فشار منفذی مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل (۵-۳۵) تا شکل (۵-۳۷) نمایش داده شده است. طبق این اشکار مقدار فشار منفذی در اطراف بدنه چاه به ۱۲ مگاپاسکال کاهش یافته است که برابر فشار درون چاه می‌باشد. تغییرات فشار اطراف چاه تابعی از موقعیت درزه ها و انتقال سیال از ماتریکس به درزه است. همانطور که مشاهده می‌شود در مجاورت درزه ها و در نزدیکی دیواره چاه افت فشار سیال بیشتر می‌باشد. بر این اساس طبق شکل (۵-۳۸) تا شکل (۵-۴۰) مقدار تراوایی ماتریکس نیز نمایش داده شده است که با روند تغییرات فشار منفذی یکسان است.



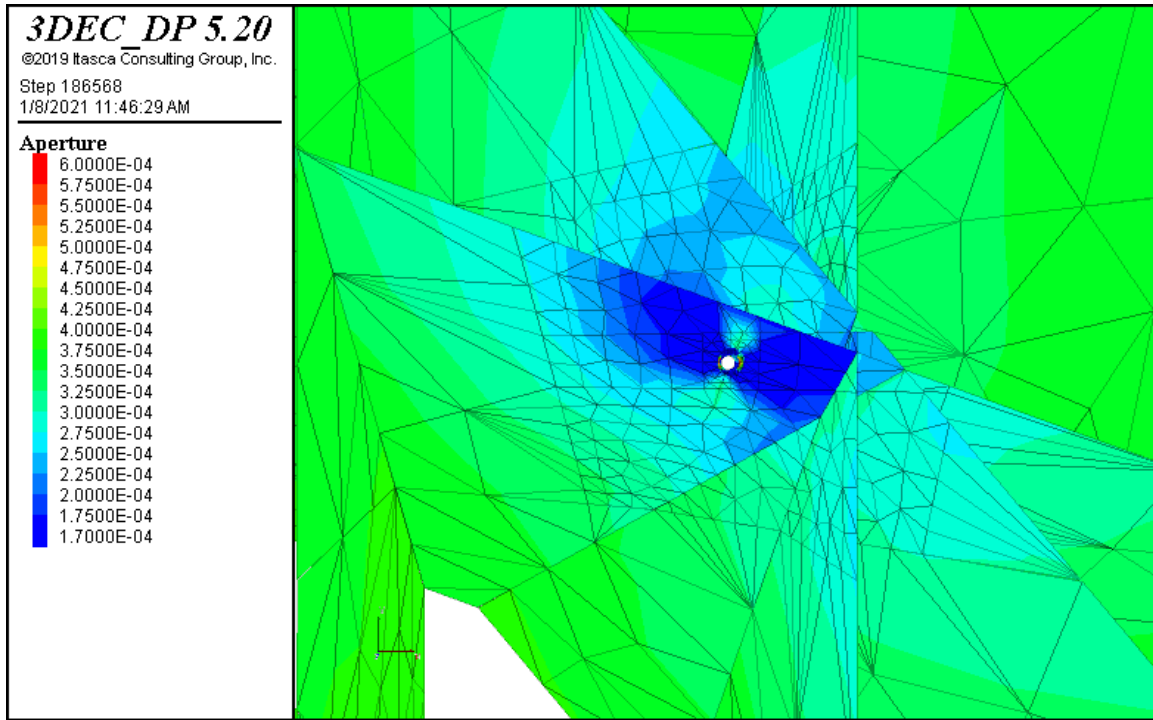
شکل (۵-۱۱) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



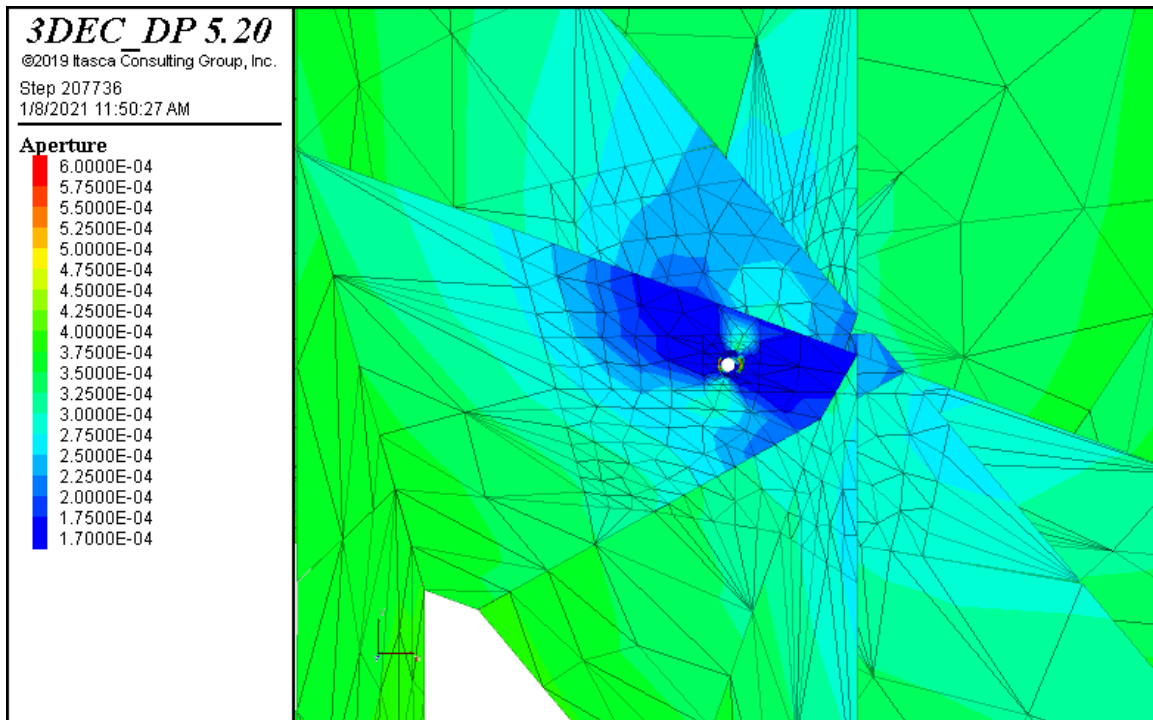
شکل (۵-۱۲) فشارمغذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



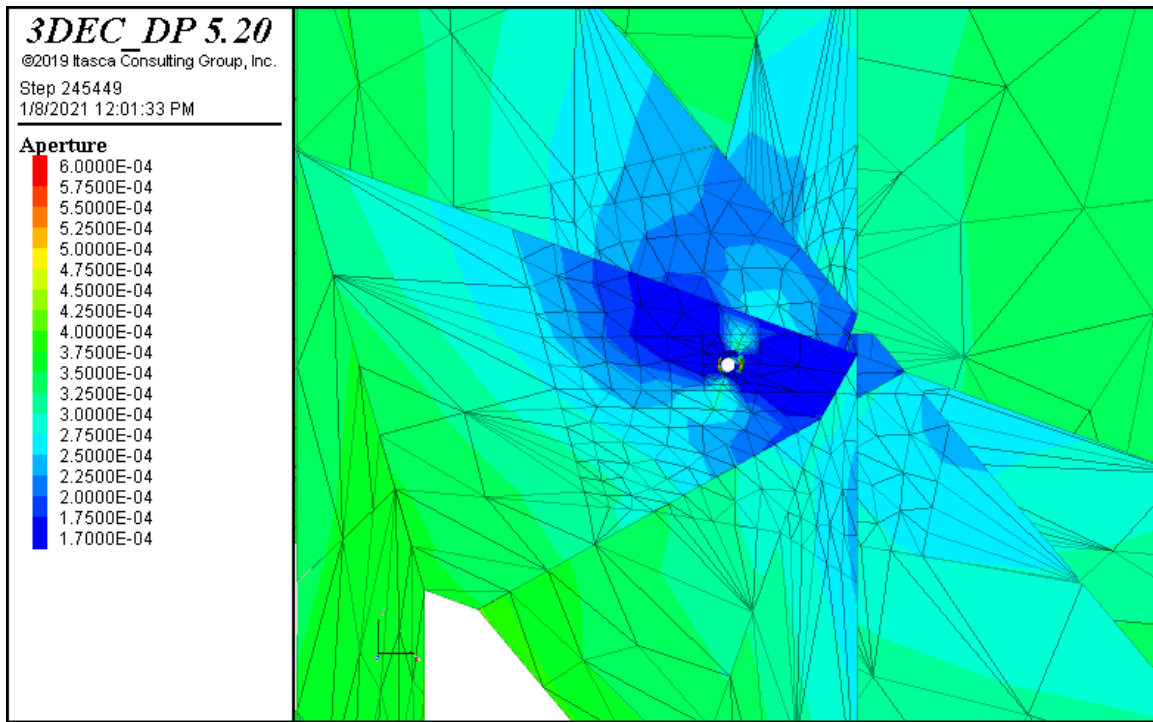
شکل (۵-۱۳) فشارمغذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



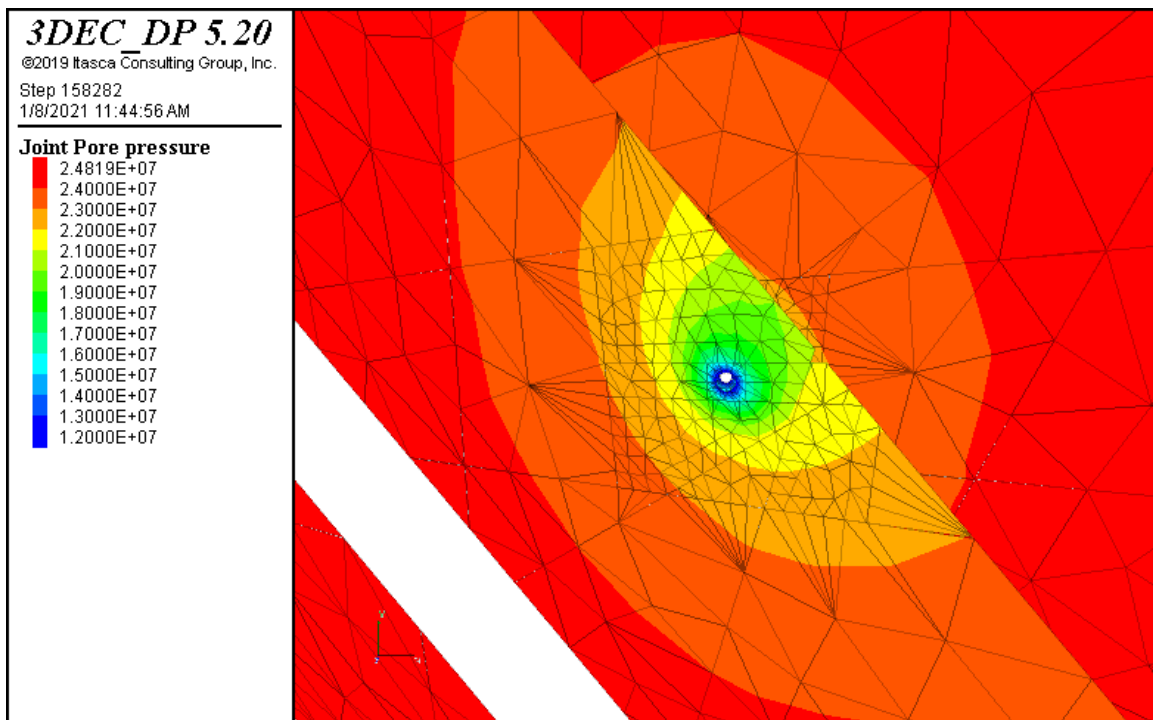
شکل (۱۴-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



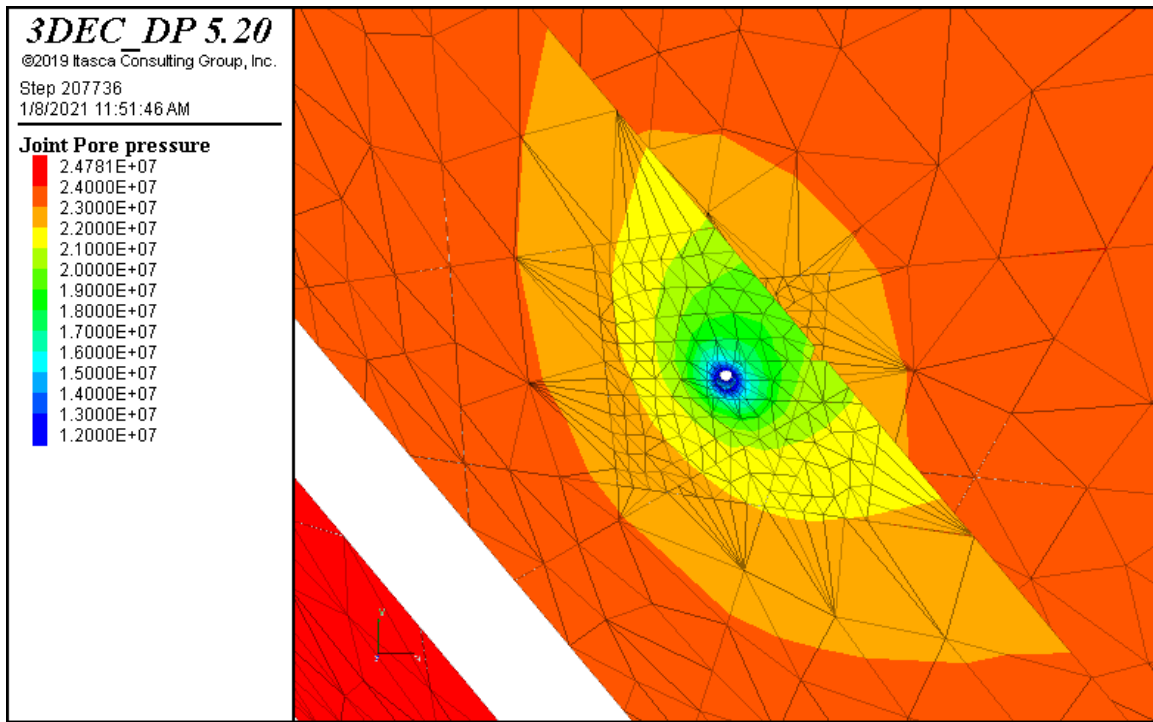
شکل (۱۵-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



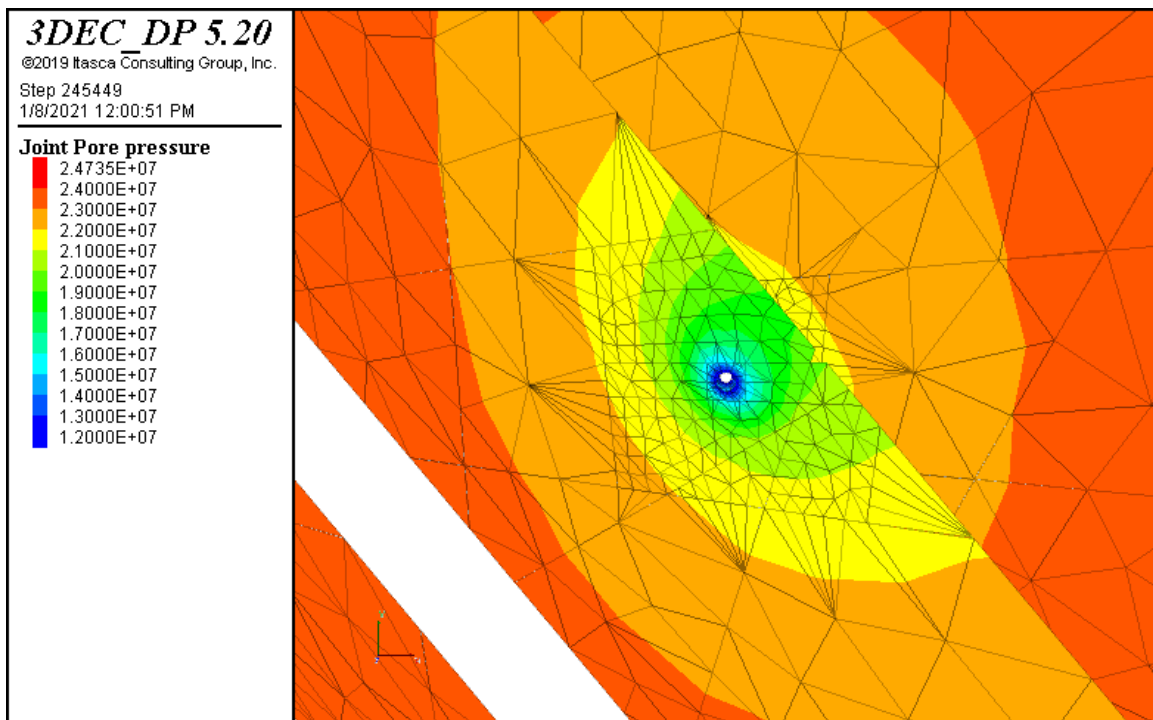
شکل (۱۶-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



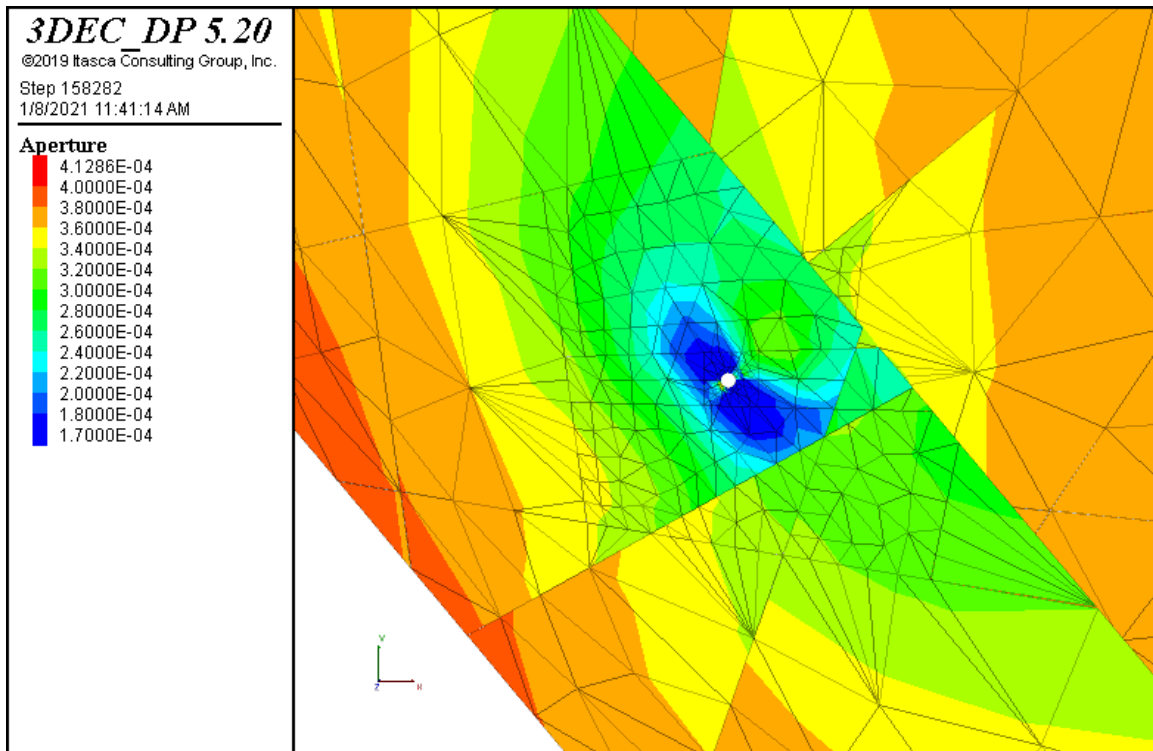
شکل (۱۷-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



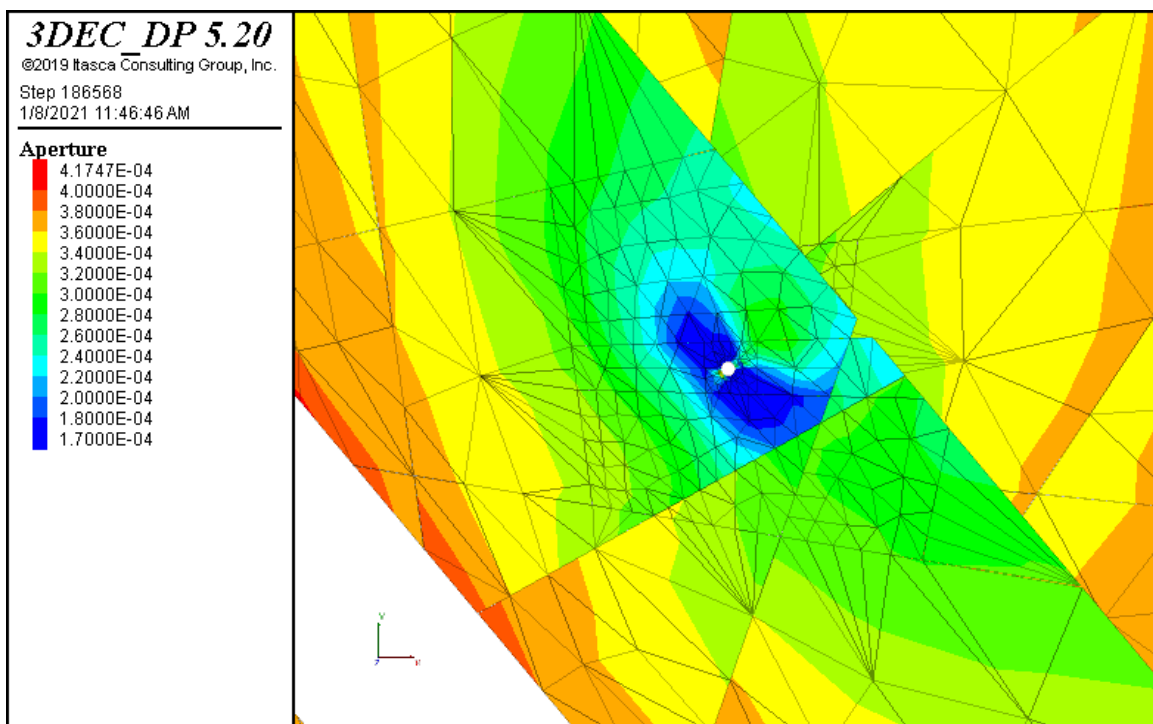
شکل (۱۸-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



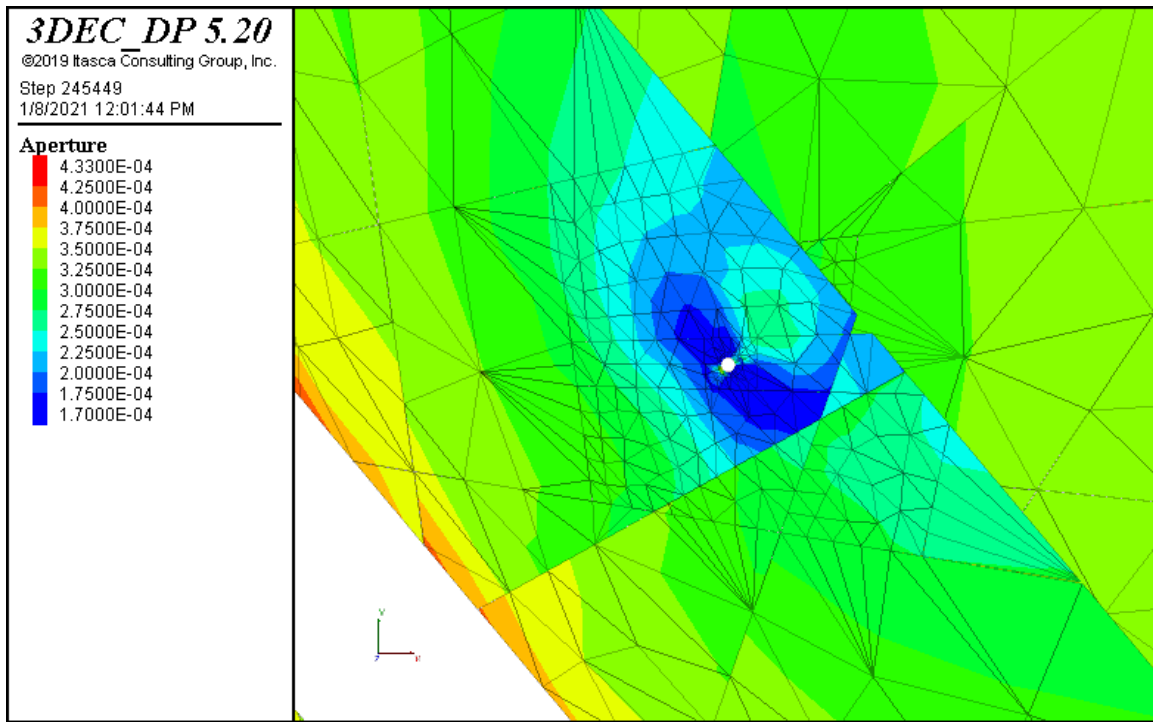
شکل (۱۹-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



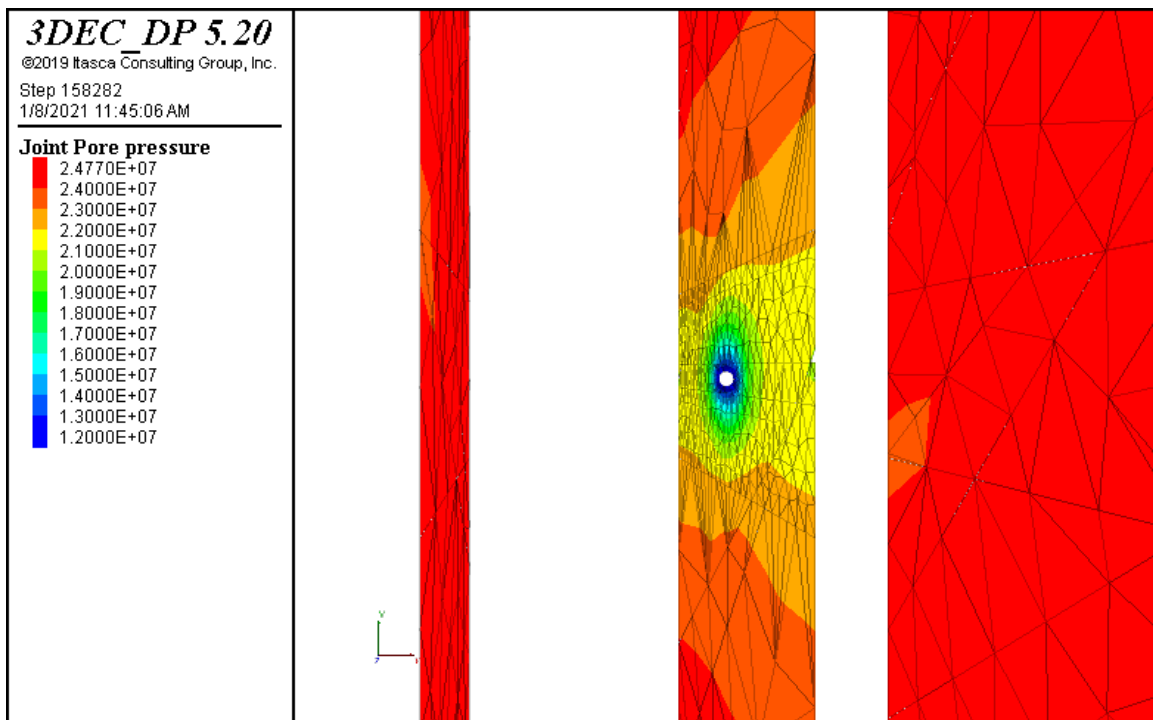
شکل (۲۰-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



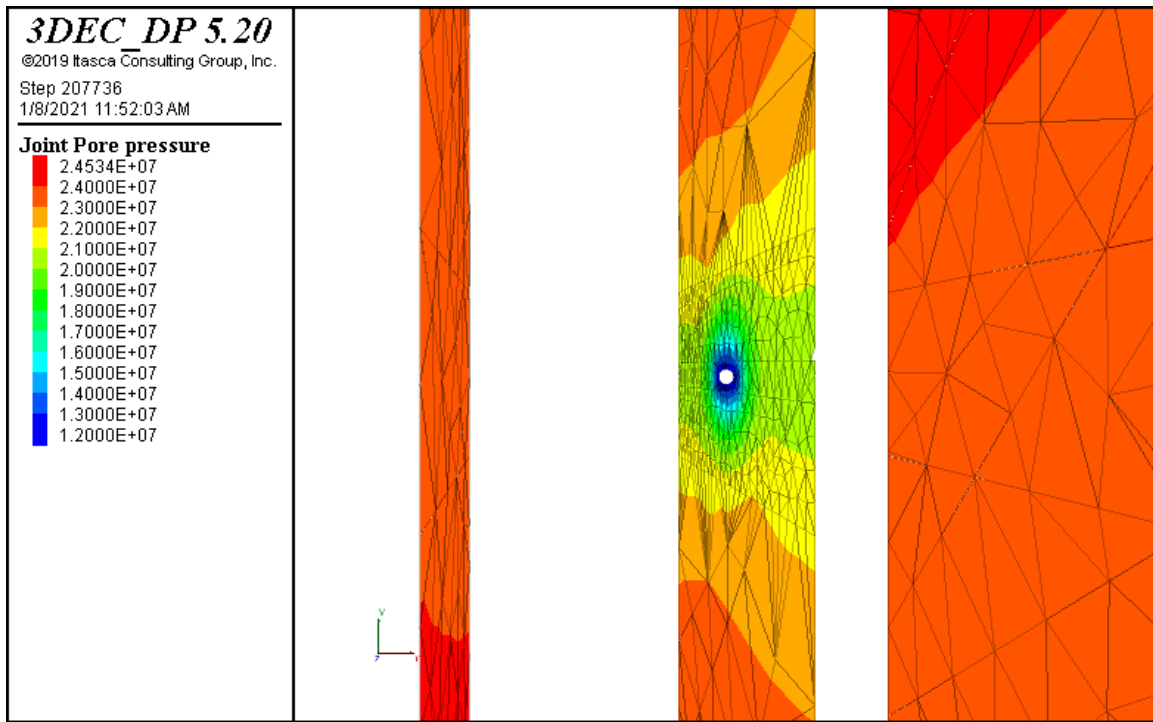
شکل (۲۱-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



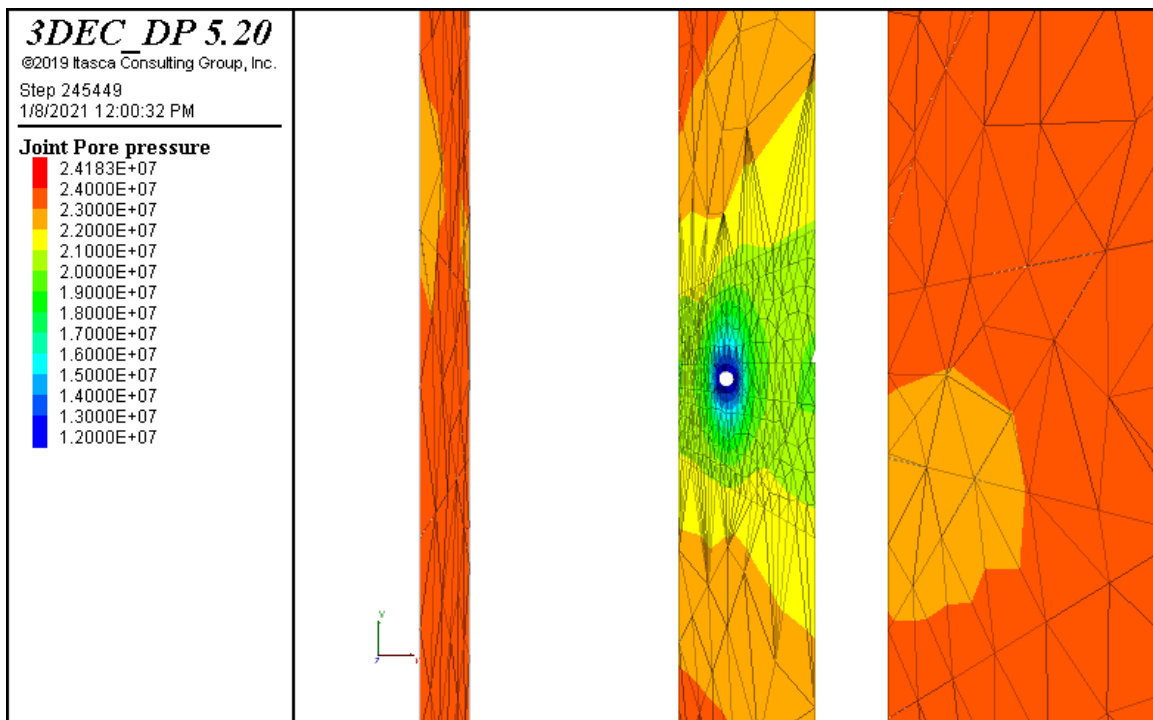
شکل (۵-۲۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



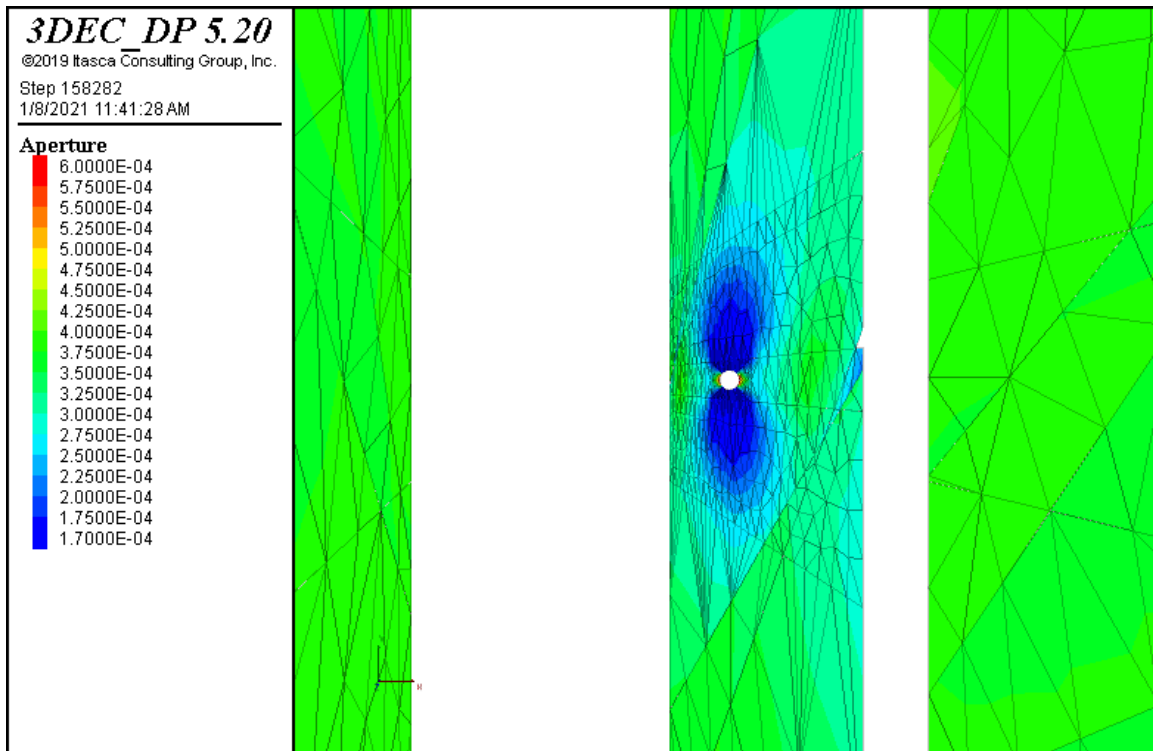
شکل (۵-۲۳) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



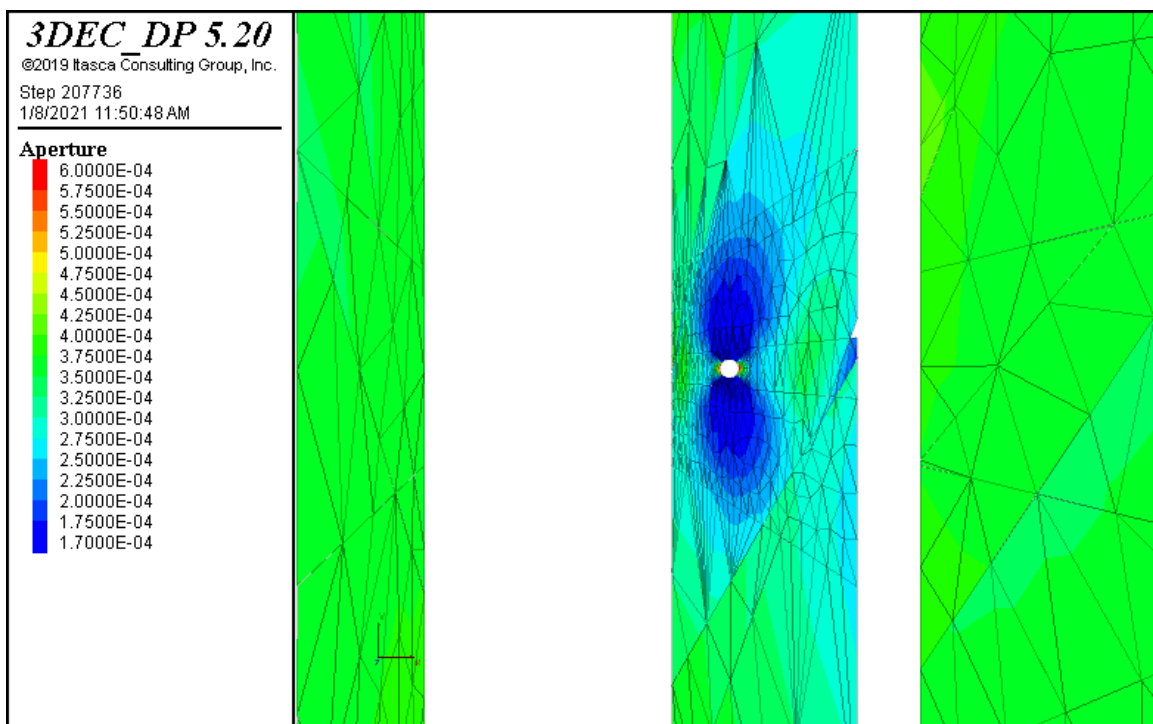
شکل (۲۴-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



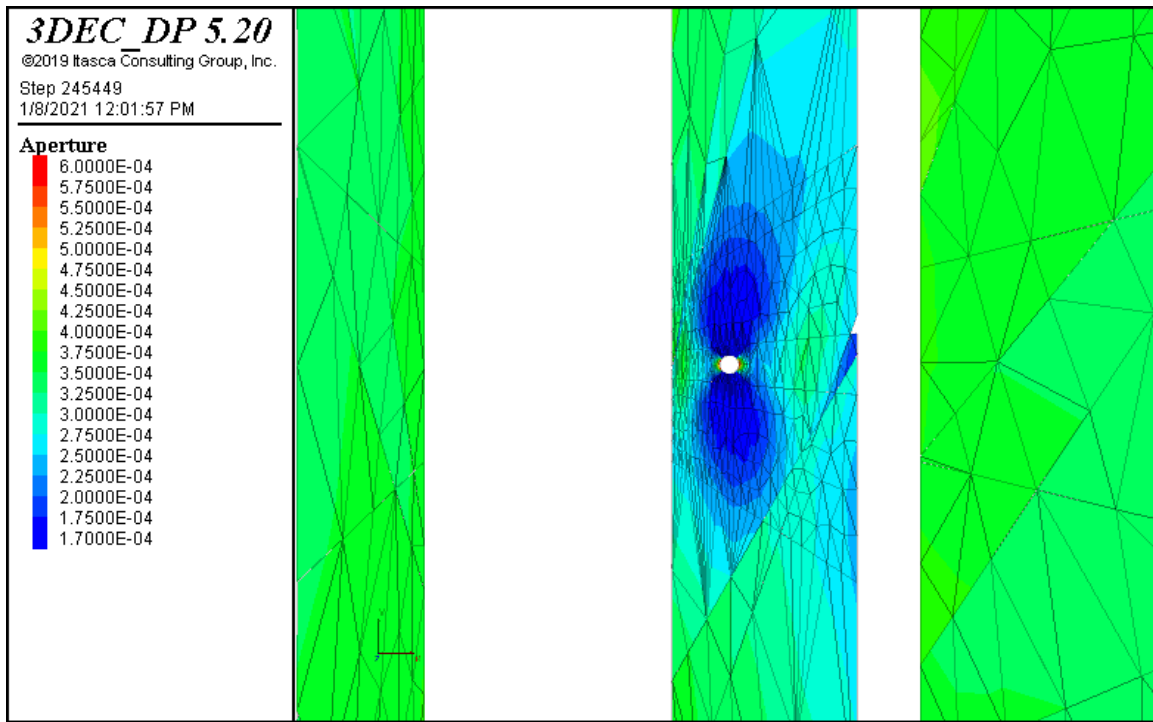
شکل (۲۵-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



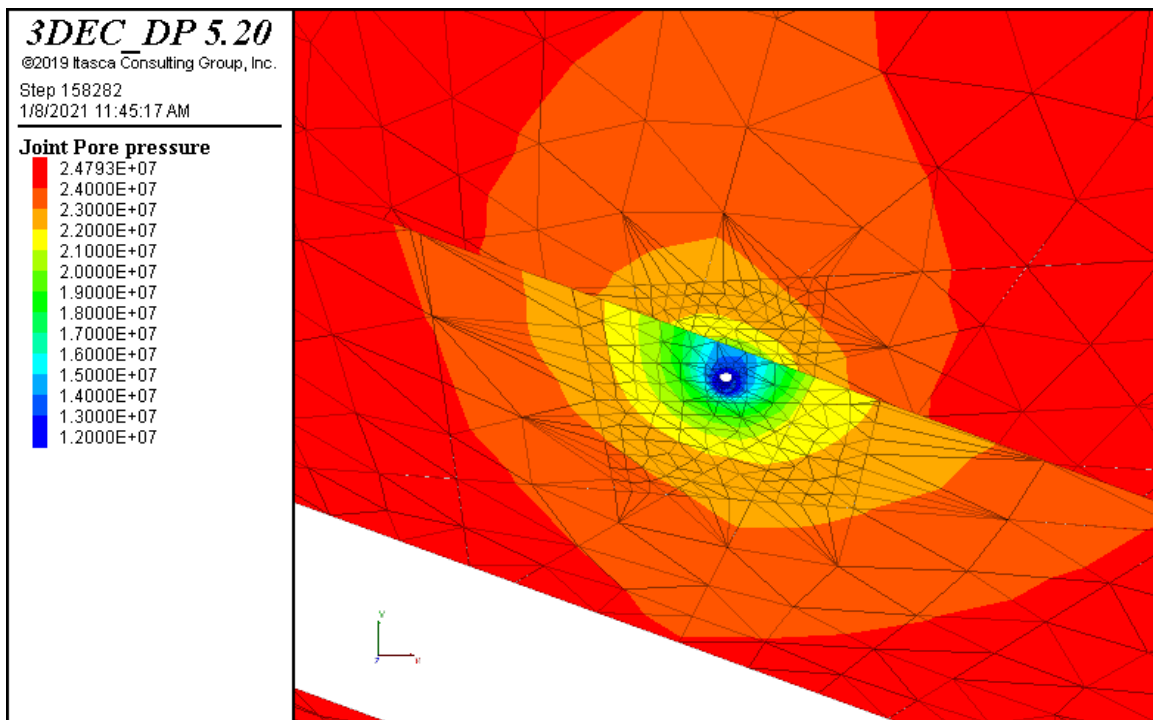
شکل (۲۶-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



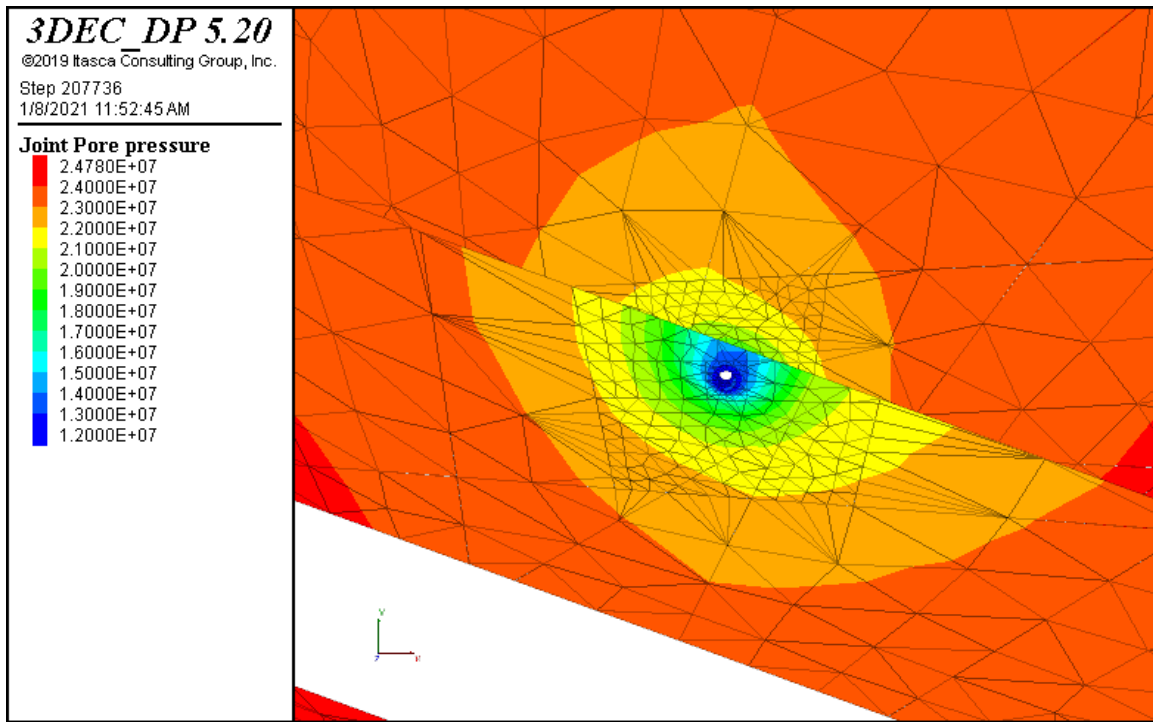
شکل (۲۷-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



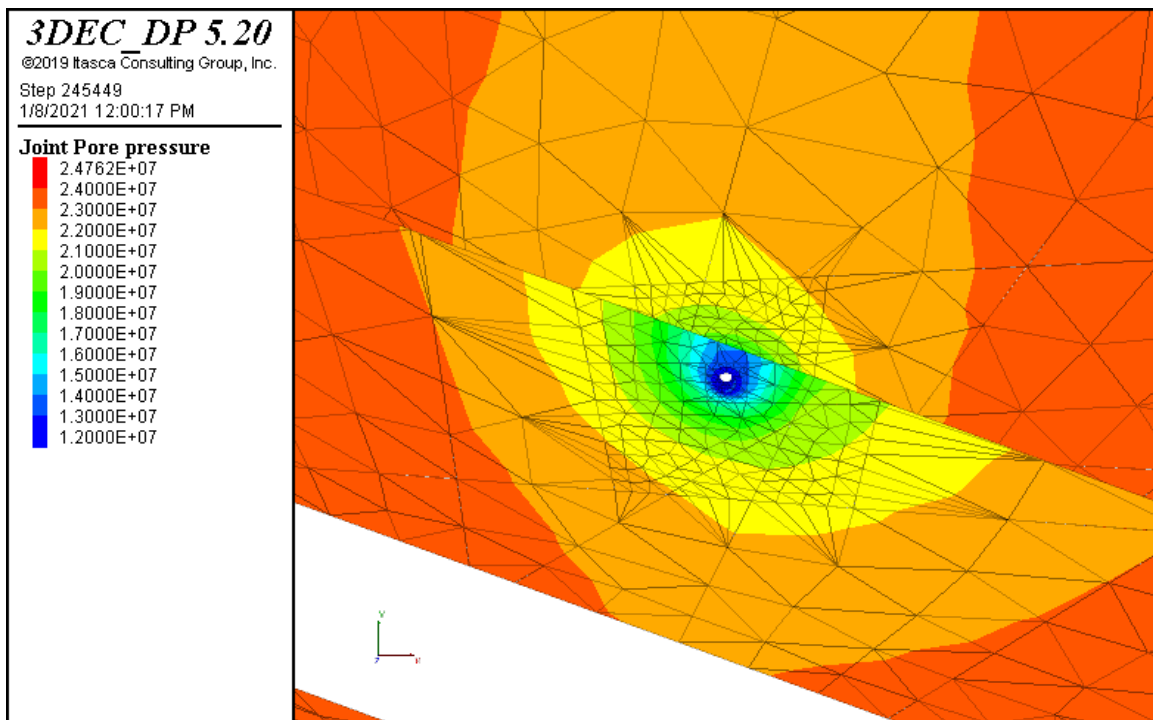
شکل (۵-۲۸) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



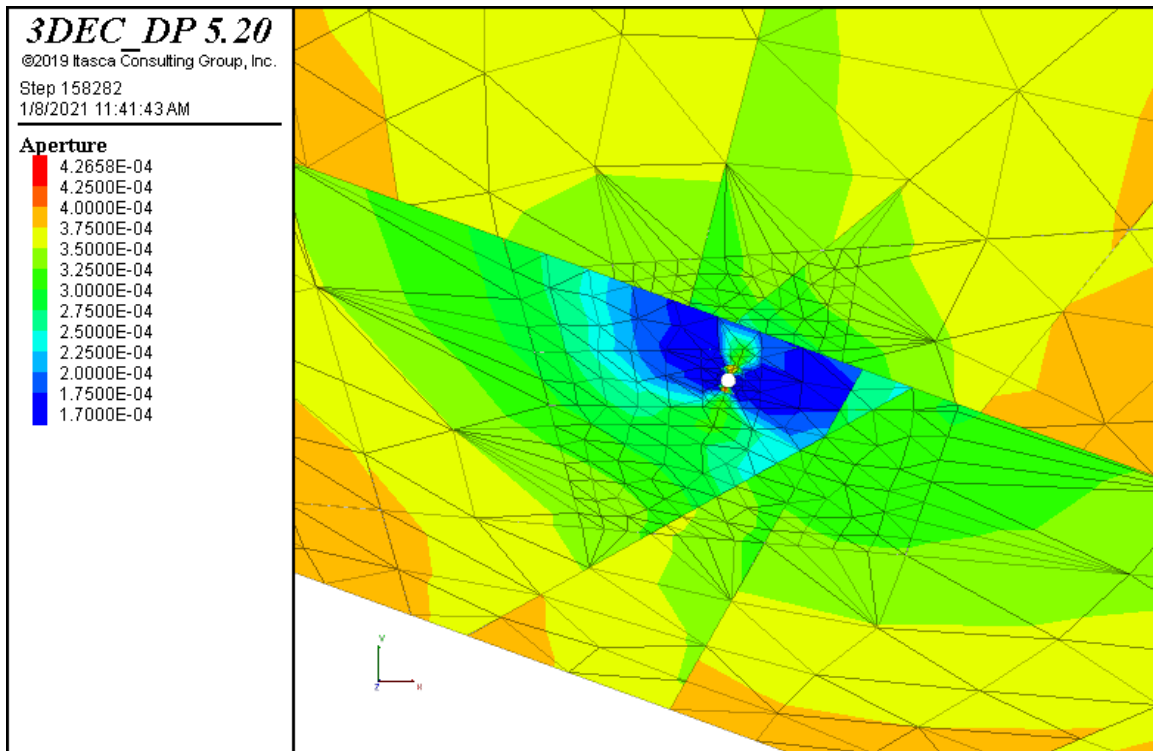
شکل (۵-۲۹) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



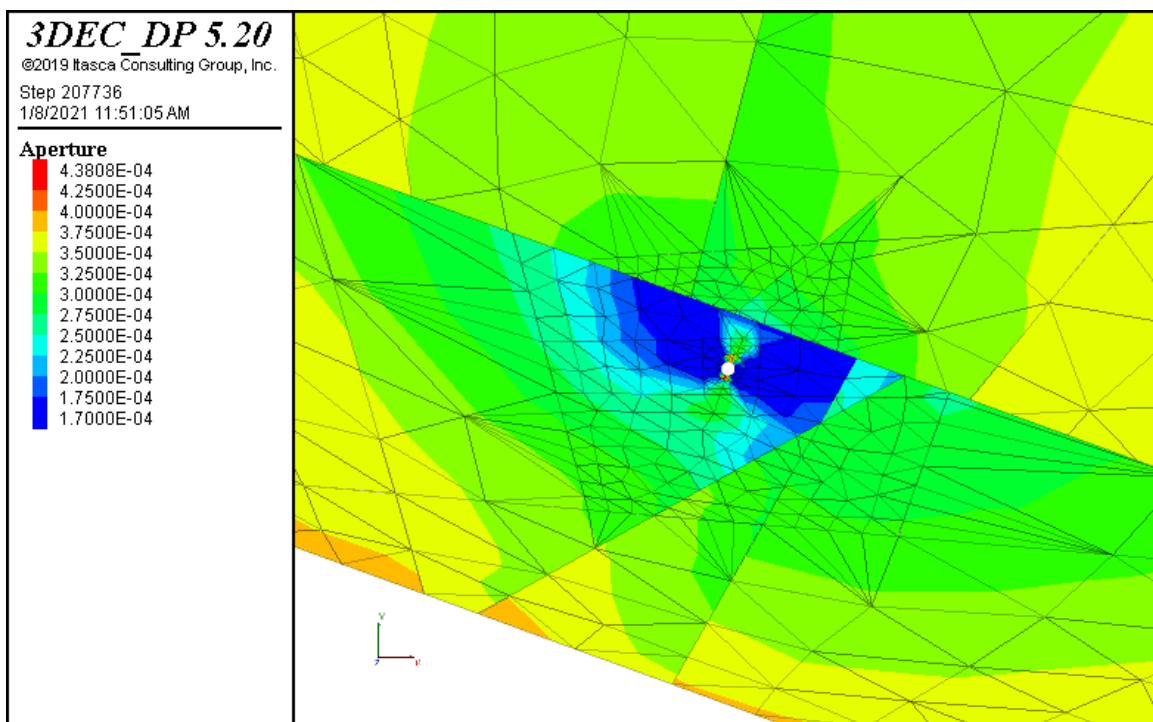
شکل (۳۰-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



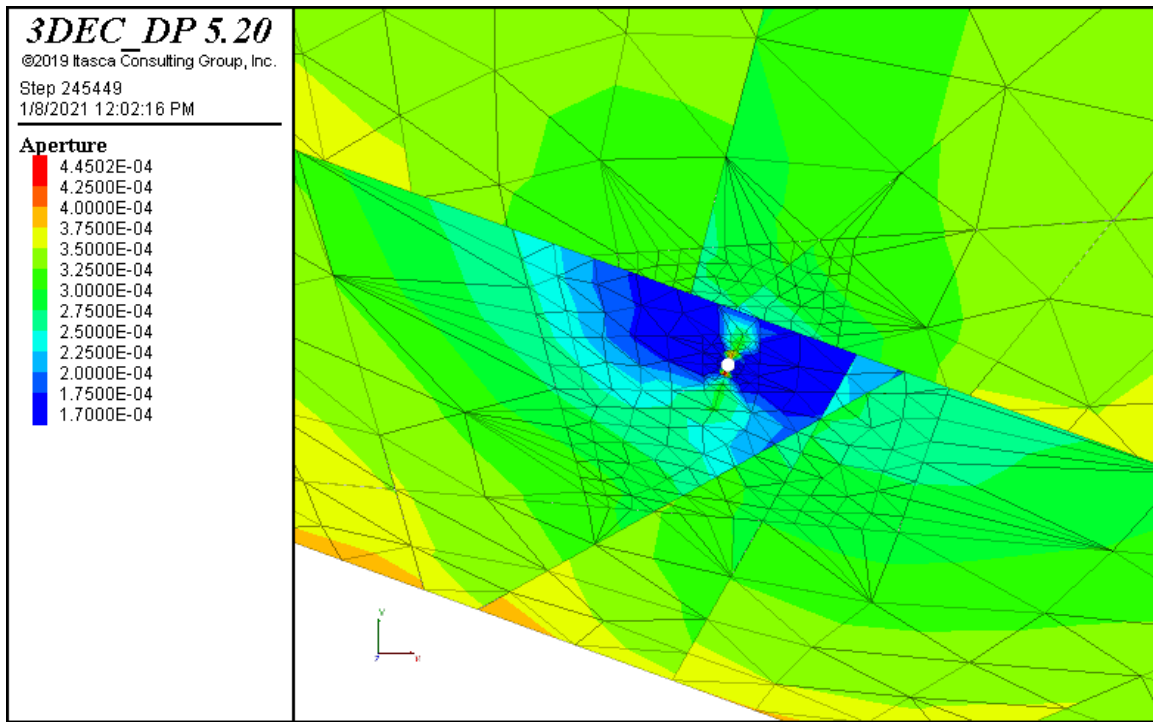
شکل (۳۱-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



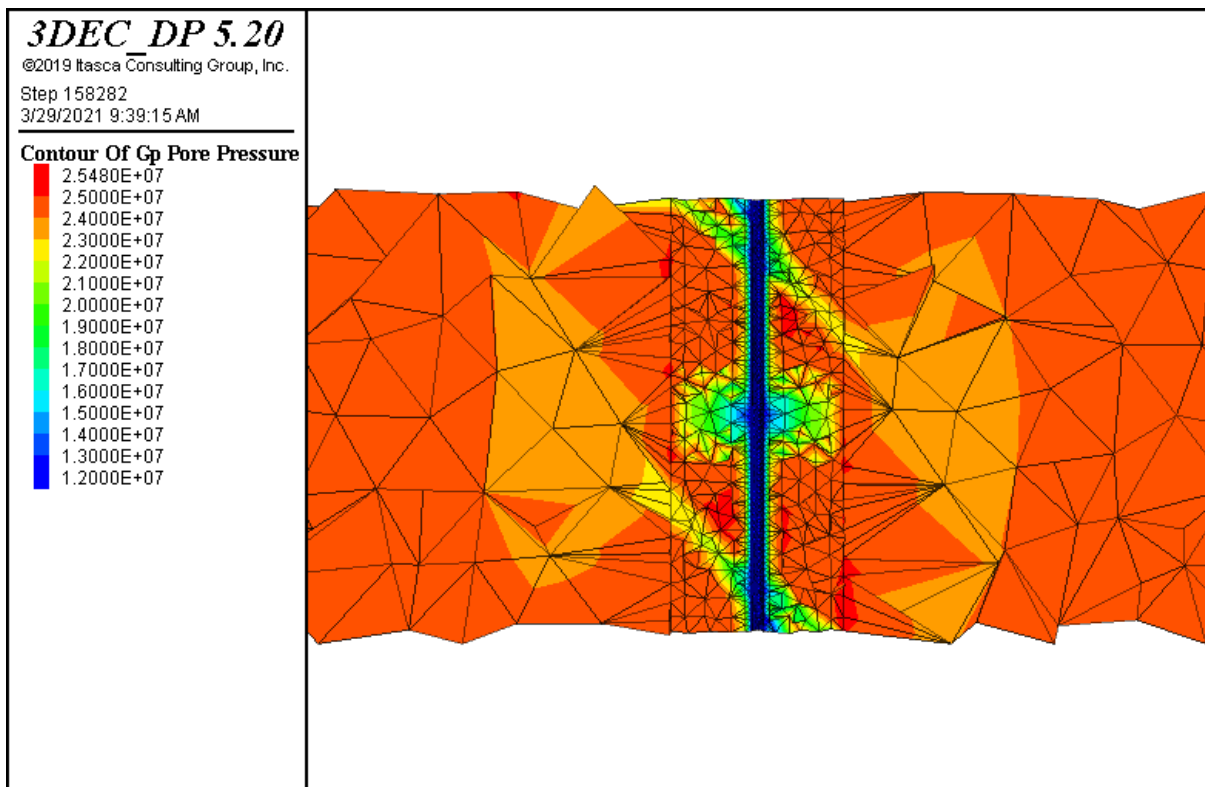
شکل (۵-۳۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



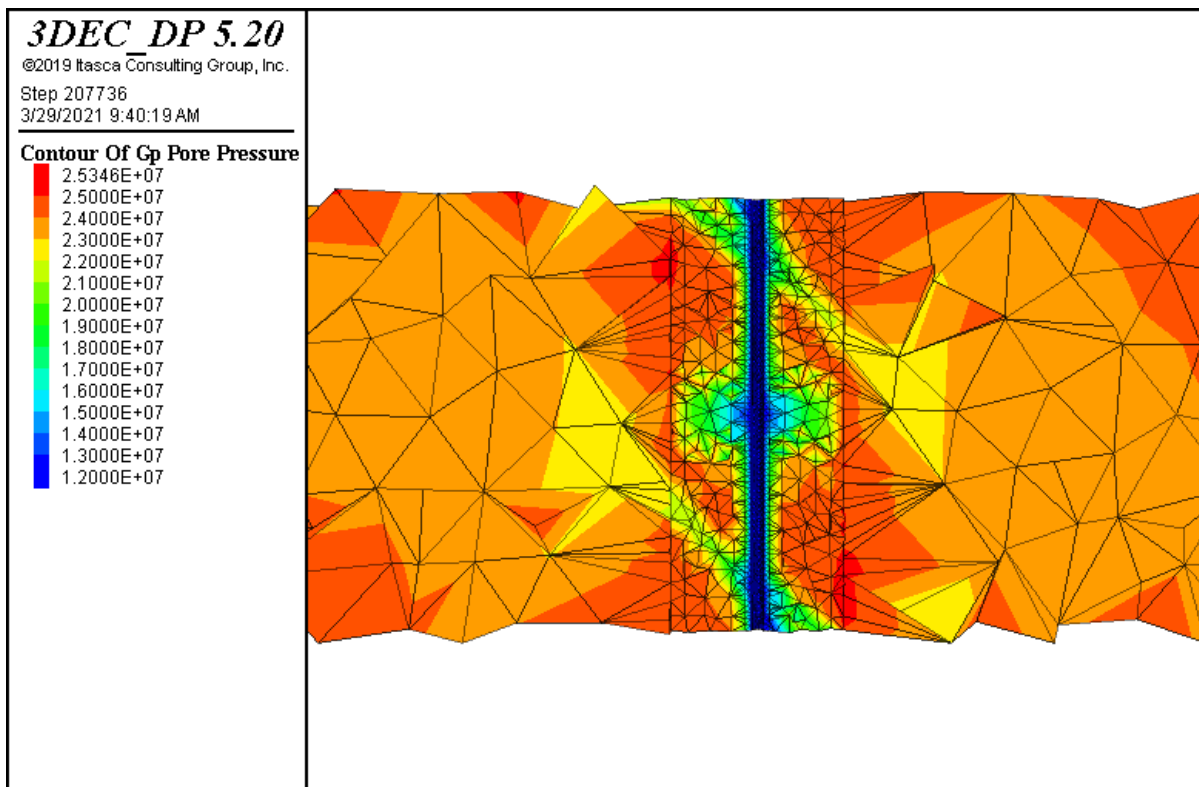
شکل (۵-۳۳) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



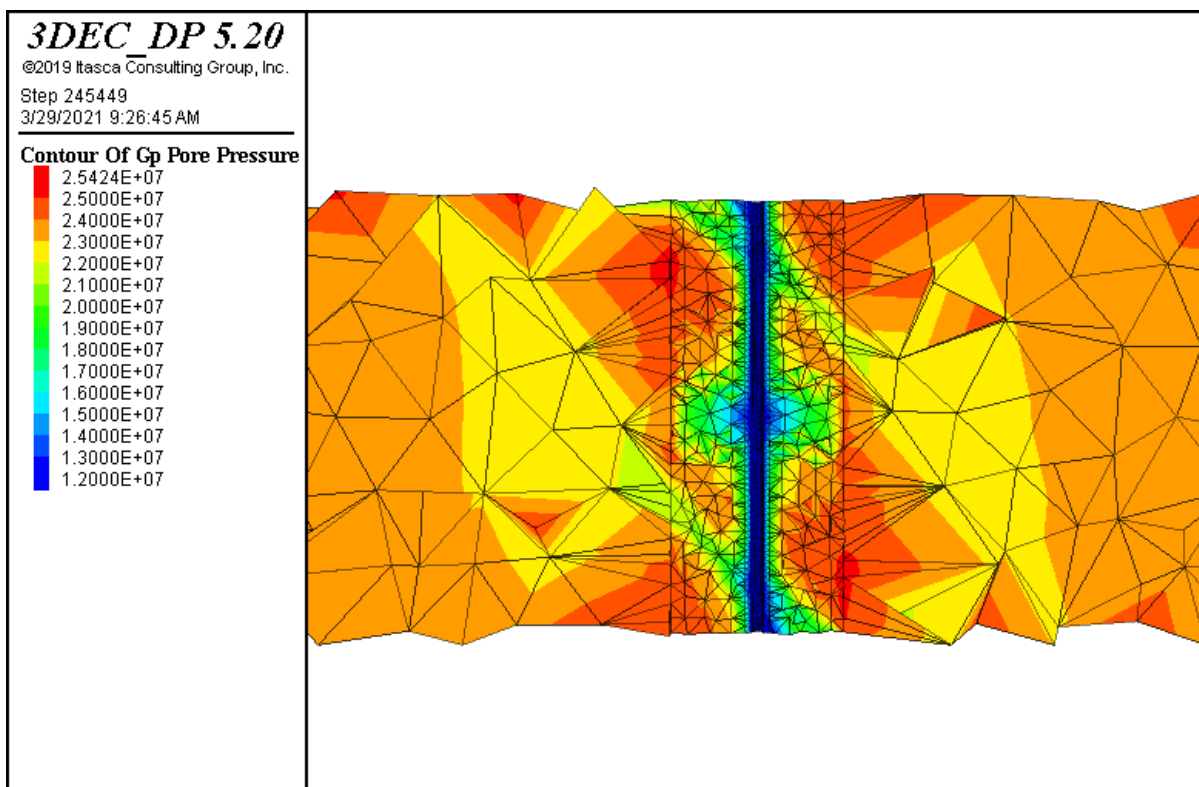
شکل (۳۴-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۲.



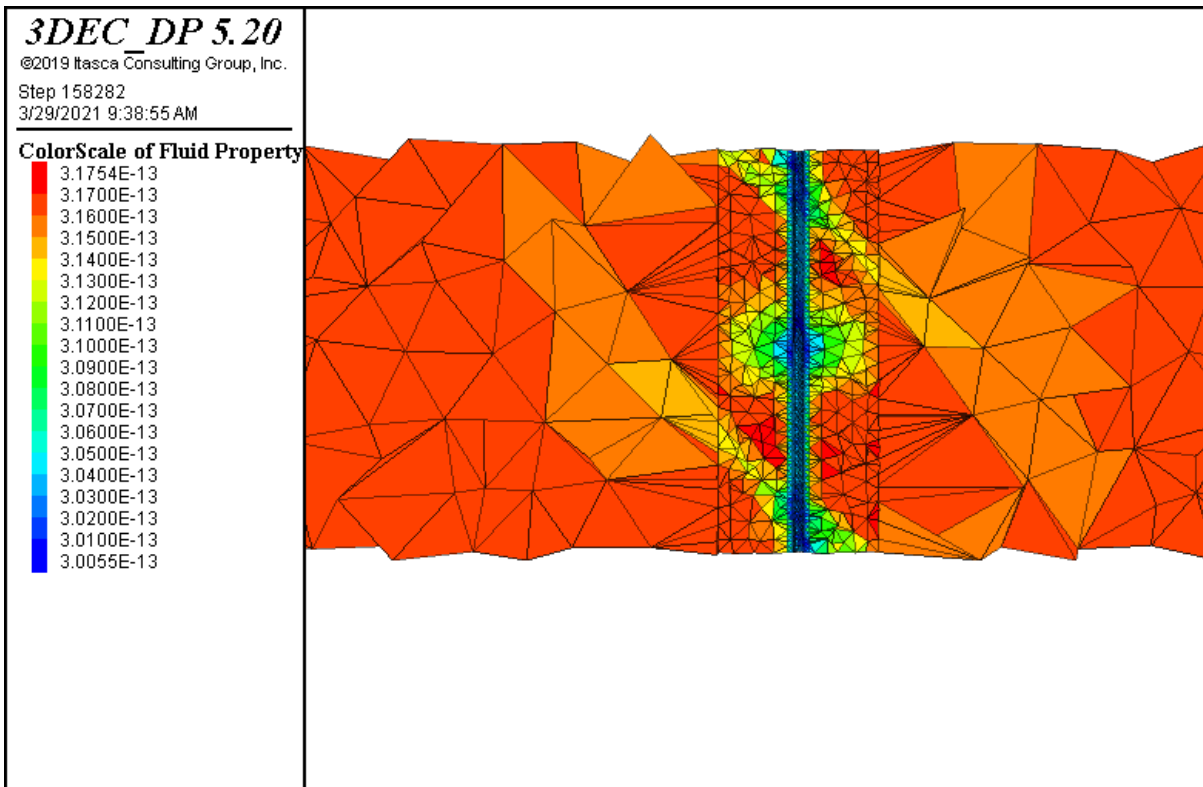
شکل (۳۵-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در چاه شماره ۱.



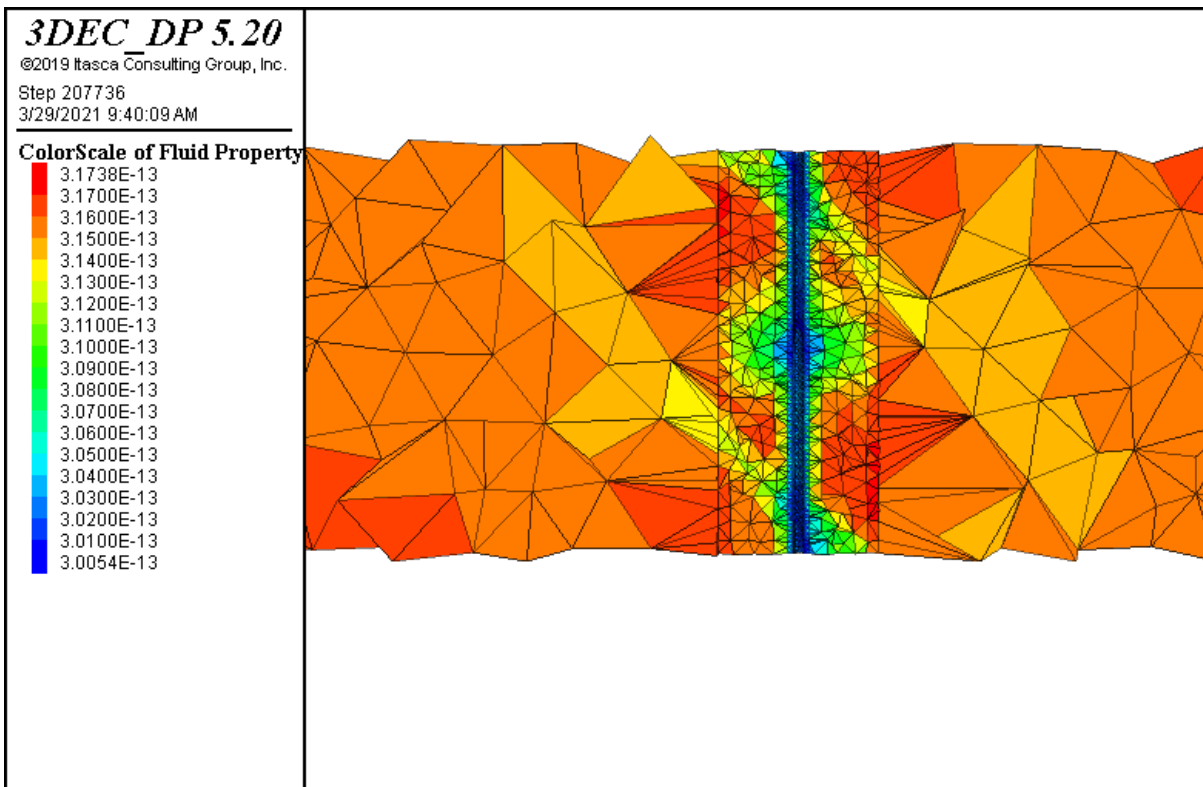
شکل (۳۶-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.



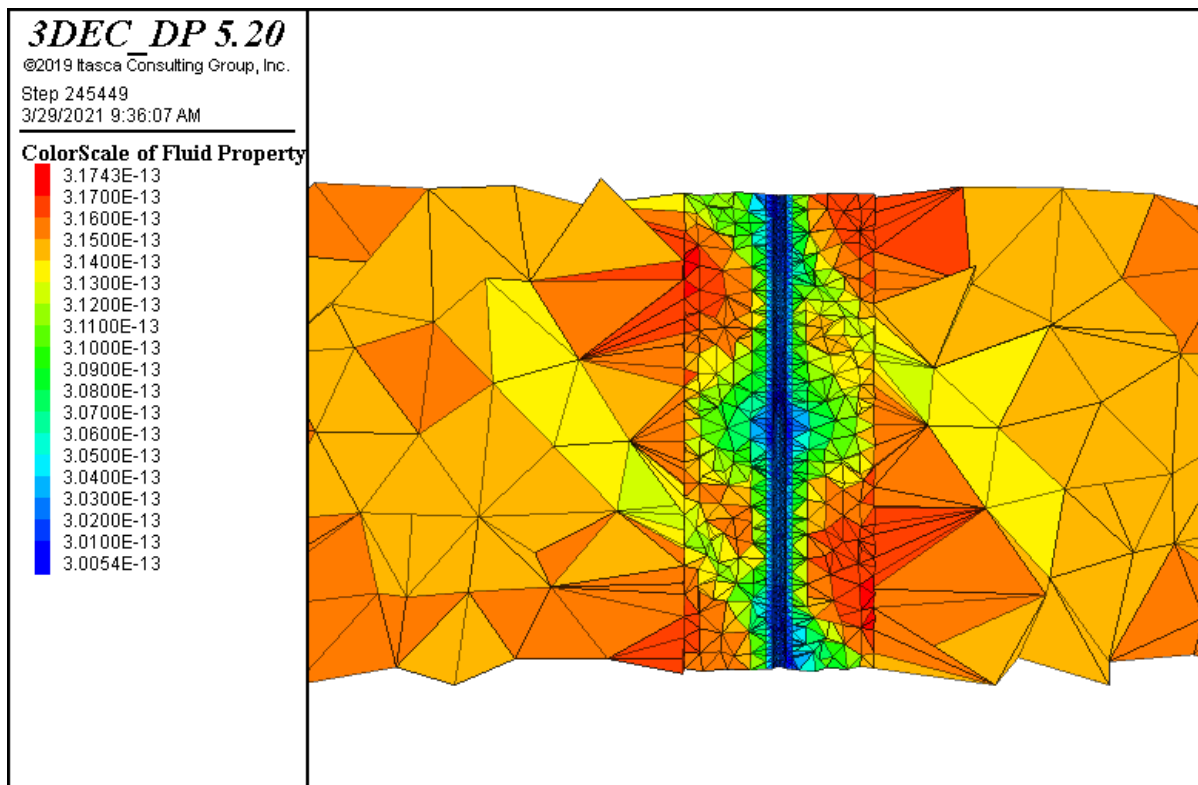
شکل (۳۷-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.



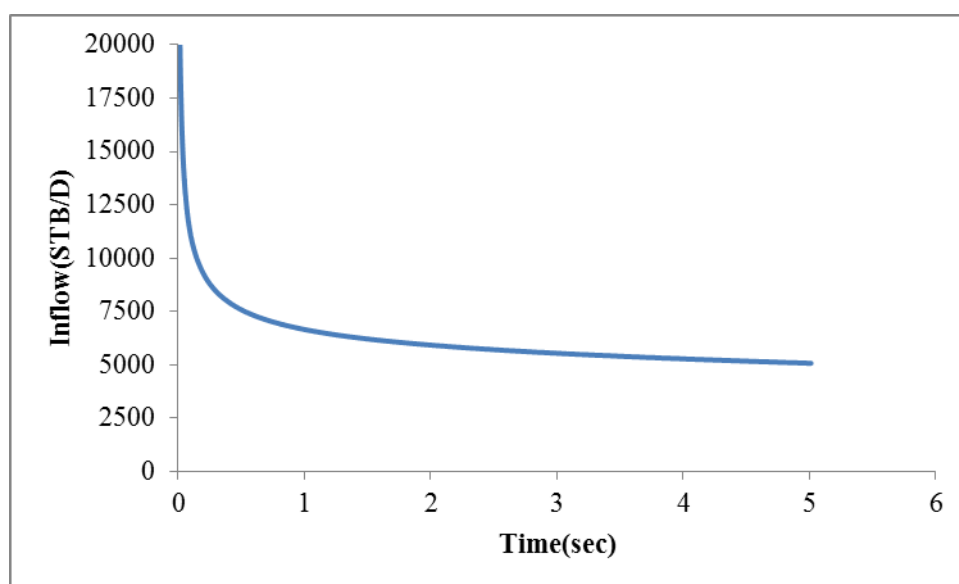
شکل (۳۸-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.



شکل (۳۹-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.



شکل (۴۰-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از مدل در چاه شماره ۱.



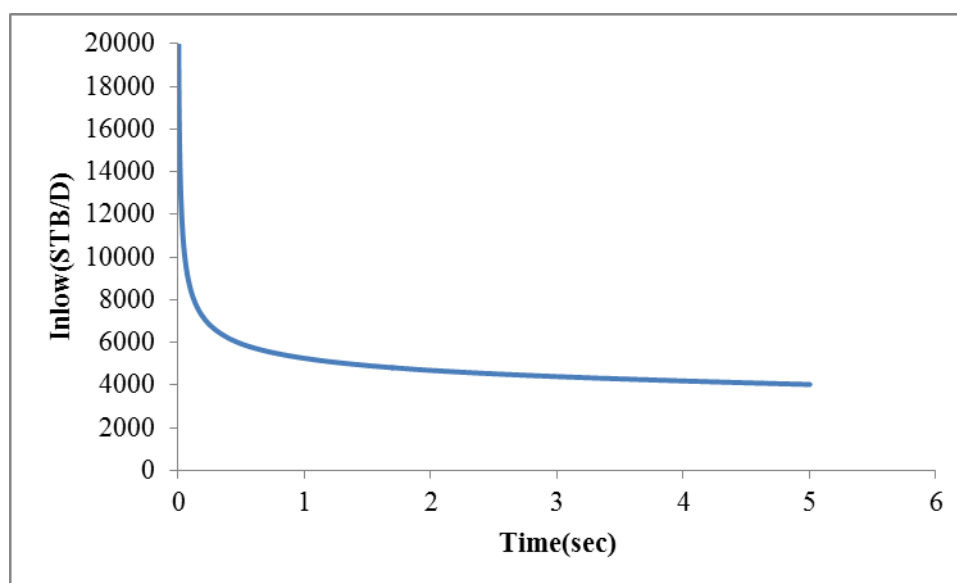
شکل (۴۱-۵) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۲ مگاپاسکال.

برای بررسی جریان ورودی به چاه در مقادیر فشار داخلی چاه، مقدار جریان وارده به چاه از طریق ماتریکس و درزه بررسی شده است. مقدار جریان وارد شده به چاه از طریق ماتریکس (منظور سیالی است که مستقیماً از ماتریکس سنگ به درون چاه وارد شود) نسبت به جریان ورودی از درزه‌ها حدود ۱ به ۳۰۰ می‌باشد. مقدار کل سیال ورودی به چاه در شرایطی که فشار داخل چاه ۱۲ مگاپاسکال باشد برابر ۵۰۰۰

بشکه در ۲۴ ساعت است. نکته قابل توجه در ارتباط با مقدار سیال ورودی به چاه از طریق ماتریکس این است که نباید نسبت ارائه شده برای سیال ورودی از طریق ماتریکس باعث شود که اهمیت تراوایی ماتریکس کم‌رنگ شود. همانطور که پیش‌تر بیان شد، کل سیال ورودی به چاه درون ماتریکس ذخیره شده است و سپس از طریق درزه‌ها و دیواره چاه به درون چاه وارد می‌شود. نکته مهم‌تر دیگر، انتقال سیال درون درزه شدیداً تحت تاثیر تراوایی محیط اطراف می‌باشد (موارد بیان شده در فصل ۴). به عبارتی نسبت ارائه شده بیانگر این مورد است که تنها انتقال سیال از ماتریکس مجاور به درون چاه، نسبت به درزه‌هایی که سیال را از فواصل دورتر به چاه می‌رسانند عدد پایینی است.

۵-۵-۱-۲- فشار درون چاه ۱۸ مگاپاسکال

با توجه به شباهت تغییرات در این حالت نسبت به حالت قبلی از ارائه تصاویر مربوطه به لحاظ خلاصه نمودن اصل مطلب خودداری شده است. تصاویر مربوطه برای این حالت در بخش پیوست از شکل (أ-۱) تا شکل (أ-۳۰) می‌باشد. مطابق اشکال مربوطه روند تغییرات فشار منفذی و بسته شدن درزه‌ها در این حالت نیز مشابه حالت قبلی (حالت فشار داخلی چاه برابر ۱۲ مگاپاسکال) است؛ با این تفاوت که مقدار افت فشار و محدوده بسته شدن درزه‌ها کمتر می‌باشد، ولی از نظر جهت رشد تغییرات اختلافی وجود ندارد.



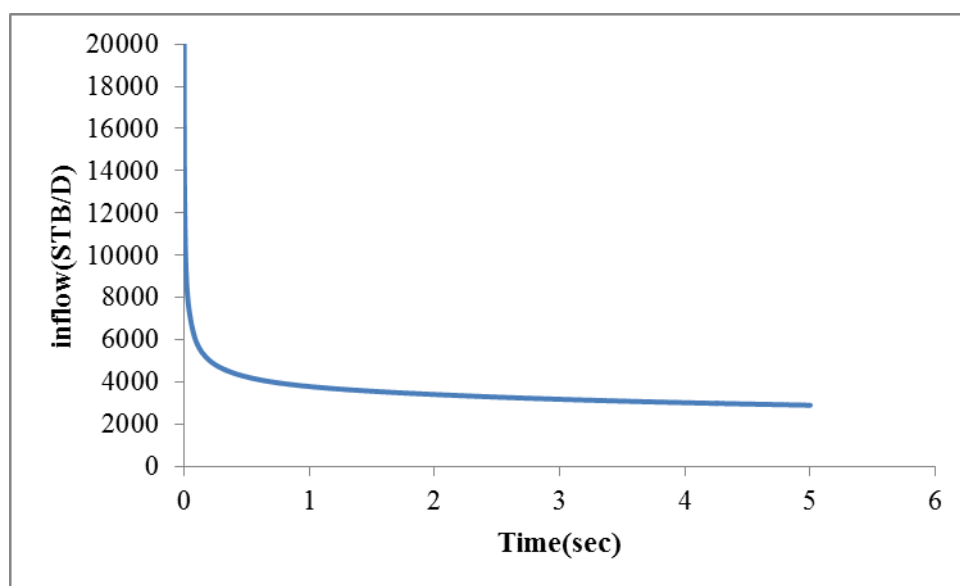
شکل (۵-۴۲) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۸ مگاپاسکال.

مقدار جریان وارد شده به چاه از طریق ماتریکس نسبت به جریان ورودی از درزه‌ها حدود ۱ به ۴۵۰ می‌باشد. مقدار کل سیال ورودی به چاه در این حالت برابر ۴۰۰۰ بشکه در ۲۴ ساعت است.

۵-۱-۳- فشار درون چاه ۲۱ مگاپاسکال

در این حالت نیز روند تغییرات مشابه دو حالت قبلی می‌باشد. در این بخش نیز به لحاظ جلوگیری از تکرار تصاویر مربوطه در شکل (ا-۳۱) تا شکل (ا-۶۰) ارائه شده است.

مقدار جریان وارد شده به چاه از طریق ماتریکس (منظور سیالی است که مستقیماً از ماتریکس سنگ به درون چاه وارد شود) نسبت به جریان ورودی از درزه‌ها حدود ۱ به ۵۷۳ می‌باشد. مقدار کل سیال ورودی به چاه در این حالت برابر ۲۹۰۰ بشکه در ۲۴ ساعت است.



شکل (۵-۴۳) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۲۱ مگاپاسکال.

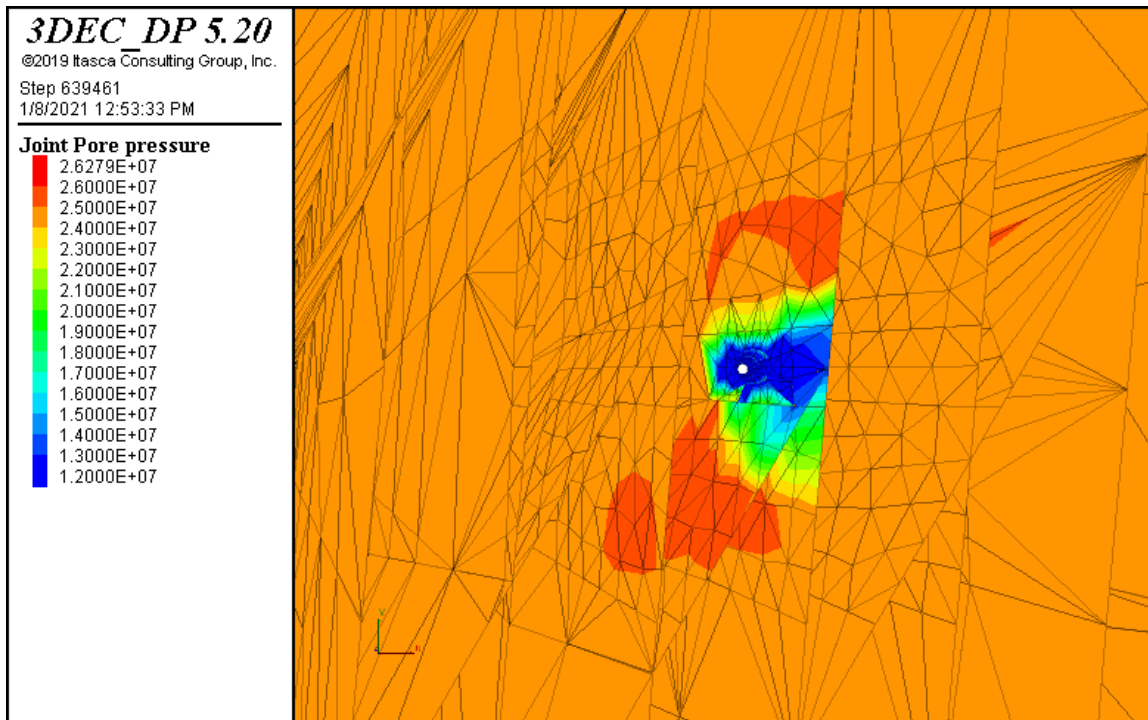
۵-۲- بررسی تغییرات هیدرومکانیکی چاه شماره ۲

در بررسی رفتار این چاه، مشابه چاه شماره ۱، با توجه به اینکه اطلاعات مورد نظر در مورد فشار داخلی چاه در حین برداشت در دسترس نبوده در سه مقدار فشار داخلی ۱۲، ۱۸ و ۲۱ مگاپاسکال (۵۰ و ۷۵ و ۹۰ درصد فشار اولیه مخزن) مدل‌سازی بهره‌برداری از چاه انجام شده است. کلیات شرایط اولیه در این چاه نیز مشابه چاه شماره ۱ می‌باشد (منظور شرایط حل مدل است ولی از نظر مقداری، مقادیر مربوطه متفاوت می‌باشد) به طوری که مقدار بازشدگی درزه‌ها در بیشترین مقدار ممکن طبق جدول (۵-۴) تنظیم شده است و تغییرات بعد از آن بسته به شرایط مدل انجام می‌شود. سپس به منظور بررسی تغییرات فشارمنفذی و بازشدگی هیدرولیکی در هر درزه و در طول زمان، به صورت مجزا هر تصاویر هم‌تراز مربوطه ارائه شده‌اند.

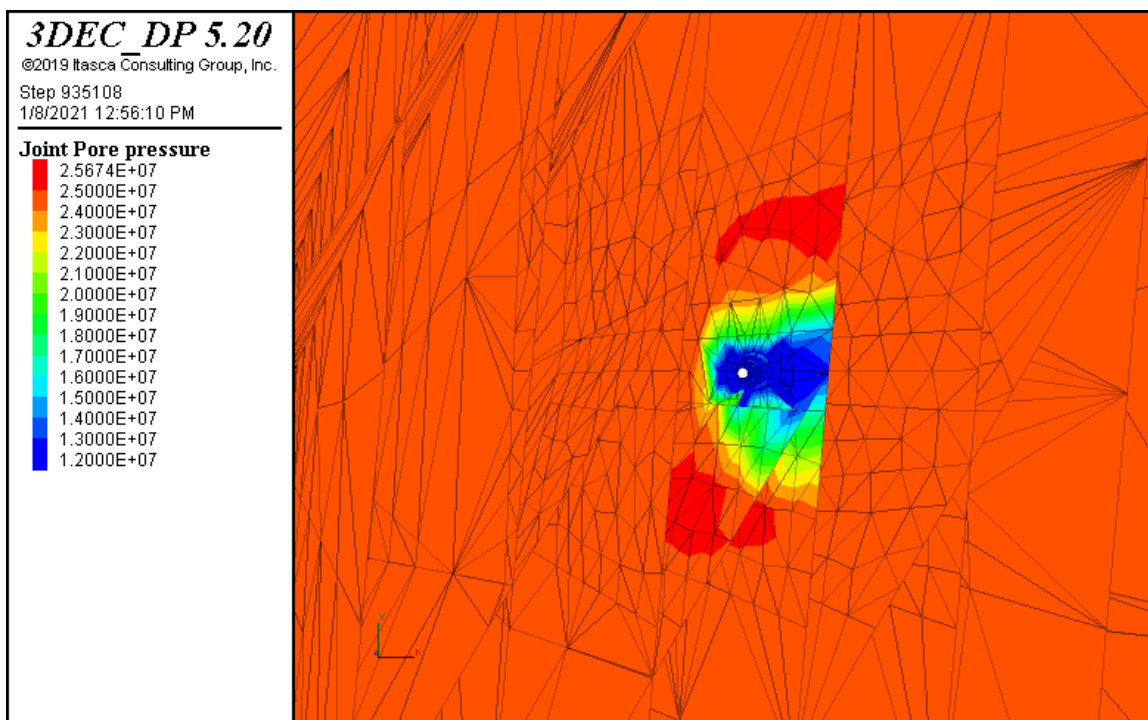
۵-۲-۱- فشار درون چاه ۱۲ مگاپاسکال

پس از حل مدل با فشار داخلی چاه برابر ۱۲ مگاپاسکال در زمان‌های ۱، ۳ و ۵ ثانیه نتایج توزیع فشارمنفذی و توزیع مقادیر بازشدگی هیدرولیکی در درزه‌ها استخراج شده است.

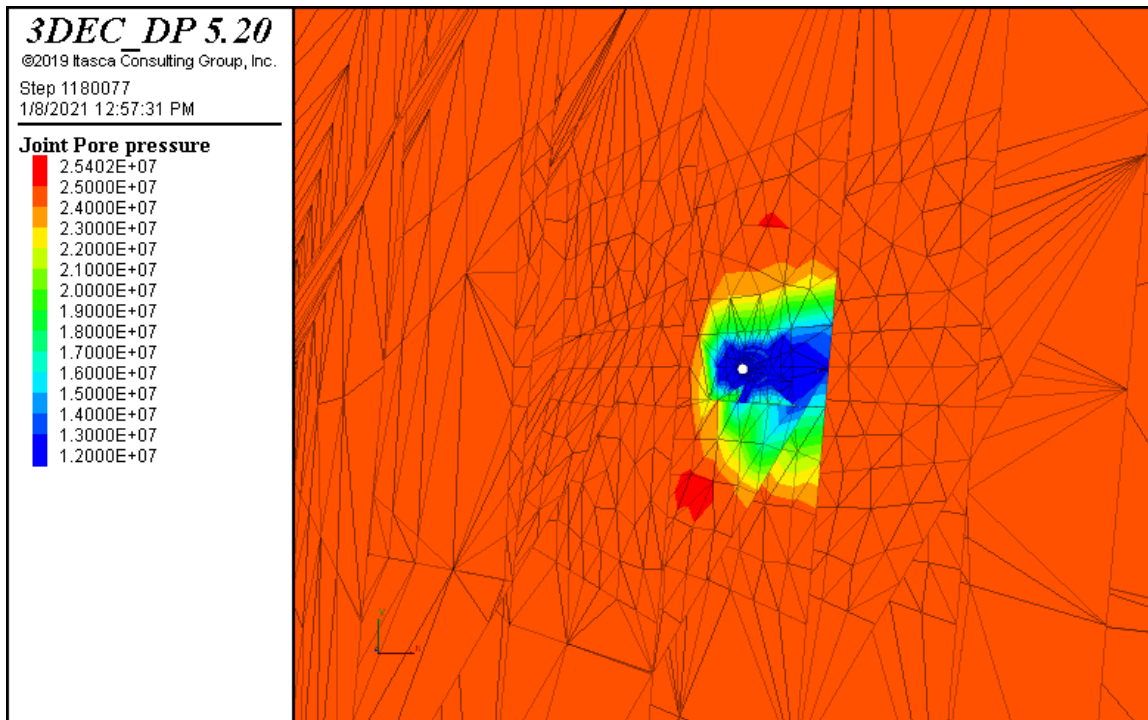
مطابق شکل (۴۴-۵) تا شکل (۴۶-۵) تغییرات فشارمنفذی در جهت عمود بر امتداد درزه نسبت به امتداد درزه افت بیشتری را نشان می‌دهد. این موضوع با گذشت زمان نیز کامل‌تر شده و تغییرات با همان الگوی اولیه رشد نموده است. در ارتباط با بازشدگی هیدرولیکی، مقادیر بازشدگی در اطراف چاه با تخلیه سیال کاهش یافته است (شکل (۴۷-۵) تا شکل (۴۹-۵)). رشد بازشدگی هیدرولیکی در امتداد درزه‌ها بیشتر از جهات دیگر است. اما در مقایسه با چاه شماره ۱ تغییرات بازشدگی هیدرولیکی در جهات دیگر نیز قابل ملاحظه است. در بررسی این موضوع و علت اختلاف‌ها، به تفاوت‌های موجود بین این دو چاه پرداخته شده است. در چاه شماره ۲ مقادیر فاصله‌داری درزه‌ها حدود ۰/۵ متر است. در این شرایط بلوک‌های ایجاد شده در بین درزه‌ها، بلوک‌های کوچک و زیادی خواهند بود. در زمان بهره‌برداری با توجه به کوچک بودن ابعاد بلوک‌ها، سیال از همه جهات اطراف بلوک‌ها خارج می‌شود. با خارج شدن سیال از اطراف بلوک‌ها فشارموثر افزایش یافته و درزه‌ها بسته می‌شوند. بر این اساس بسته شدن درزه‌ها در همه جهات دیده می‌شود و الگوی توزیع بازشدگی هیدرولیکی مشابه چاه شماره ۱ نمی‌باشد. با بررسی دقیق‌تر درزه‌های شماره ۱۰ و ۱۱ این موضوع بهتر دیده می‌شود. عدم توزیع یکنواخت و معنادار بازشدگی هیدرولیکی به خصوص در درزه شماره ۱۱ مؤید این موضوع است که در این حالت رفتار درزه‌ها به صورت مستقل قابل تفسیر نبوده و می‌بایست کل مدل به صورت یکجا مورد بررسی قرار گیرد. در خصوص تغییرات تراوایی ماتریکس، مشابه چاه شماره ۱ تغییرات فشار منفذی معیار بررسی قرار گرفته است (شکل (۶۲-۵) تا شکل (۶۴-۵)). طبق این اشکال توزیع فشار منفذی در اطراف چاه تقریباً متناسب با فاصله از دیواره چاه است. در بعضی از نقاط افت فشار منفذی در اطراف چاه با فاصله کم دیده می‌شود که متاثر از درزه‌ها است. همانطور که در خصوص تغییرات فشار منفذی درون درزه‌ها و ارتباط آن با فاصله داری آنها بحث شد استقلال عملکرد درزه‌ها در این حالت کم بوده و می‌بایست کل مدل را به صورت یکجا مورد بررسی قرار داد که این مهم در تغییرات فشار منفذی و و بالتبع تراوایی درون ماتریکس (شکل (۶۵-۵) تا شکل (۶۷-۵)) نیز دیده می‌شود.



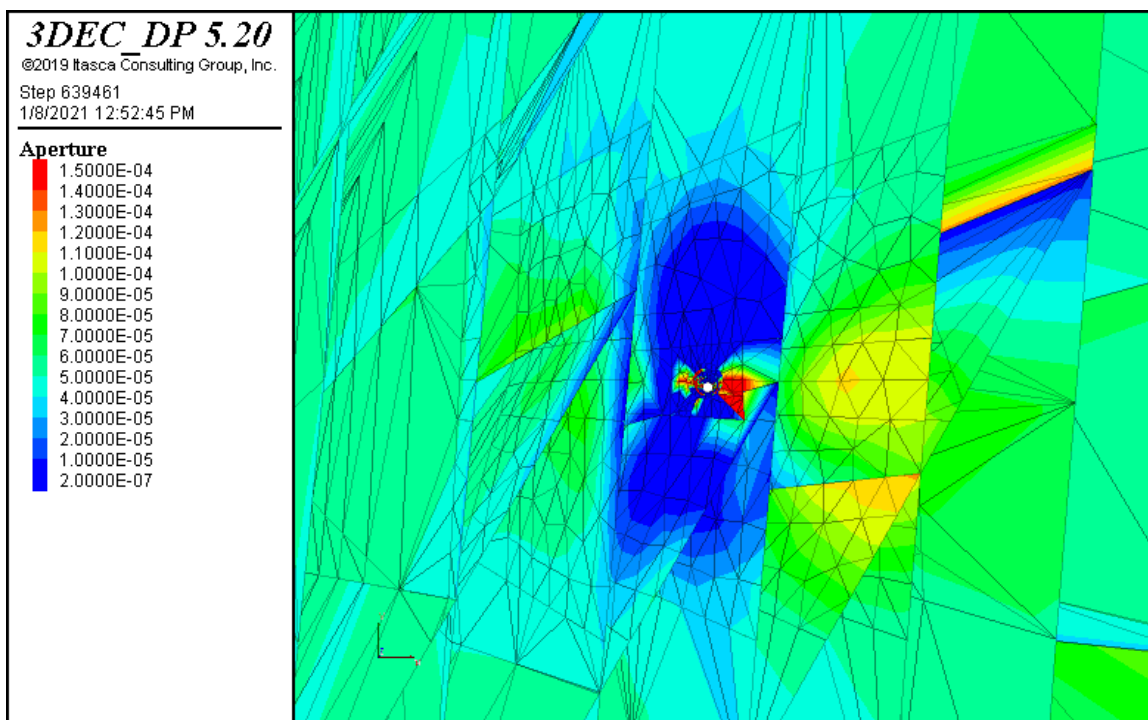
شکل (۴۴-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



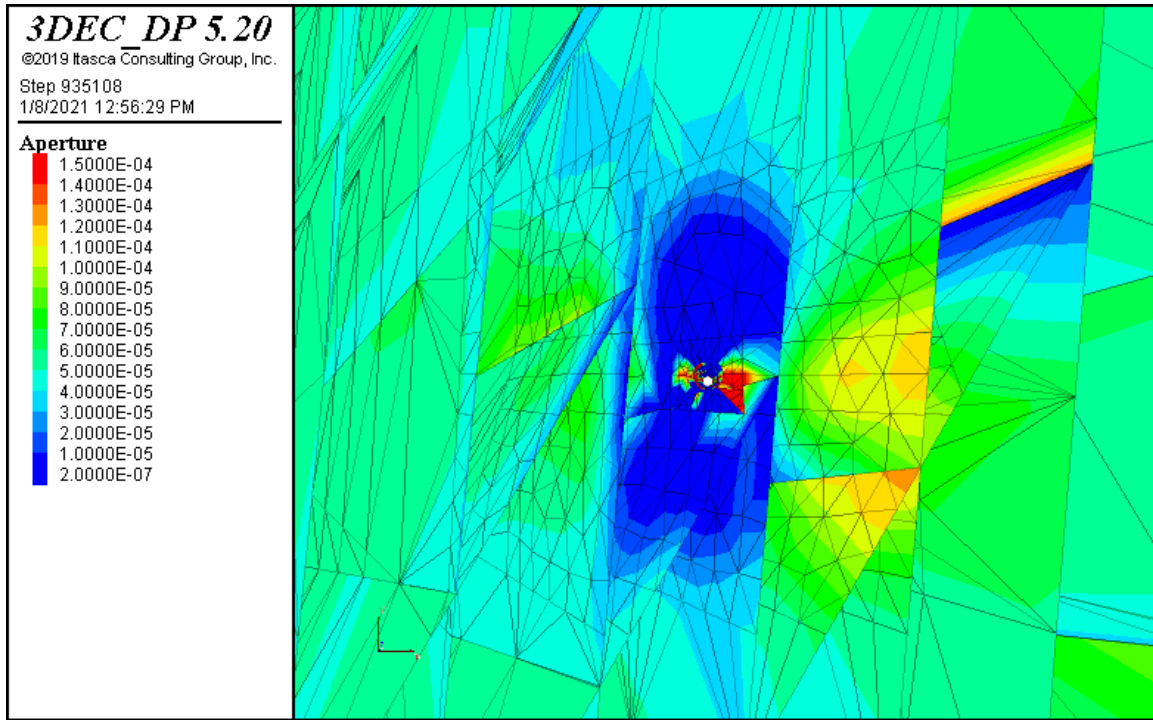
شکل (۴۵-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



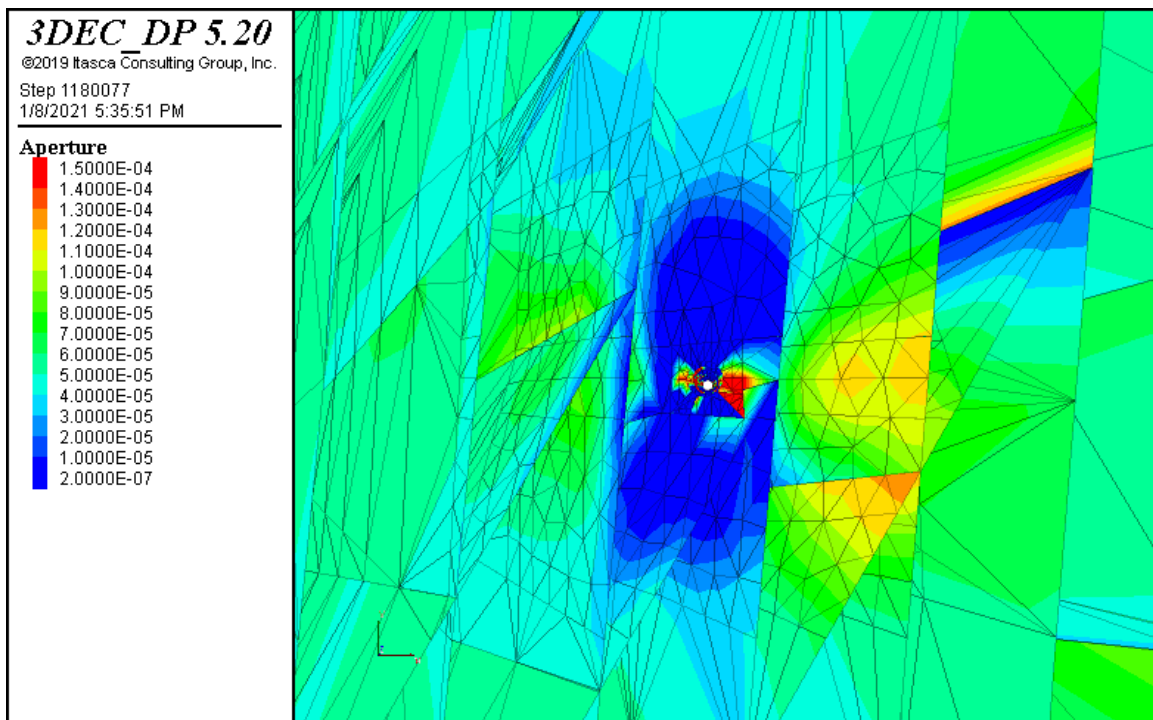
شکل (۴۶-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



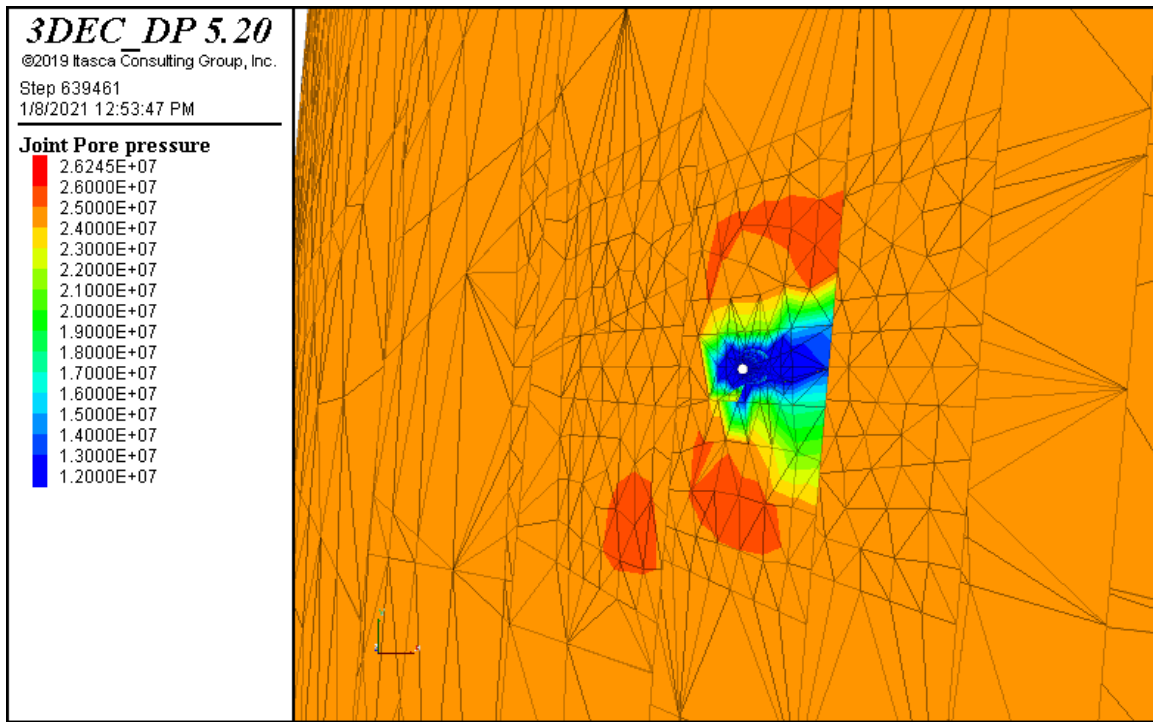
شکل (۴۷-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



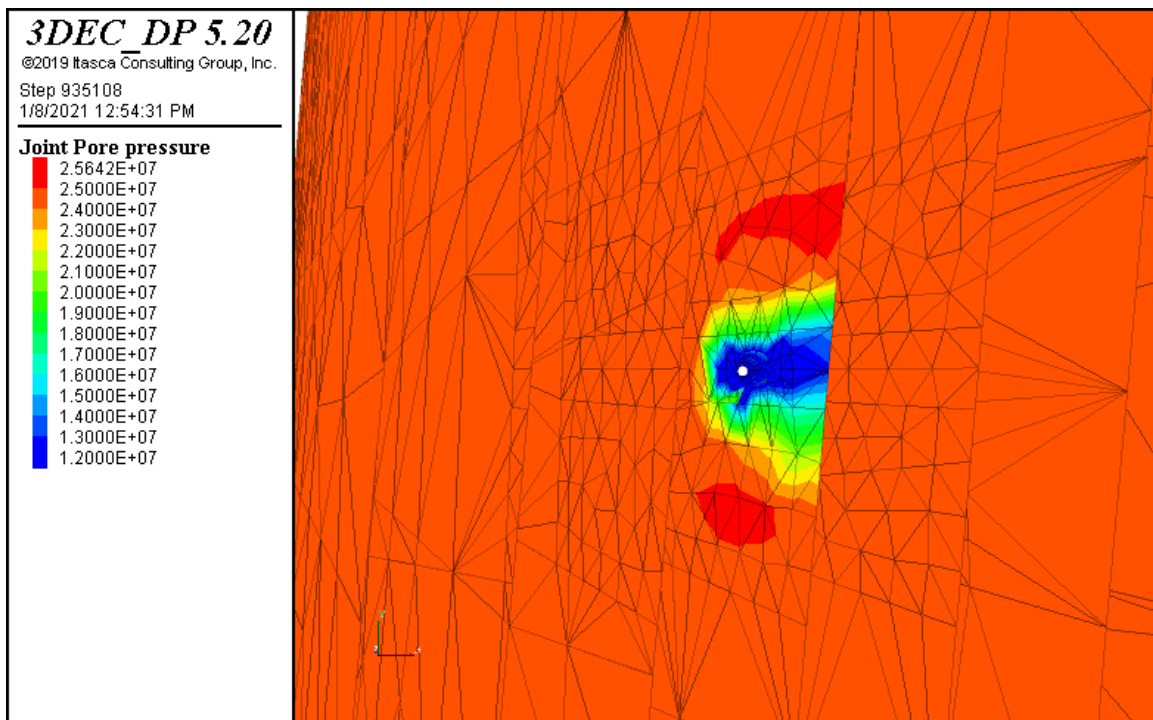
شکل (۴۸-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



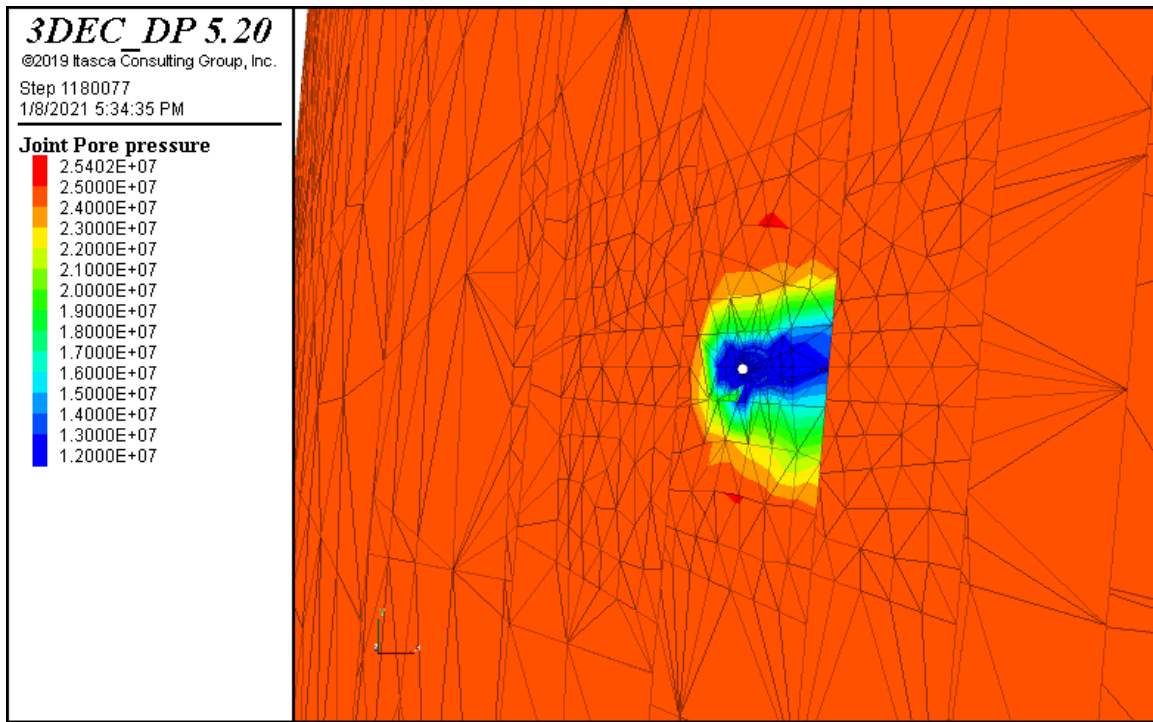
شکل (۴۹-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



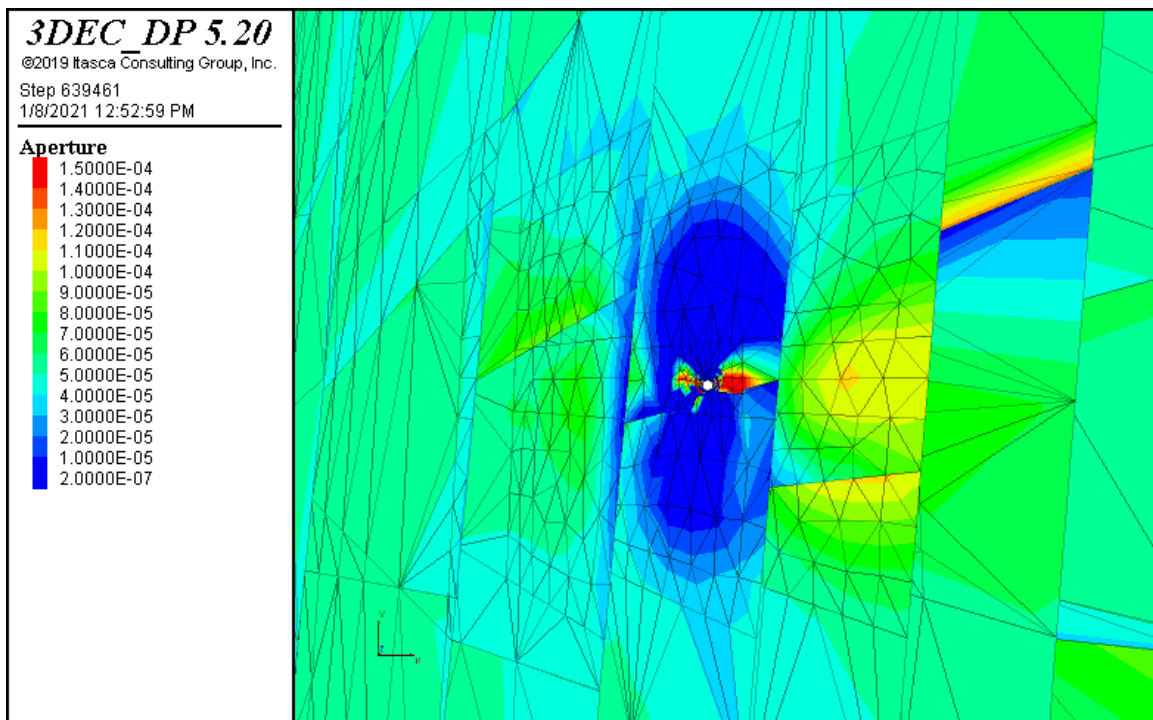
شکل (۵-۵) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



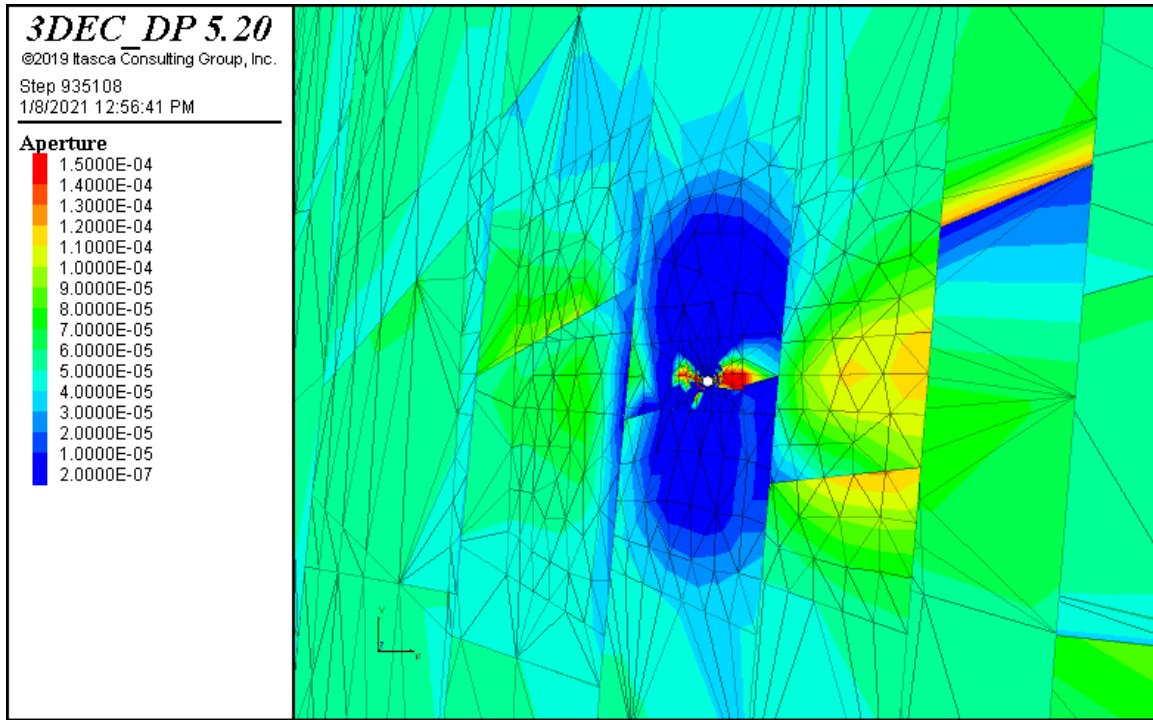
شکل (۵-۵) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



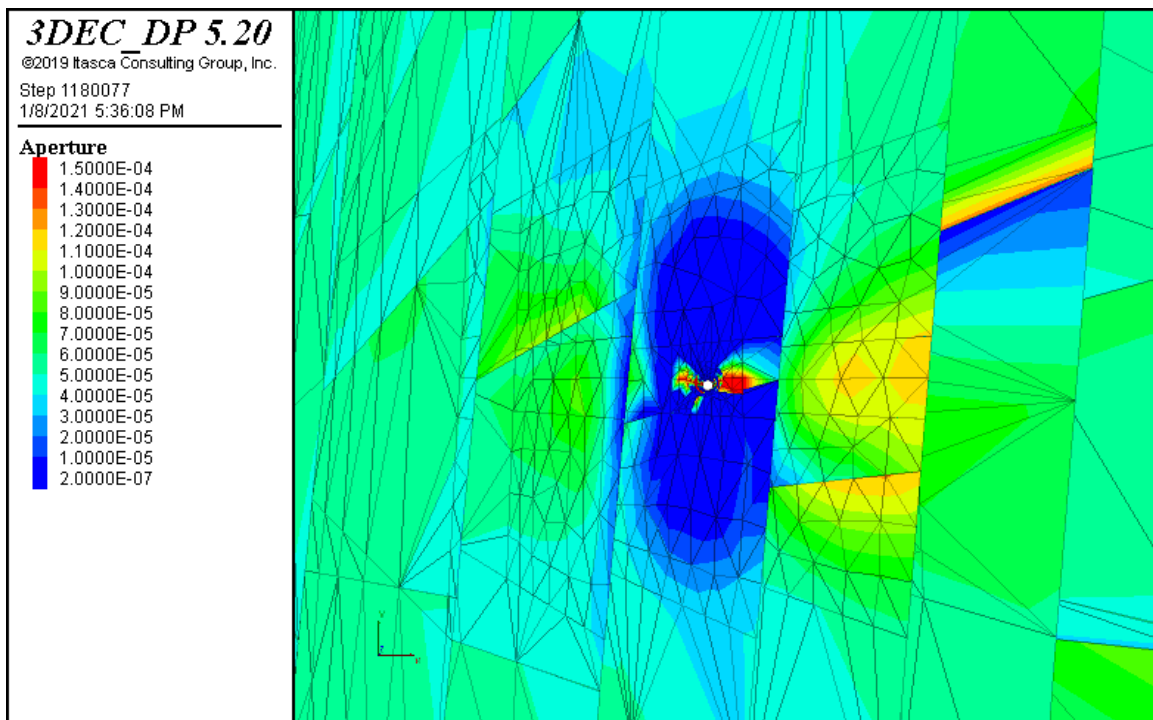
شکل (۵۲-۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



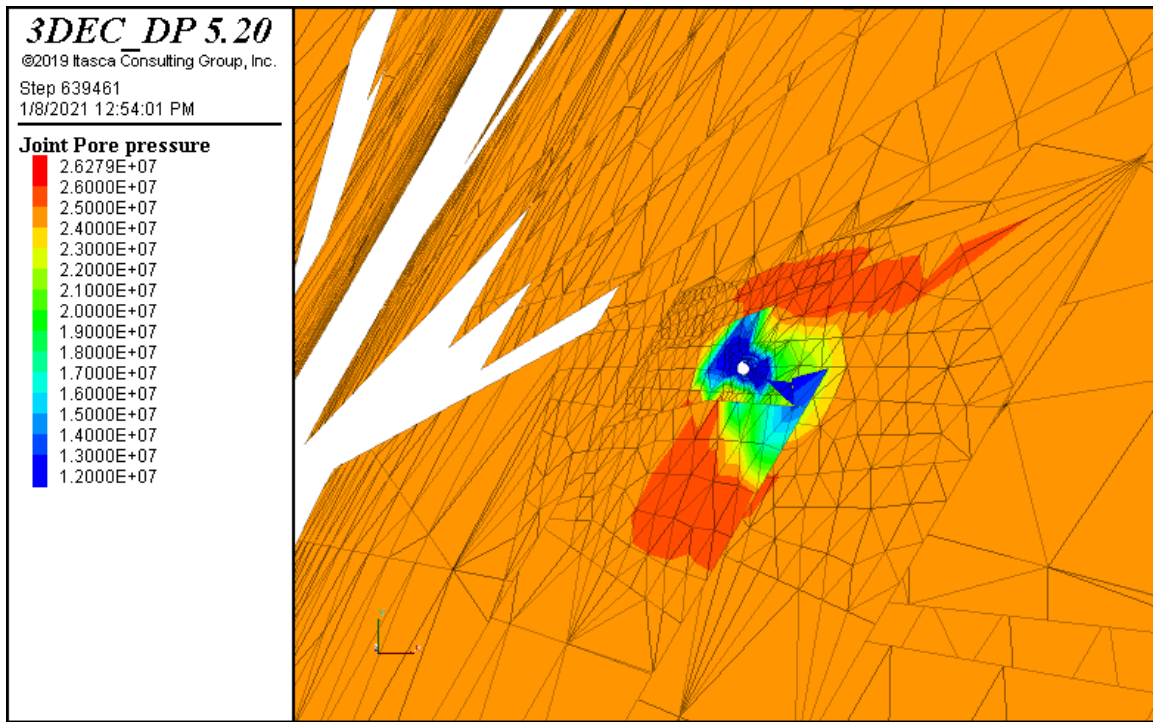
شکل (۵۳-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



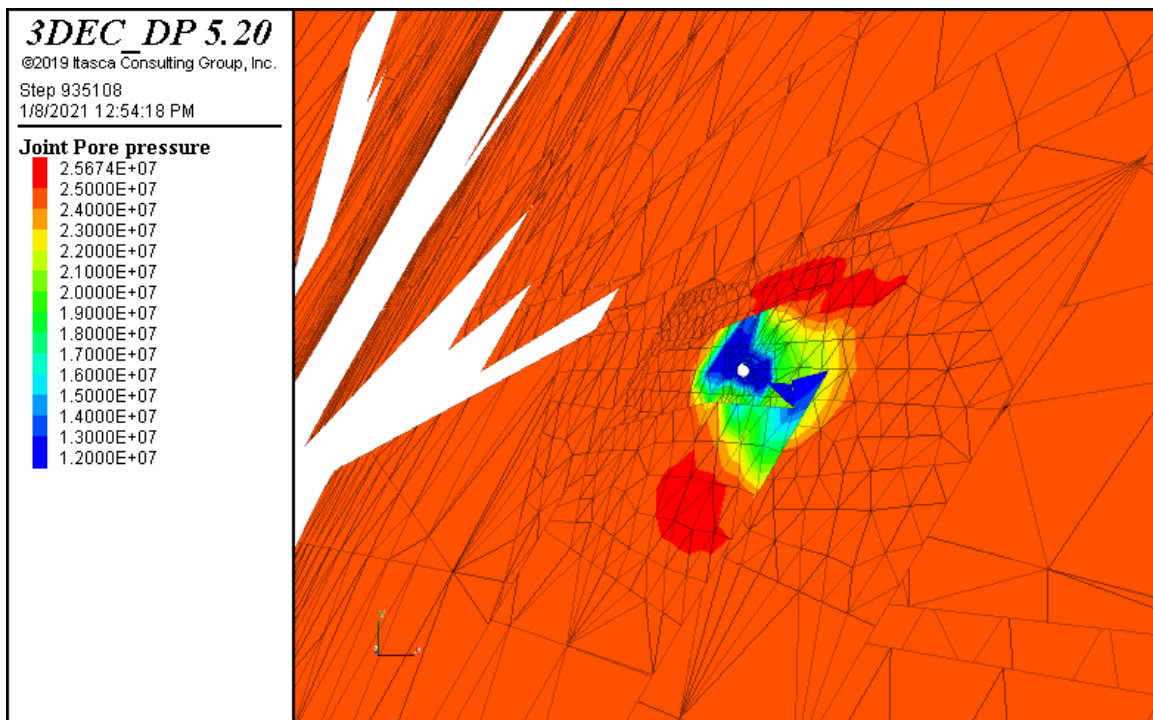
شکل (۵-۵۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



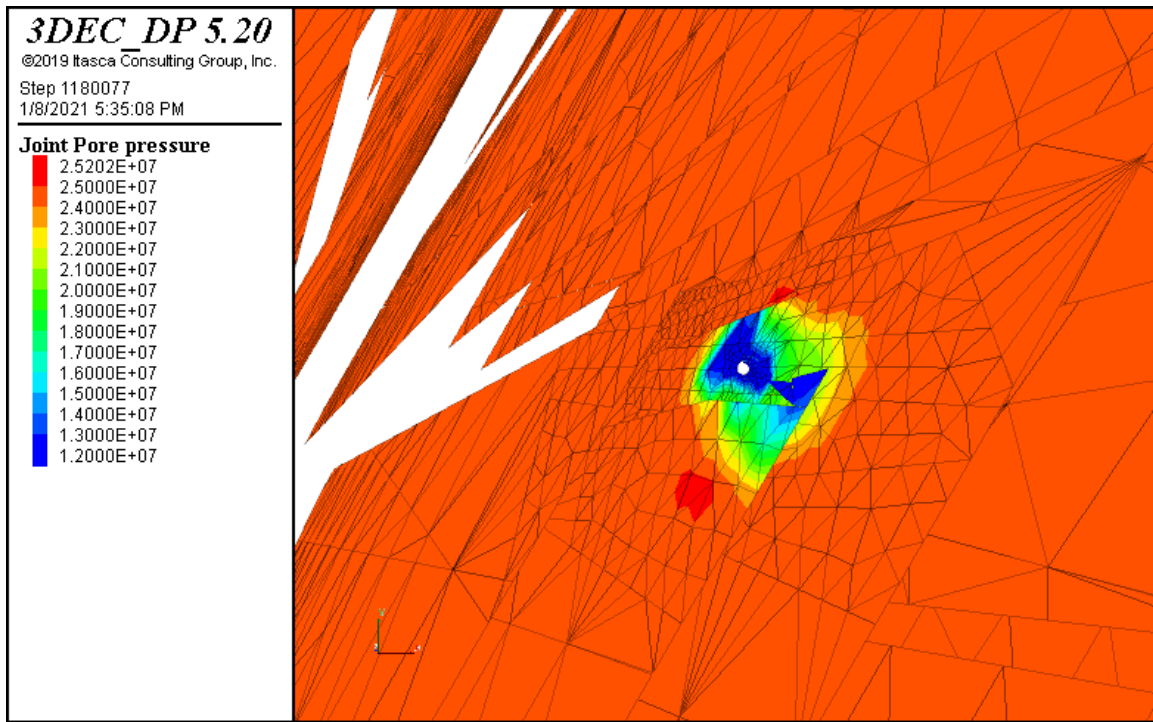
شکل (۵-۵۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۰.



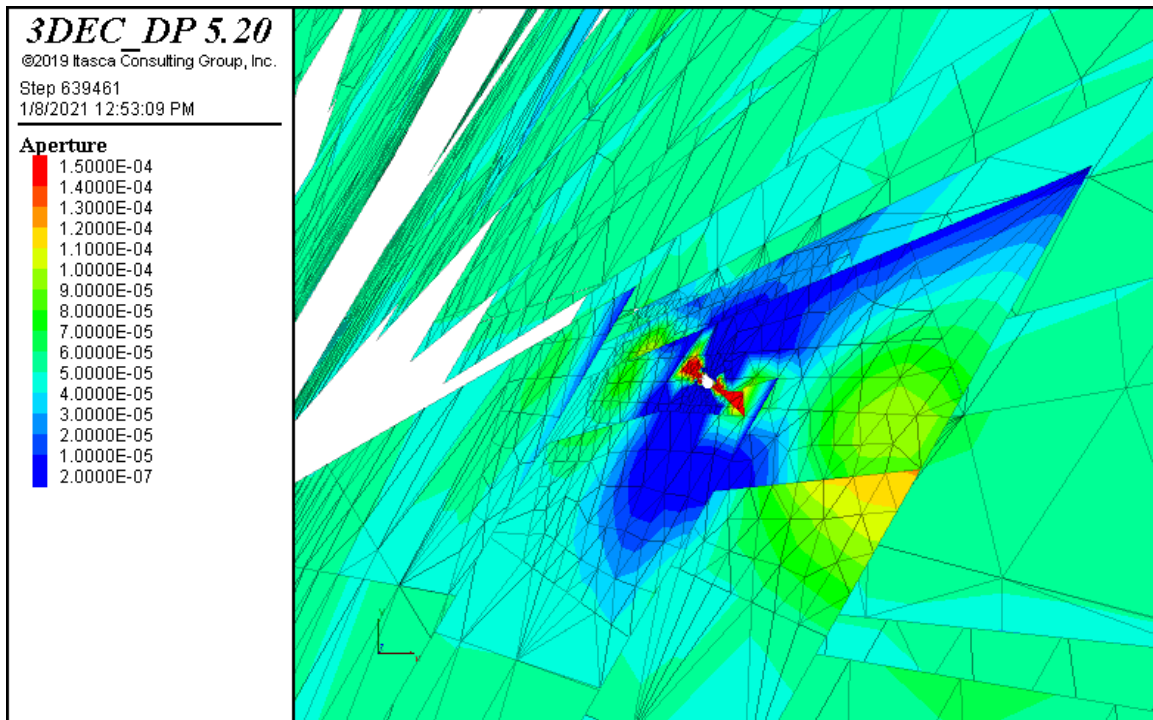
شکل (۵-۵۶) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



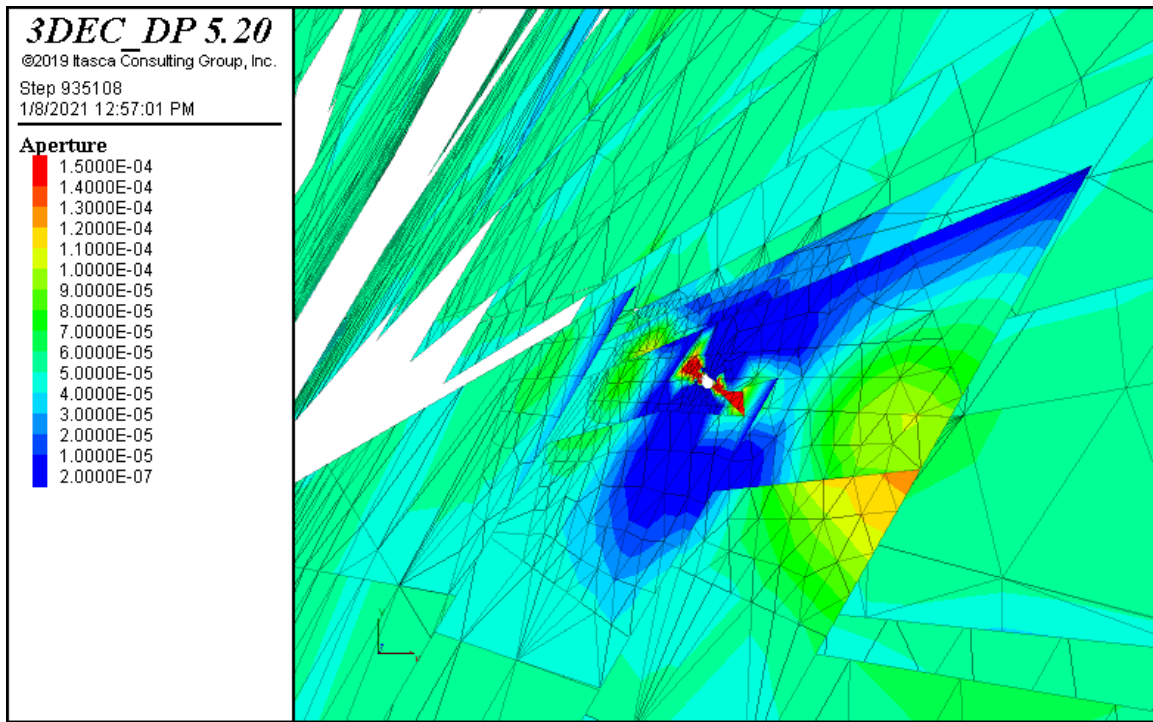
شکل (۵-۵۷) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



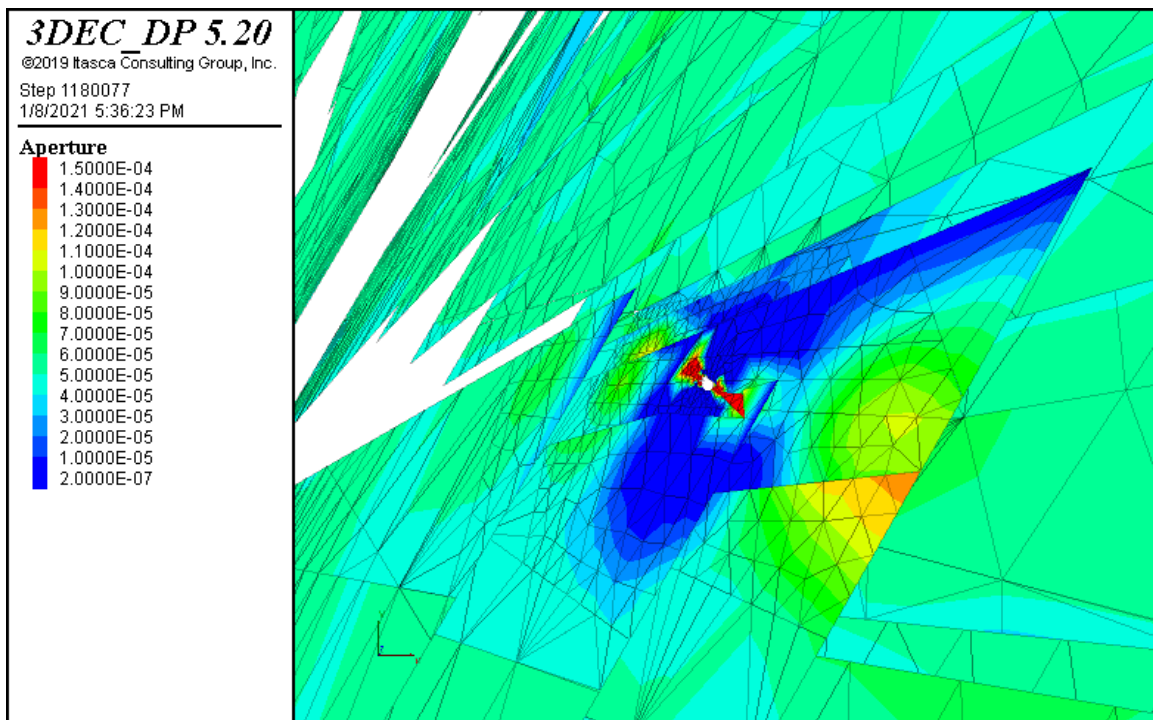
شکل (۵۸-۵) فشارمغذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



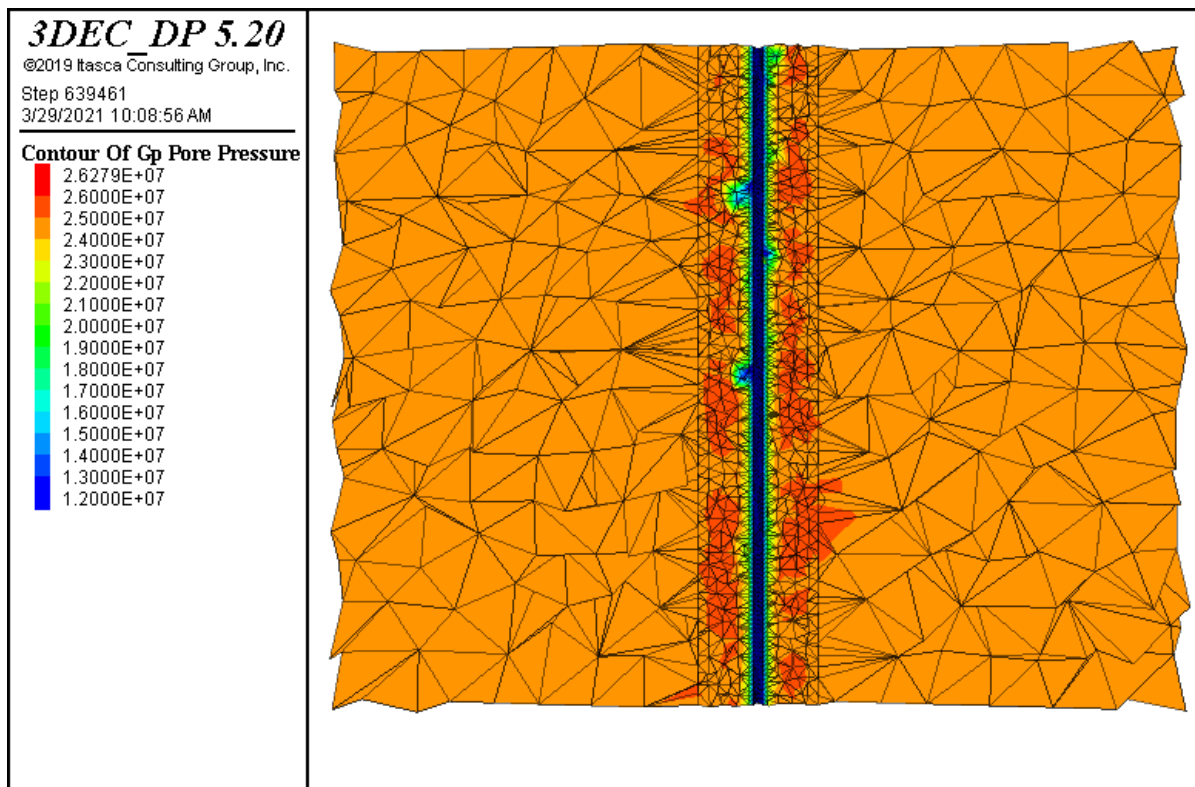
شکل (۵۹-۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



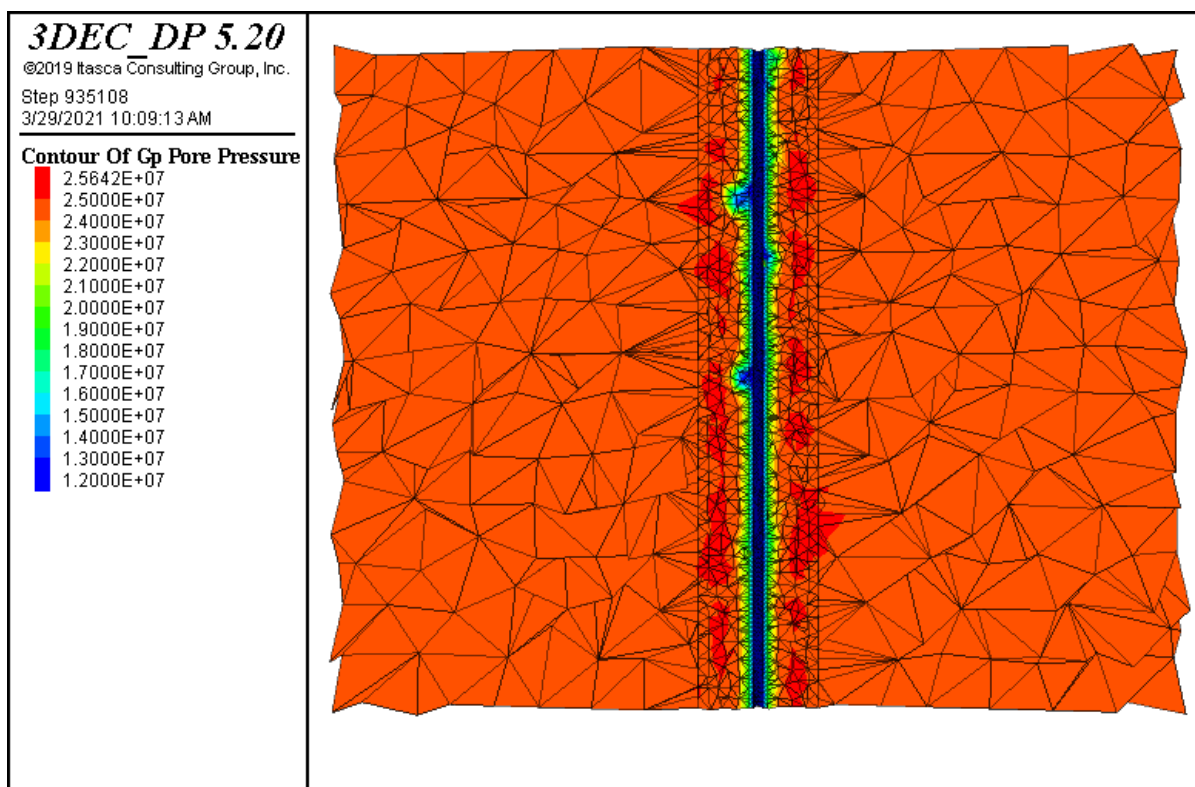
شکل (۵-۶۰) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



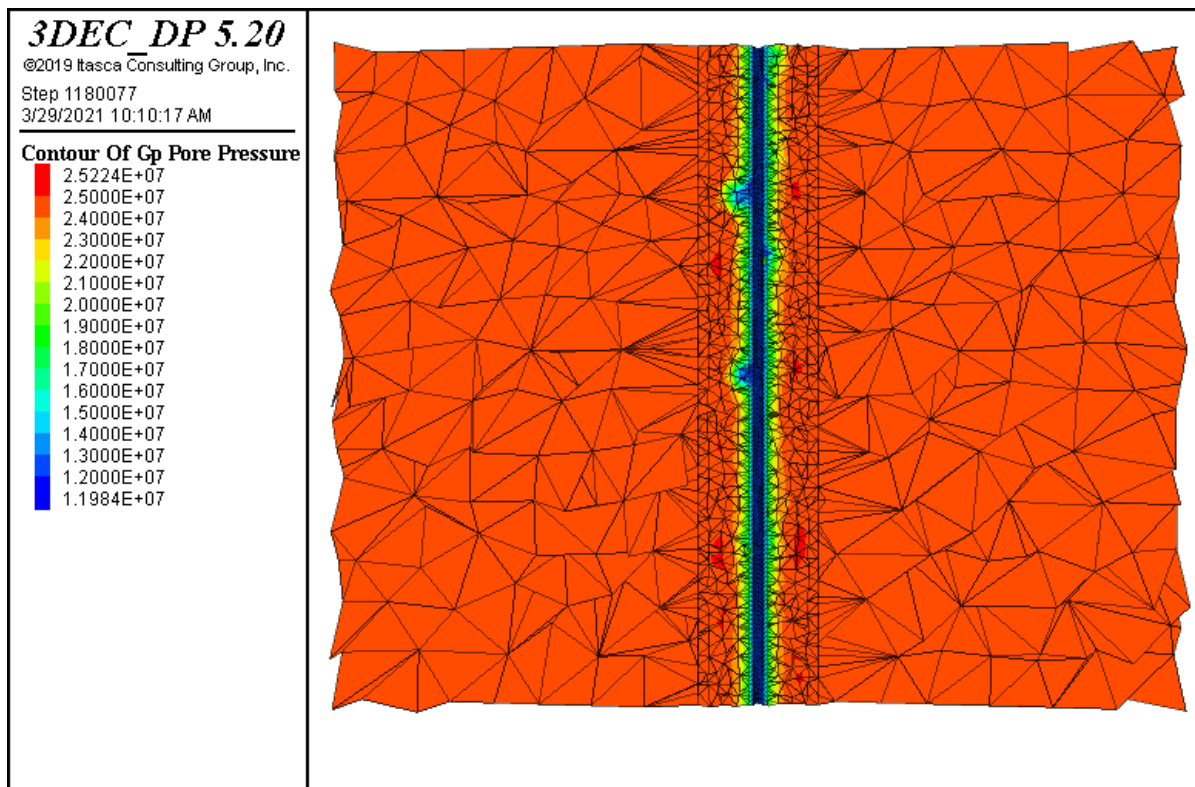
شکل (۵-۶۱) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل در درزه شماره ۱۱.



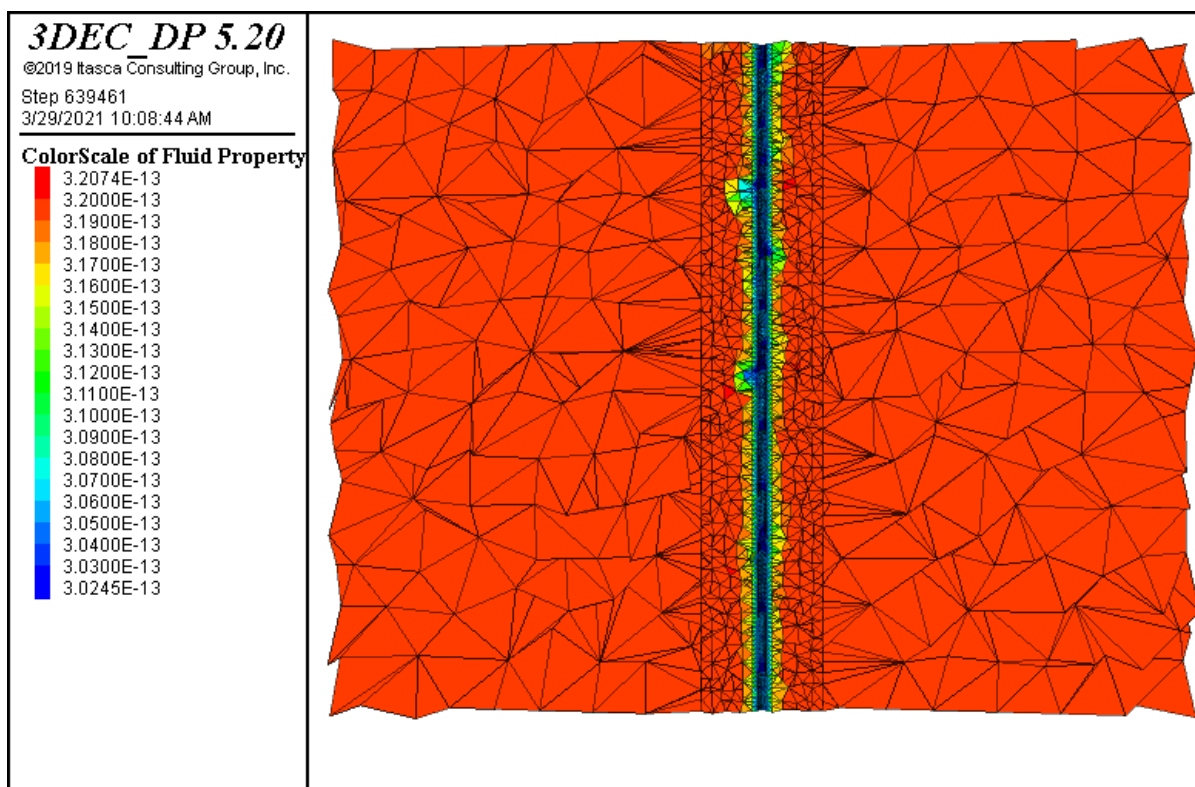
شکل (۶۲-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



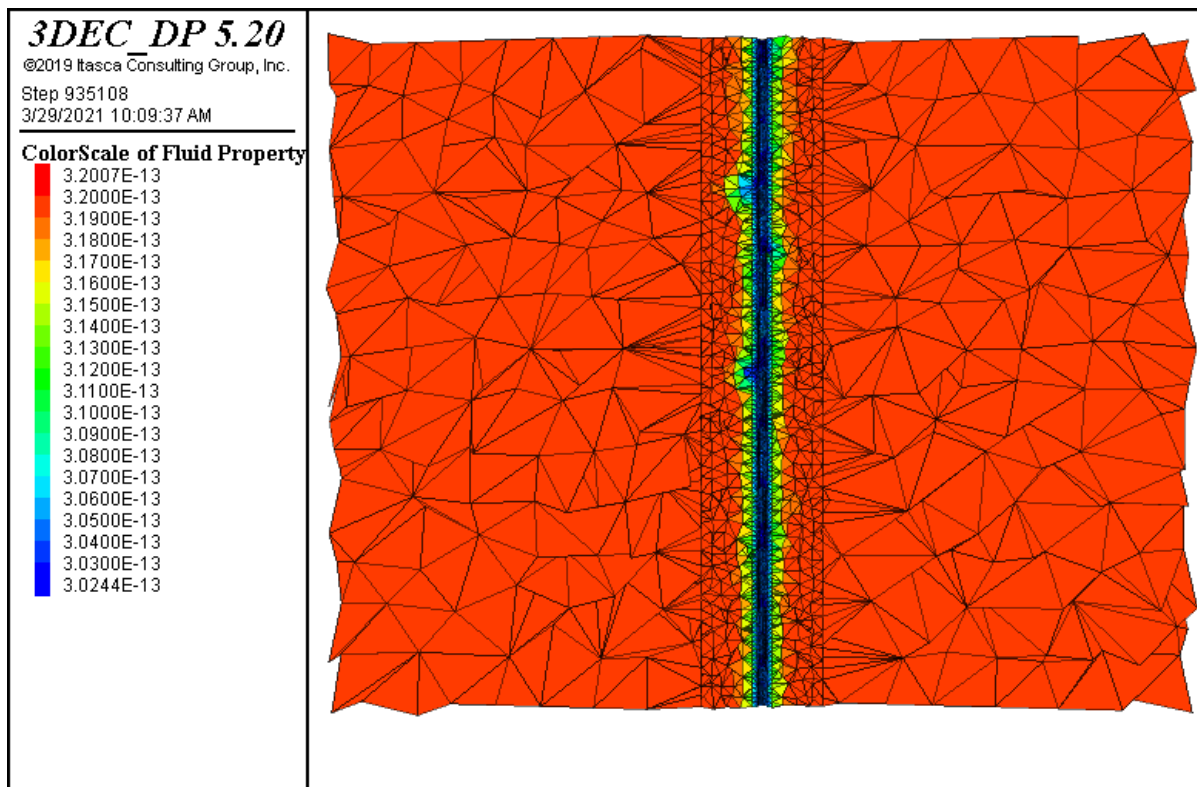
شکل (۶۳-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



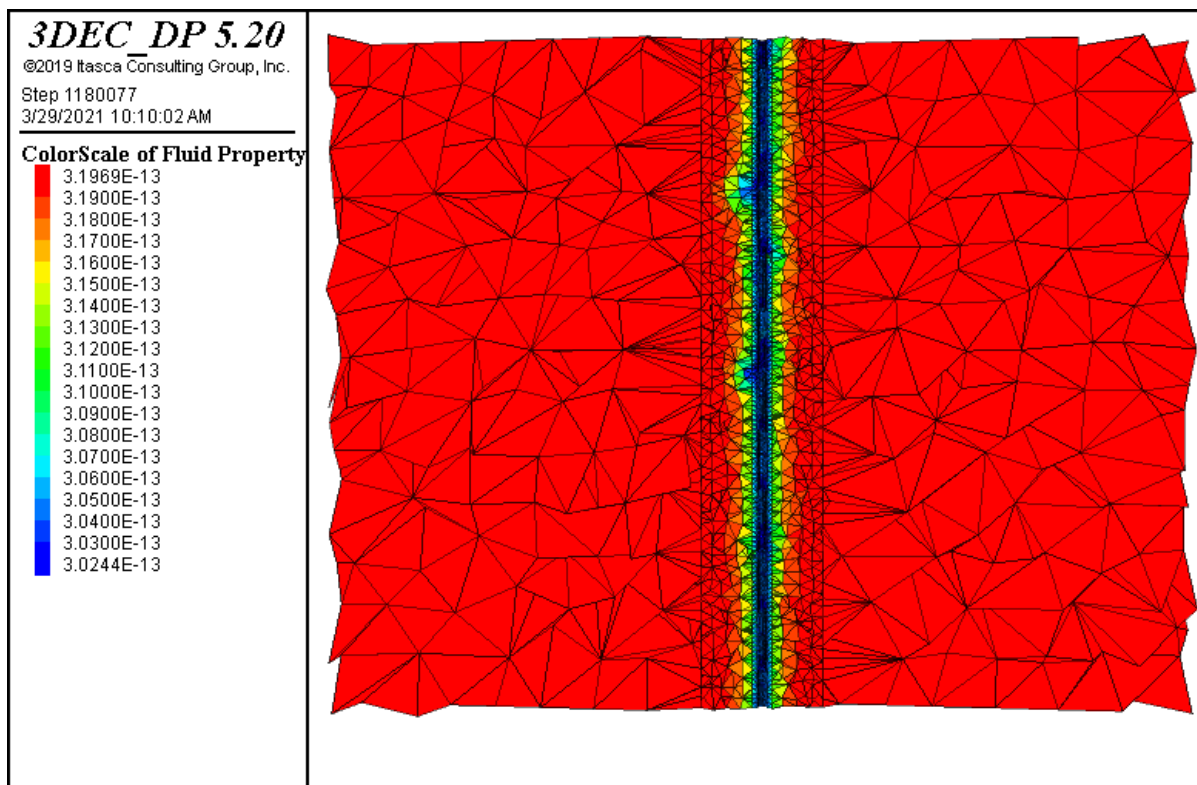
شکل (۶۴-۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



شکل (۶۵-۵) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

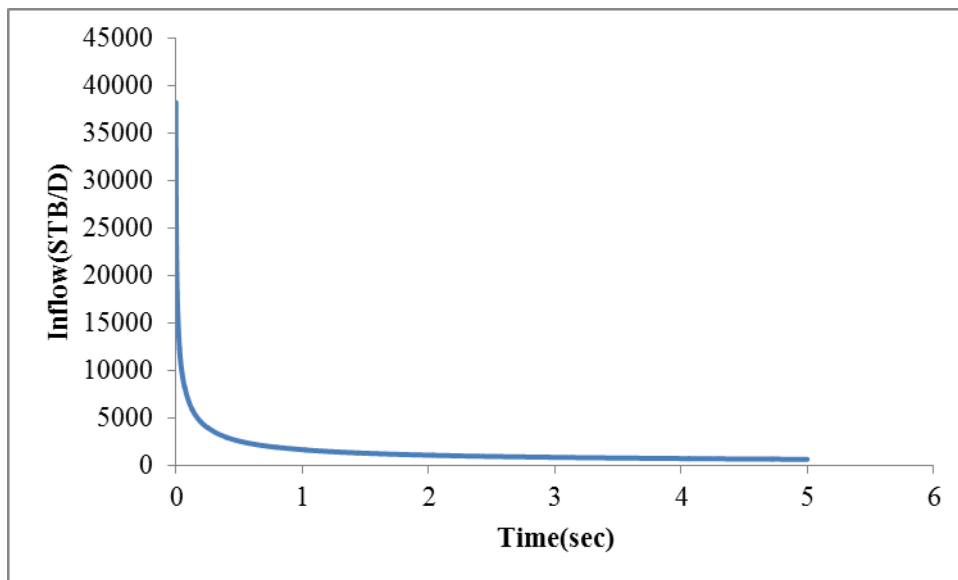


شکل (۵-۶۶) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از مدل در چاه شماره ۲.



شکل (۵-۶۷) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از مدل در چاه شماره ۲.

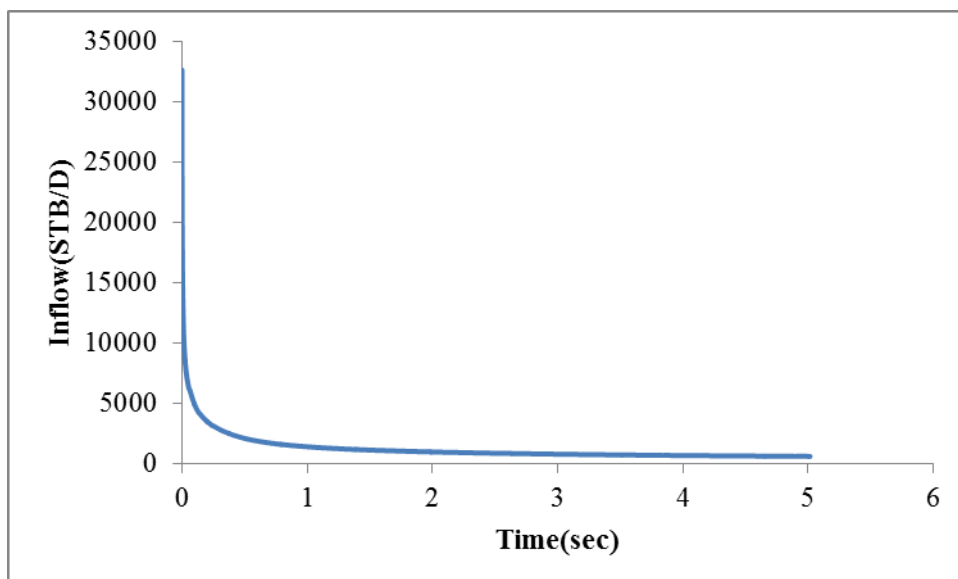
مقدار جریان وارد شده به چاه از طريق ماتريكس نسبت به جريان ورودی از درزهها حدود ۱ به ۵۷۳ می باشد. مقدار كل سیال ورودی به چاه در این حالت برابر ۷۰۰ بشكه در ۲۴ ساعت است. علت تفاوت زیاد بین سیال ورودی در این چاه نسبت به چاه شماره یک مقدار بازشدگی درزههای محدوده این چاه می باشد. مقادیر بازشدگی اولیه در چاه شماره یک نسبت به این چاه بزرگتر می باشد.



شكل (۵-۶۸) تغییرات جريان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۲ مگاپاسكال.

۵-۲-۲-۵- فشار درون چاه ۱۸ مگاپاسكال

با توجه به شباهت تغییرات فشارمنفدی و بازشدگی هیدرولیکی در درزهها در این حالت نسبت به حالت قبلی، از ارائه تصاویر مربوطه به لحاظ خلاصه نمودن اصل مطلب خودداری شده است. تصاویر مربوطه برای این حالت در پیوست از شکل (أ-۶۱) تا شکل (أ-۸۴) می باشد. مطابق اشکال مورد نظر روند تغییرات فشارمنفدی و بسته شدن درزهها در این حالت نیز مشابه حالتی است که فشار درون چاه ۱۲ مگاپاسكال می باشد، با این تفاوت که مقدار افت فشار و محدوده بسته شدن درزهها کمتر است ولی از نظر توزیع از همان الگو تبعیت نموده اند.

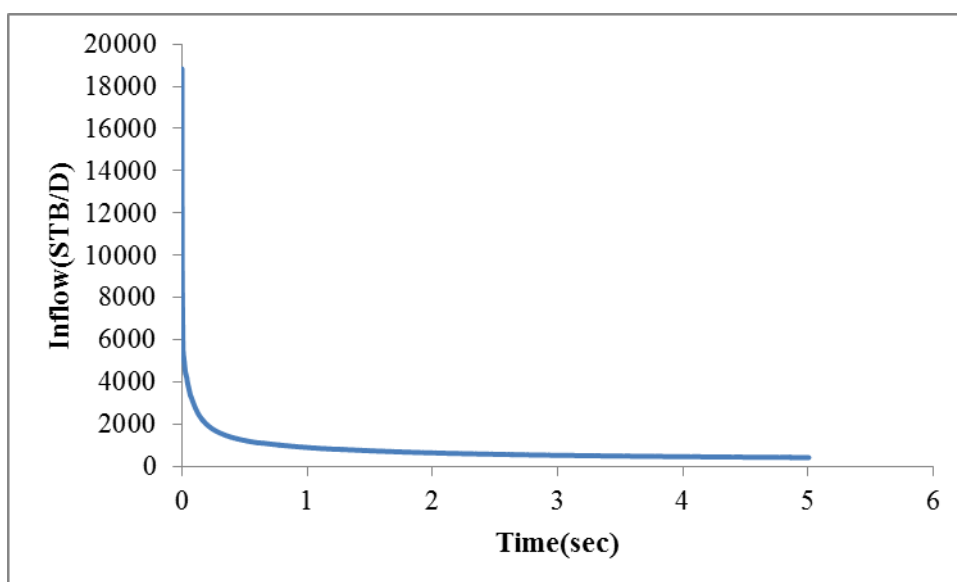


شکل (۵-۶۹) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۱۸ مگاپاسکال.

مقدار جریان وارد شده به چاه از طریق ماتریکس نسبت به جریان ورودی از درزه‌ها حدود ۱ به ۴۵۰ می‌باشد. مقدار کل سیال ورودی به چاه در این حالت برابر ۶۰۰ بشکه در ۲۴ ساعت است.

۵-۵-۲-۳- فشار درون چاه ۲۱ مگاپاسکال

با توجه به شباهت تغییرات در این حالت نسبت به حالت قبلی از ارائه تصاویر مربوطه به لحاظ خلاصه نمودن اصل مطلب خودداری شده است. تصاویر مربوطه برای این حالت در پیوست از شکل (۸۵-ا) تا شکل (۱۰۸-ا) می‌باشد. مطابق اشکال مربوطه روند تغییرات فشارمنفذی و بسته‌شدن درزه‌ها در این حالت نیز مشابه بخش قبلی است با این تفاوت که مقدار افت فشار و محدوده بسته‌شدن درزه‌ها کمتر است ولی از نظر امتداد همگی در یک جهت هستند.

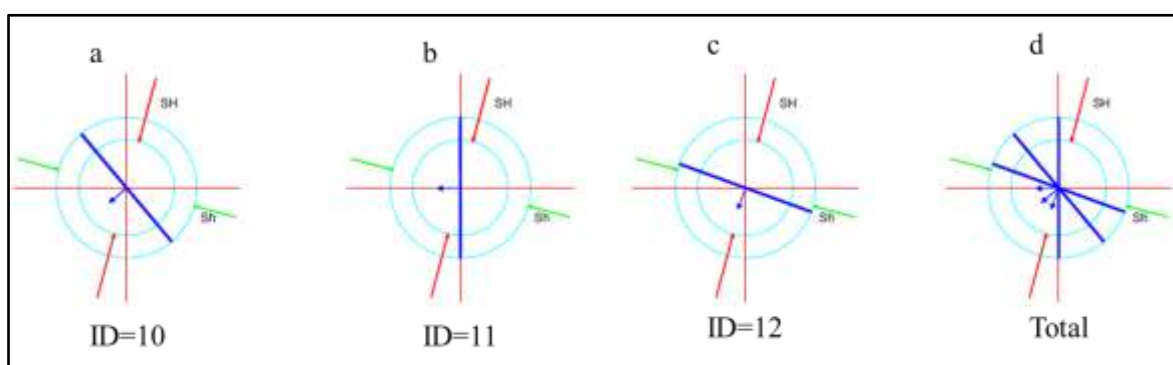


شکل (۵-۷۰) تغییرات جریان ورودی به چاه نسبت به زمان برای چاه شماره ۱ در حالت فشار داخلی ۲۱ مگاپاسکال.

مقدار جریان وارد شده به چاه از طریق ماتریکس نسبت به جریان ورودی از درزه‌ها حدود ۱ به ۴۵۰ می‌باشد. مقدار کل سیال ورودی به چاه در این حالت برابر ۴۵۰ بشکه در ۲۴ ساعت است.

۵-۶- جمع‌بندی

طبق آنچه در اشکال ارائه شده در مورد چاه شماره یک مشخص است مقدار فشار داخلی چاه یا فشار بهره‌برداری در تعیین الگوی بسته‌شدن درزه‌ها نقش زیادی نداشته و فقط در فشارهای بالا این فرایند در زمان‌های طولانی‌تر مشاهده می‌شود. به منظور بررسی علت بسته‌شدن درزه‌ها در یک امتداد (همه درزه‌ها در یک امتداد بسته شده‌اند) الگوی درزه‌ها نسبت به تنش‌های برجا مورد بررسی قرار گرفته است (شکل (۵-۷۱)).

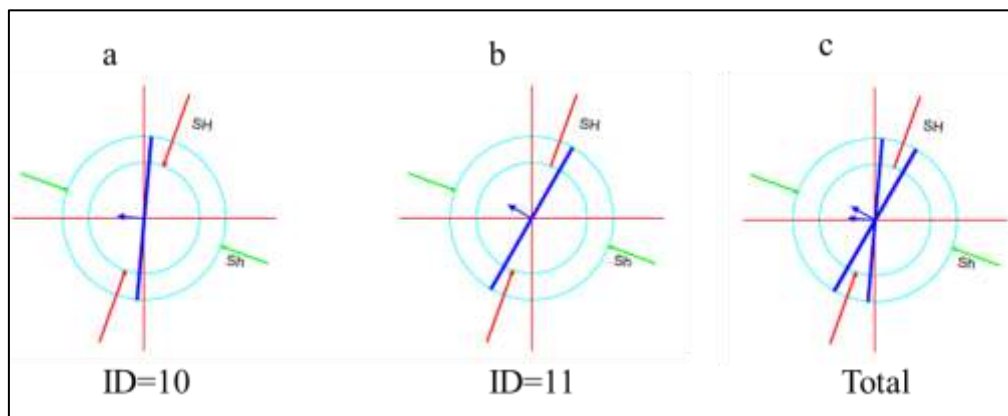


شکل (۵-۷۱) وضعیت تنش‌های اصلی نسبت به امتداد درزه‌ها در چاه شماره ۱.

طبق شکل (۵-۷۱) امتداد درزه شماره ۱۰ و ۱۱ تقریباً یکسان می‌باشد و با درزه شماره ۱۲ اختلاف حدود ۹۰ درجه‌ای دارد. در درزه‌های شماره ۱۰ و ۱۱ فشار غالب بر سطح درزه تنش افقی حداقل است ولی در درزه شماره ۱۲ تنش افقی حداکثر تأثیرگذار می‌باشد. در صورتی که اگر عامل اصلی بسته‌شدن

درزه‌ها تنش‌های برجا باشد، می‌بایست الگوی تغییر فشارمنفذی و بسته‌شدن درزه‌ها، در درزه شماره ۱۲ و ۱۱ به طور کامل متفاوت باشد. اما مشاهده می‌شود که تغییرات مد نظر تقریباً یک الگوی مشابه را نشان می‌دهند. بنابراین علت این موضوع را می‌بایست به عامل دیگری نسبت داد. در شکل (۵-۷۱) تصویر انتهایی سمت راست، همه درزه‌ها در یک نمودار نشان داده شده‌اند. طبق این شکل امتداد همه درزه‌ها در یک ربع دایره قرار دارد و حد فاصل آنها از نظر زاویه، کمتر از ۴۵ درجه می‌باشد. در نتیجه بنا به فرض اولیه تحقیق و مدل که رفتار محیط تراوایی دوگانه است، جریان سیال از ماتریکس به درزه انتقال می‌یابد و به سمت چاه جریان پیدامی‌کند. در ربع چهارم و دوم دایره حد فاصل درزه‌ها کم بوده و در نتیجه ماتریکس محصور به درزه‌ها در زمان کم جریان را به درزه منتقل کرده و فشارمنفذی آن کاهش یافته است. در نتیجه کاهش فشار درون درزه، درزه شروع به بسته‌شدن نموده است. اما در جهت دیگر، با توجه به شیب و امتدادهای متفاوت درزه، حجم ماتریکس بین درزه بیشتر شده است. بنابراین به علت حجم بیشتر ماتریکس و تعداد کمتر درزه محصور کننده، سیال درون ماتریکس دیرتر تخلیه می‌شود که سبب می‌شود افت فشار درون درزه در زمان طولانی‌تر حاصل شده و درزه‌ها دیرتر بسته شوند.

در ارتباط با چاه شماره ۲ نیز مشخص است که اکثر بسته‌شدگی درزه‌ها در جهت امتداد درزه‌ها رخ داده‌اند اما نسبت به درزه‌های چاه شماره ۱ در جهت عمود بر امتداد درزه نیز بسته‌شدن درزه‌ها قابل ملاحظه است. به منظور بررسی این رفتار مجدداً از نمودار مربوط به امتداد درزه‌ها و تنش‌ها استفاده شده است (شکل (۵-۷۲)).



شکل (۵-۷۲) وضعیت تنش‌های اصلی نسبت به امتداد درزه‌ها در چاه شماره ۲.

مطابق شکل (۵-۷۲) و با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد چاه شماره یک، اینکه رشد کاهش فشار درون درزه در امتداد درزه‌ها بیشتر باشد به دلیل تمرکز درزه‌ها در امتداد تنش بیشینه منطقی می‌باشد. اما همانطور که در بخش مربوطه بیان شد در این چاه کاهش فشار سیال در جهات دیگر نیز قابل توجه است. علت این امر را می‌توان در تأثیر فاصله درزه‌ها از یکدیگر بیان نمود. در درزه‌های چاه شماره یک

فاصله‌داری حدود ۲/۵ متر می‌باشد. در نتیجه صفحات مرزی بلوک شکل گرفته در این شرایط با هم فاصله دارند و تنها در محدوده بین دو درزه این بلوک‌ها به هم نزدیک و ابعاد آنها کوچک است اما در مورد چاه شماره ۲ چون فاصله‌داری درزه‌ها حدود ۰/۵ متر است تخلیه سیال از همه جهات بلوک انجام می‌شود. به عبارتی تخلیه سیال در یک بعد بلوک، سریعاً بر بعد مخالف نیز تأثیر می‌گذارد و باعث جابجایی سیال در آن بعد نیز می‌شود. این امر باعث می‌شود در جهات متفاوت سیال تقریباً با یک سرعت برابر تخلیه شود و نتیجه آن توزیع فشار منفذی یکسان و بسته‌شدن تقریباً یکسان درزه‌ها در همه جهات است. به طور کلی می‌توان بیان نمود با توجه به اینکه فاصله درزه‌ها کم می‌باشد محیط کلی یک محیط تقریباً پیوسته است. در نتیجه تفسیر این محیط بر اساس عملکرد دسته درزه‌ها به صورت کامل مشخص نمی‌باشد.

استفاده از رفتار تخلخل دوگانه باعث شده است که شرایط واقعی محیط اطراف یک چاه به خوبی نمایش داده شود. مدل‌سازی‌های انجام شده ثابت نمودند که استفاده از این مدل رفتاری می‌تواند شرایط اطراف چاه و رفتار هیدرومکانیکی محیط اطراف را به خوبی نشان دهد. انتقال سیال از ماتریکس به درزه و از طریق درزه‌ها به چاه و همچنین انتقال سیال از ماتریکس به چاه که در مدل‌سازی‌های انجام شده به خوبی دیده شده است، دقیقاً معادل فرضیات مدل‌سازی تخلخل دوگانه است. نکته مهم در این مدل‌سازی‌ها که امکان نمایش آن در مدل‌ها وجود نداشت بررسی اثر زبری درزه و اثر تراوایی ماتریکس جانبی بر رفتار سیال درون درزه به صورت میکروسکوپی است. اما همانطور که پیش‌تر بیان شد این موضوع با استفاده از نتایج فصل قبل به صورت یک کد نرم‌افزاری به مدل اعمال شده است. به عبارتی بازشدگی هیدرولیکی نشان داده شده در همه تصاویر، بازشدگی ناشی از اثر زبری و تراوایی ماتریکس جانبی است.

فصل ۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعه حاضر به منظور بررسی رفتار تراوایی دوگانه در مخازن کربناته شکافدار انجام شده است. این مطالعه در سه بخش مطالعه آزمایشگاهی، مطالعه عددی در مقیاس نمونه‌های آزمایشگاهی و مطالعه عددی در مقیاس مخزن انجام شده است.

در بخش مطالعه آزمایشگاهی رفتار غیرخطی سیال با فرض ناتراوا بودن محیط اطراف به خوبی نشان داده شد. به علت محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان بررسی اثر تراوا بودن محیط اطراف درزه و تأثیر آن بر رفتار سیال درون درزه ممکن نشد. به همین سبب از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS FLUENT استفاده شد. در فصل ۵ با استفاده از نتایج فصل‌های ۳ و ۴ مدل عددی رفتار توامان هیدرومکانیک محیط و سیال اطراف چاه مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- ۱- ثابت فرض نمودن تراوایی ماتریکس سنگ در شبیه‌سازی‌ها صحیح نبوده و بسته به شرایط تنشی و فشارمنفذی تراوایی سنگ تغییر می‌کند. طبق مطالعات نشان داده شد که مقدار کمی تراوایی تابعی تمام‌لگاریتمی برحسب تنش موثر اعمالی بر ماتریکس سنگ است. اعمال این رابطه در مدل‌سازی‌های عددی رفتار سیال را به صورت واقعی‌تر نشان می‌دهد.
- ۲- مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی به خوبی نشان داده‌اند که رفتار سیال درون درزه‌بسته (matted joint) در مجاورت ماتریکس تراوا، رفتار غیرخطی است و معادله فورچمیر رفتار سیال را در این شرایط به خوبی نشان می‌دهد.
- ۳- افزایش سطح اتصال صفحات درزه باعث افزایش ضرایب خطی و غیرخطی معادله فورچمیر می‌شوند، تغییرات این ضرایب برحسب مقدار سطح اتصال درزه به صورت نمایی با هم مرتبط می‌شوند. هر چه سطح اتصال بیشتر شود ضرایب معادله نیز به صورت نمایی افزایش می‌یابد.
- ۴- در صورت تراوا بودن محیط اطراف درزه امکان تبادل سیال بین درزه و ماتریکس وجود خواهد داشت که این موضوع به شدت در رفتار سیال درون درزه تأثیرگذار است.
- ۵- در شرایطی که رفتار تخلخل دوگانه برای محیط در نظر گرفته شود و امکان تبادل سیال بین درزه زبر و متصل و محیط مجاور تراوا وجود داشته باشد، با فرض اینکه معادله جریان سیال درون محیط تراوا و درزه به ترتیب معادله دارسی و معادله ناپیراستوک باشد، رفتار سیال درون درزه با محیط مجاور تراوا همچنان غیرخطی بوده و این رفتار تابع معادله فورچمیر است.
- ۶- در شرایط رفتار تخلخل دوگانه برای درزه زبر با محیط مجاور تراوا، افزایش تراوایی محیط مجاور باعث کاهش رفتار غیرخطی می‌شود. هر چه محیط مجاور تراوایی بیشتری داشته باشد نسبت

اختلاف فشار به نرخ جریان عبوری کاهش می‌یابد. به عبارتی تراوایی محیط مجاور باعث عبور سیال بیشتری در درزه می‌شود.

۷- استفاده از رفتار تراوایی دوگانه نشان داد که فرض ذخیره شدن سیال درون ماتریکس و انتقال آن به چاه هم از ماتریکس و هم از درزه صحیح می‌باشد. مقدار جریانی که به صورت مستقیم از ماتریکس به چاه وارد می‌شود نسبت به مقداری که از ماتریکس به درزه و نهایتاً به چاه می‌رسد ناچیز است. علت این موضوع نیز محدود بودن سطح ماتریکس در محیط چاه است. در محدوده مخزن که سطح اتصال ماتریکس و درزه زیاد است، سیال کم‌کم به درزه وارد شده و نهایتاً یک حجم زیاد سیال از طریق درزه به چاه می‌رسد. به طور خلاصه کل سیال ورودی از درزه به چاه در ابتدا از ماتریکس به درزه و سپس از طریق درزه به چاه منتقل شده است.

۸- طبق معادلات تراوایی دوگانه (و همچنین مائول Leak-off در نرم‌افزار 3DEC) تبادل سیال از درزه به ماتریکس و بالعکس در کل حجم مدل قابل انجام است. از آنجاکه همواره قابلیت انتقال سیال در درزه بیشتر از ماتریکس است، در مدل عددی 3DEC انتقال سیال از درزه به ماتریکس اتفاق نمی‌افتد ولی این مهم در محدوده نزدیک درزه رخ می‌دهد که در مدل‌سازی ANSYS FLUENT به خوبی دیده شده است. در نتیجه در واقعیت در حین بهره‌برداری انتقال سیال از درزه به ماتریکس و بالعکس انجام می‌شود.

۹- با توجه به رفتار تراوایی دوگانه، در امتدادی که تمرکز درزه‌ها بیشتر است حجم ماتریکس ذخیره‌کننده سیال بین درزه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. در هنگام خروج سیال از چاه، با توجه به گذردهی بالای درزه، سیال بیشتری از این محدوده خارج شده که فشار سیال را کاهش می‌دهد. کاهش فشار سیال باعث افزایش فشار موثر شده و بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی درزه در این جهات کاهش پیدا می‌کند.

۱۰- هر چه فاصله درزه‌ها بیشتر باشد اثر امتداد درزه‌ها و تمرکز آن بر خروج سیال بیشتر نمود دارد. در چاه‌هایی با فاصله درزه‌های کم رفتار سیال تقریباً شبیه رفتار محیط پیوسته می‌باشد و اثر درزه به صورت دقیق مشخص نیست. در صورت استفاده از محیط معادل بسته‌شدن درزه و کاهش تراوایی محیط مجاور می‌بایست لحاظ شود.

۱۱- با توجه به نتایج بدست‌آمده از مدل‌سازی چاه‌های مورد نظر و توضیحات بند قبلی، توسعه حفاری چاه‌های جدید در مخزن در محیط‌های بلوکی (فواصل درزه‌ها زیاد) در جهت عمود بر امتداد غالب درزه‌ها باید انجام شود.

۲-۶- پیشنهادات

در مطالعه حاضر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و زمانی، امکان بررسی چندمورد که می‌تواند در تکمیل شناخت دقیق‌تر اثر زبری بر تراوایی در مخازن شکافدار کمک‌کننده باشد فراهم نشده است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی این موارد تحقیق و مطالعه شوند:

- ۱- اندازه‌گیری سیال ورودی به درزه از طریق ماتریکس و بالعکس در آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی و آنالیز آن نسبت به زبری و بازشدگی مکانیکی در مقیاس آزمایشگاهی
- ۲- اثر ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی بر رفتار سیال درون درزه در مجاورت محیط متخلخل تراوا
- ۳- بررسی تعداد زیادی نمونه‌های زبر به منظور بررسی اثر زبری بر رفتار سیال
- ۴- آنالیز حساسیت اثر امتداد درزه‌ها و تنش‌های اصلی بر رفتار تراوایی دوگانه
- ۵- تعیین معیاری برای انتخاب محیط ناپیوسته و پیوسته در مدل‌سازی مخازن شکافدار

منابع و مراجع

Aigerim R An Experimental Investigation on the Transport Characteristics of Rough Fractures in the Presence of Proppants [Report]. - [s.l.]: Master of science thesis in Petroleum Engineerin, 2015.

Abdassh D and Ershaghi I Triple Porosity Systems for Representing Naturally Fractured Reservoirs [Journal] // SPE. - 1986.

Afsari M. [et al.] Mechanical Earth model (MEM): an effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (Case Study) [Journal]. - [s.l.] : SPE Middle East Oil and Gas Show and Conferences, 2009.

Alam A.K.M Badrul [et al.] Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression [Journal] // Int J of Rock Mechanics&Mining Sci. - 2014.

Andrianov N and Nick H Modeling of waterflood efficiency using outcrop-based fractured models [Journal] // J. Pet. Sci. Eng. - 2019.

Argawal B [et al.] Reservoir Characterization of Ekofisk Field: A Giant Fractured Chalk Reservoir in the Norwegian North Sea – History Match [Conference] // SPE 51893. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers, 2000.

Arona M., Arihara N. and Ramey H.J. Jr. The Effect of Temperature and Stress on the Absolute Permeability of Sandstones and Limestones [Conference] // American Nuclear Society Topical Meeting Golden CO. - 1977.

Babadagli T and Ren X Effects of fractal surface roughness and lithology on single and multiphase flow in a single fracture: An experimental investigation [Journal] // International Journal of Multiphase Flow. - 2015.

Barton N Review of a new new shear strength for rock joint [Journal] // Engineering Geology. - 1973.

Belharche M Identification, Characterization and Stochastic Modeling of Naturally Fractured Reservoir Validated by Simulation Model – Case Study: Zone 24 of Hassi Messaoud Field [Report]. - [s.l.]: Master Thesis, the University of Oklahoma, Norman, 2005.

Bernabe Y The Effective Pressure Law for Permeability in Chelmsford Granite and Barre Granite [Journal] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. - 1986.

Berre I, Doster F and Keilegavlen E Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches [Journal] // Transport in Porous Media . - 2019. - pp. 215–236.

Berrone S [et al.] Unsteady advection-diffusion simulations in complex discrete fracture networks with an optimization approach [Journal] // J. Hydrol.. - 2018. - pp. 332–345.

Boon W, Nordbotten J and Yotov I Robust discretization of flow in fractured porous media [Journal] // SIAM J. Numer. Anal. - 2018. - pp. 2203–2233.

Brown S.R Fluid Flow Through Joints: The effect of Surface Roughness [Journal] // Journal of Geophysical Research. - 1987.

Brown S.R Transport of Fluid and Electric Current Through a Single Fracture [Journal] // Journal of Geophysical Research. - 1989.

Chacon A. "Effect of pressure depletion on hydrocarbon recovery in naturally fractured reservoirs // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. - [s.l.] : Norman, Oklahoma, 2006.

Chae B.G [et al.] Analysis Of The Permeability Characteristics Along Rough-Walled Fractures Using A Homogenization Method [Journal] // Nuclear Engineering and Technology. - 2011.

Christian D. [et al.] Laboratory Measurement of Compaction-induced Permeability Change in Porous Rocks: Implications for the Generation [Journal] // Pure Appl Geophys. - 1994.

Develi K and Babadagli T Experimental and Visual Analysis of Single-Phase Flow through Rough Fracture Replicas [Journal] // Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. - 2015.

Dowell W.Mc and Mill N Surface Ultrasonic Measurement Of Longitudinal And Transverse Wave Velocities Through Rock Samples [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. - 1984. - pp. 223-227.

Drazer G and Koplik J Permeability of self-affine rough fractures [Journal] // Physics. - 2000.

Duda A, Koza Z and Matyka M Hydraulic tortuosity in arbitrary porous media flow [Journal] // Physics. - [s.l.] : Physics, 2011.

Elsworth D and Goodman R.E Characterization Of Rock Fissure Hydraulic Conductivity Using Idealized Wall Roughness Profiles [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics. - 1986.

Favinger R.D, Hainers H.K and Kennedy G.R Method and Apparatus for core flooding studies [Online]// JUSTIA Patent. - 1 20, 1995. - 11 8, 2020. - <https://patents.justia.com/patent/5563333#citations>.

Flemisch B [et al.] Benchmarks for single-phase flow in fractured porous media [Journal] // Adv. Water Resour. - 2018. - pp. 239–258.

Fung L.S.K and Al-Shaalan T.M Parallel iterative solver for the dual-porosity dual permeability system in fractured reservoir simulation [Journal] // IPTC 10343. - 2005.

Glaser D. [et al.] A discrete fracture model for two-phase flow in fractured porous media [Journal] // Adv. Water Resour. - 2017. - pp. 335–348.

Gobran B.D., Brigham W.E. and Ramey H.J. Absolute Permeability as a Function of Confining Pressure, Pore Pressure, and Temperature [Journal] // SPE Formation Evaluation. - 1987.

Gutfraund R and Hansen A Study of fracture permeability using lattice gas automata [Journal] // Transport Porous Media. - 1995.

Hakami E Aperture distribution of rock fracture [Report]. - [s.l.] : PhD thesis, Division of engineering geology, Royal Institute of Technology, Stockholm., 1995.

Huang Yuanzhi and Wang Enzhi Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability [Journal] // J Tsinghua Univ (Sci & Tech). - 2007.

International Society for Rock Mechanics Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-durability Index Properties [Book]. - [s.l.] : I.S.R.M., 1972.

Jasinge D., Ranjith P.G. and Choi S.K. Effects of effective stress changes on permeability of latrobe valley brown [Journal] // coal. Fuel. - 2011. - pp. 1292-1300.

Javadi M., Sharifzadeh M. and Shahriar K. A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures [Journal] // Journal of Hydrology. - 2010.

Jiang Z [et al.] Pore Network Extraction for Fractured Porous Media [Journal] // Advances in Water Resources. - 2017.

Jin Y Scale and size effects on fluid flow through self-affine rough fractures [Journal] // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2017.

Jinyong Park Experimental And Numerical Investigations Of Fluid Flow For Natural Single Rock Fractures [Report]. - ARIZONA : Department Of Mining And Geological Engineering. The University Of Arizona, 2005. - pp. 1-283.

Juanes R, Samper J and Molinero J A general and efficient formulation of fractures and boundary conditions in the finite element method [Journal] // Int. J. Numer. Methods Eng.. - 2002. - pp. 1751–1774.

Kadeethum T [et al.] Flow in porous media with low dimensional fractures by employing enriched Galerkin method [Journal] // Advances in Water Resources. - 2020.

Kadeethum T., Salimzadeh S. and Nick H. An investigation of hydromechanical effect on well productivity in fractured porous media using full factorial experimental design [Journal] // J. Pet. Sci. Eng. . - 2019.

Kadeethum T., Salimzadeh S. and Nick H. Well productivity evaluation in deformable single-fracture media [Journal] // Geothermics . - 2020.

Kazemi H Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution [Journal] // SPEJ. - 1969.

Koyama T., Neretnieks I and Jing L A Numerical Study on Differences in using Navier-Stokes and Reynold Equations for Modeling the Fluid Flow and Particle Transport in Single Rock Fractures with Shear [Journal] // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. - 2007. - pp. 1082-1101.

Latham J [et al.] Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures [Journal] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci.. - 2013. - pp. 100–112.

Latham J [et al.] Recent advances in hydromechanical modelling of fractured rocks using the finite-discrete element method [Conference] // International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media. - [s.l.] : CouFrac, 2018.

Lu J. Pressure behavior of horizontal wells in dual-porosity dual-permeability naturally fractured reservoirs [Conference]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers, 2009.

Louis C A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses [Journal] // Imperial College of Science and Technilogy London. - 1996.

Madadi M, VanSiclen C.D and Sahimi M Fluid flow and conduction in twodimensional fractures with rough, self-affine surfaces: a comparative study [Journal] // J.Geophys. Res. - 2003.

Madadi M and Sahimi M Lattice boltzmann simulation of fluid flow in fracture networks with rough, self-affine surfaces [Journal] // Physics. - 2003.

Manuel G. Sensativity analysis for dual porsosity and dual permeability system for small and large scale heterogeneities in a naturally fractured carbonate reservoir [Journal] // Society of Petroleum Engineers. - 2011.

Martin V, Jaffre J and Roberts J Modeling fractures and barriers as interfaces for flow in porous media [Journal] // SIAM J. Sci. Comput.. - 2005. - pp. 1667–1691.

Matthai S [et al.] Simulation of solute transport through fractured rock: a higher-order accurate finite-element finite-volume method permitting large time steps [Journal] // Transp. Porous Media. - 2010. - pp. 289–318.

Mohebbi M and Yarahadi Bafghi A. Accurate Estimation Of Scale Independent Joint Roughness Coefficient, JRC, By Optimized Box Counting Algorithm [Journal] // Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences. - [s.l.] : Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, 2015.

Moinfar W. Narr [et al.] Comparison of discrete-fracture and dual-permeability models for multiphase flow in naturally fractured [Journal] // SPE 142295. - 2011.

Murata S and Saito T Estimation of Tortuosity of Fluid Flow Through a Single Fracture [Journal] // Journal of Canadian Petroleum Technology. - 2003.

Nasri-Fakherdavood Mohammad Javad, Ramezanzadeh Ahmad and Jenabi Human Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics through natural rock fractures [Journal] // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. - 2019. - pp. 519-528.

Nelson R.A Fractured Reservoirs: Turning Knowledge into Practice [Journal] // Petrol Society of Engineering. - 1987.

Nick H and Matthai S Comparison of three FE-FV numerical schemes for single-and two-phase flow simulation of fractured porous media [Journal] // Transp. Porous Media. - 2011. - pp. 421–444.

Nick H و Matthai S A hybrid finite-element finite-volume method with embedded discontinuities for solute transport in heterogeneous media [Journal] 2011- pp. 299-312

Norbert Zisser and Georg Nover Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure [Journal] // Journal of Applied Geophysics. - 2009. - pp. 356-370.

Okazaki K. [et al.] Permeability, porosity and pore geometry evolution during compaction of Neogene sedimentary rocks [Journal] // Journal of Structural Geology. - 2014.

Olsson R and Barton N An Improved Model For Hydromechanical Coupling During Shearing Of Rock Joint [Journal] // Int J Rock Mech Min Sci. - 2001.

Oron Assaf and Berkowitz Brian Flow in rock fractures: The Local cubic law assumption reexamined [Journal]. - [s.l.] : Water resource research, 1998. - 11 : Vol. 34.

Øystein Pettersen Compaction, Permeability and Fluid Flow in Brent-Type Reservoirs Under Depletion and Pressure Blowdown [Journal] // The Open Petroleum . - 2013.

Pathak Shashank In-Situ Normal Stiffness of Rock Mass [Conference] // Fourth Indian Rock Conference. - 2013.

Peng S. [et al.] Simulation of water flow in fractured porous medium by using discretized virtual internal bond [Journal] // J. Hydrol. - 2017. - pp. 851–868.

Qiao Liping, Wang Zhechao and Li Shucaï Effective Stress Law For Permeability Of Tight Gas Reservoir Sandstone [Journal] // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. - 2011.

Reiss L.H The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Formations [Journal] // Technip. - 1980.

Renshaw C.E On the Relationship between Mechanical and Hydraulic Apertures in Rough-Walled Fractures [Journal] // Journal of Geophysical Research. - 1995.

Salimzadeh S [et al.] A novel radial jet drilling stimulation technique for enhancing heat recovery from fractured geothermal reservoirs. Renew [Journal] // Energy . - 2019. - pp. 395–409.

Salimzadeh S. and Nick H. A coupled model for reactive flow through deformable fractures in enhanced geothermal systems [Journal] // Geothermics . - 2019. - pp. 88–100.

Salinas P [et al.] A discontinuous control volume finite element method for multi-phase flow in heterogeneous porous media [Journal] // J. Comput. Phys. - 2018. - pp. 602–614.

Singh Bhawani and Goel R. K. Engineering Rock Mass Classification [Book]. - Toronto : [s.n.], 2011.

Skjetne E, Hansen A and Gudmundsson J.S High-velocity flow in a rough fracture [Journal] // J. Fluid Mech. - 1999.

Snow D.T Anisotropic permeability of fractured media [Journal] // Water Resource Reservoir. - 1969.

Tareq M and Larry S. A scaleable massively parallel dual-porosity dual-permeability simulator for fractured reservoirs with super-k permeability [Conference] // SPE 84371. - 2003.

Tiab D and Donaldson E.C. Petrophysics [Book]. - [s.l.] : Gulf Professional Publishing, Burlington, 2004.

Tsang Y.W The Effect of Tortuosity on Fluid Flow through a Single Fracture [Journal] // Water Resources Research . - 1984.

Tse R. and Cruden D. M. Estimating joint roughness coefficients [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 1979. - pp. 303-307.

Van Dam D.B and de Pater C.J Roughness of Hydraulic Fractures: The importance of in-situ Stress and Tip [Journal] // Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition. - 1999.

Walsh J.B Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability [Journal] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. - 1981.

Wang Yi [et al.] Experimental study and micromechanical interpretation of the aeoroelastic behaviour and permeability of a tight sandstone [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2018. - pp. 89–95.

Warren J.E and Root P.J The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs [Journal] // SPEJ. - 1963.

Watanabe N, Hirano N and Tsuchiya N Diversity of Channeling Flow in heterogeneous Aperture Distribution Inferred from Integrated Experimental – Numerical Analysis on Flow through Shear Fracture in Granite [Journal] // Journal of Geophysical Research. - 2008.

Wheeler M. [et al.] Unconventional reservoir management modeling coupling diffusive zone/phase field fracture modeling and fracture probability maps [Conference] // SPE Reservoir Simulation Conference. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers, 2019.

Willems C. and Nick H. Towards optimisation of geothermal heat recovery: an example from the west netherlands basin [Journal] // Appl. Energy. - 2019. - pp. 582–593.

Wilson C.R and Witherspoon P.A Steady State Flow In Rigid Networks Of Fractures [Journal] // Water Resources Research. - 1974.

XU Demin [et al.] EXPERIMENTAL STUDY ON PERMEABILITY OF POROUS MEDIA UNDER HIGH CONFINING PRESSURE [Journal] // Journal of Engineering Geology. - 2007.

Zeng Zhijiao [et al.] Experimental study of the laws between the effective confining pressure and mudstone [Journal] // Energy Procedia. - 2014. - pp. 5654 – 5663.

Zhang X, Knackstedt M.A and Sahimi M Fluid flow across mass fractals and selfaffine surfaces [Journal] // Physics. - 1996.

Zhaoping Meng and Guoqing Li. Experimental research on the permeability of high-rank coal under a varying stress and its influencing factors [Journal] // Engineering Geology. - 2013. - pp. 108-117.

Zhou J.Q. [et al.] Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2015. - pp. 202-208.

Zimmerman R.W. and Bodvarsson G.S. Effective transmissivity of two-dimensional fracture networks [Journal] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. - 1996. - pp. 433-438.

اشجاری ر مطالعه رفتار هیدرومکانیکی درزه‌های سنگ [گزارش]. - تهران-ایران : دانشگاه تربیت مدرس, ۱۳۹۲.

جوادی م توسعه معیار گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای تعیین حد آستانه شروع جریان غیر خطی سیال در شکستگی های سنگ و انحراف از قانون دارسی [همایش] // سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت. - تهران : مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران, ۱۳۹۷.

صفحه مجازی مرجع تخصصی آموزش نرم افزار Ansys مرجع تخصصی آموزش نرم افزار انسیس فلونت [درون خطی]. - انسیس. - ۱۹ ۱۱ ۲۰۲۰. - <https://fluentcfid.ir/fluent-project>.

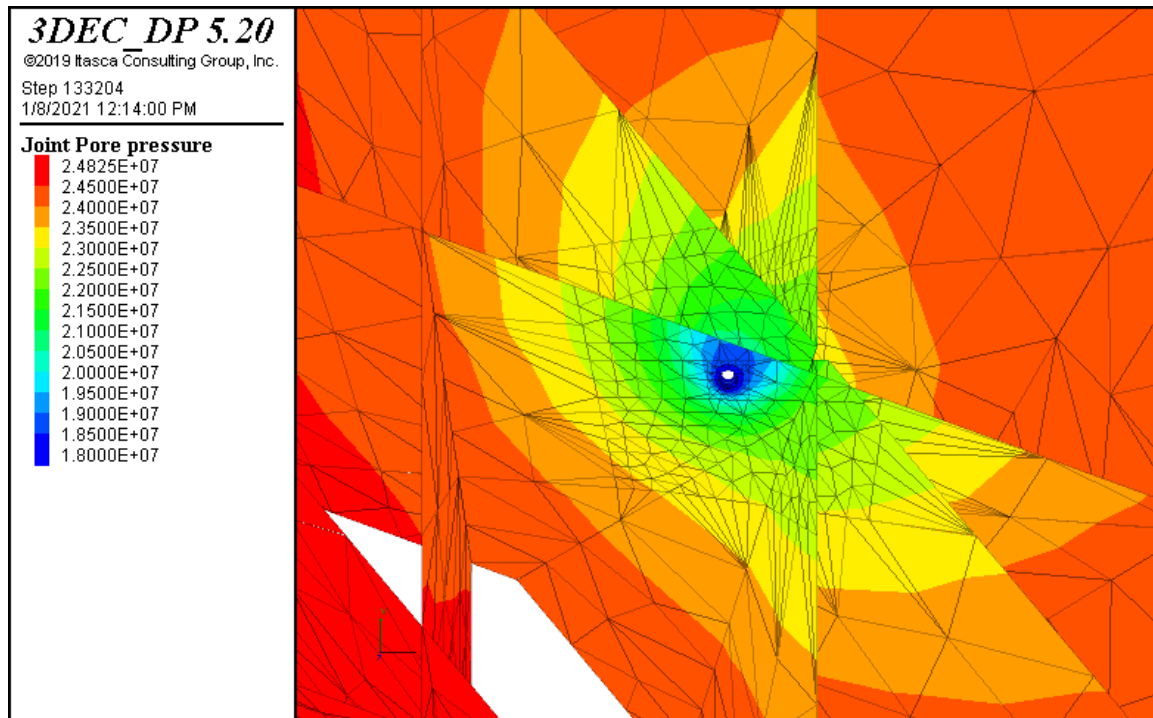
گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۱ ارزیابی پتروفیزیکی یکی از چاه های کرنج [گزارش]. - اهواز : اداره ارزیابی مخازن نفت و گاز, ۱۳۹۳.

گزارش پتروفیزیکی چاه شماره ۲ ارزیابی پتروفیزیکی چاه کرنج شماره ۲ [گزارش]. - اهواز : اداره ارزیابی مخازن زیرزمینی نفت و گاز, ۱۳۹۳.

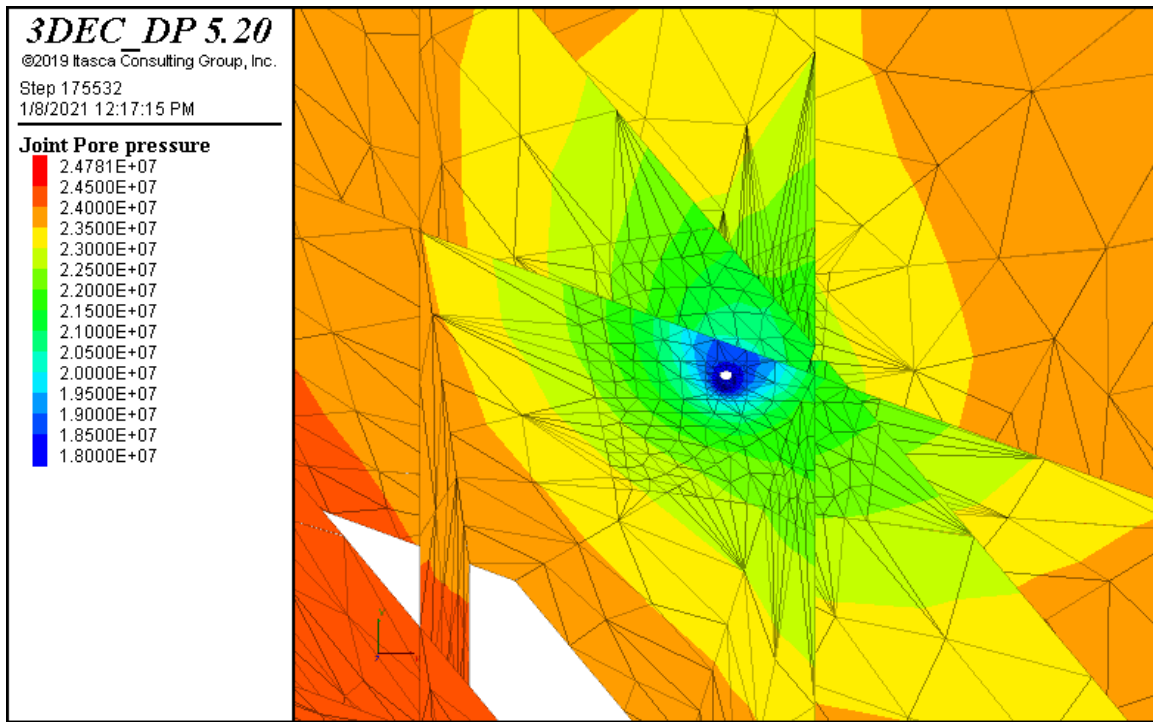
پیوست أ

تصاویر مدل سازی عددی

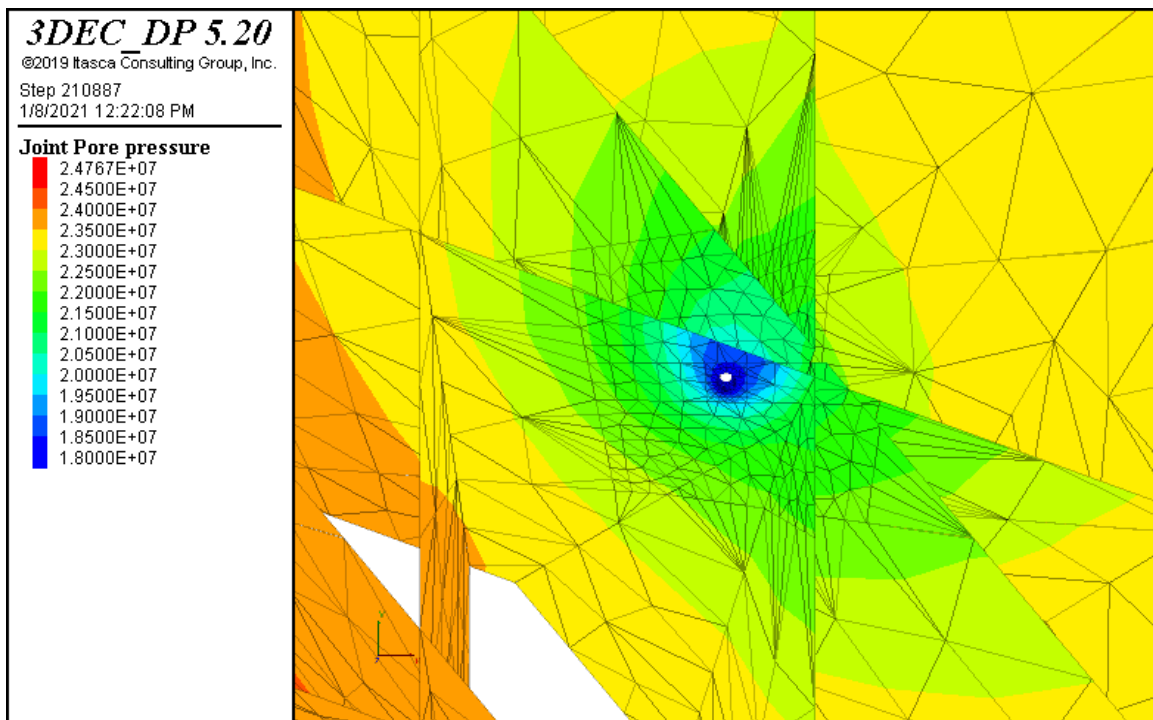
۱. چاه شماره ۱- فشار درون چاه ۱۸ مگاپاسکال



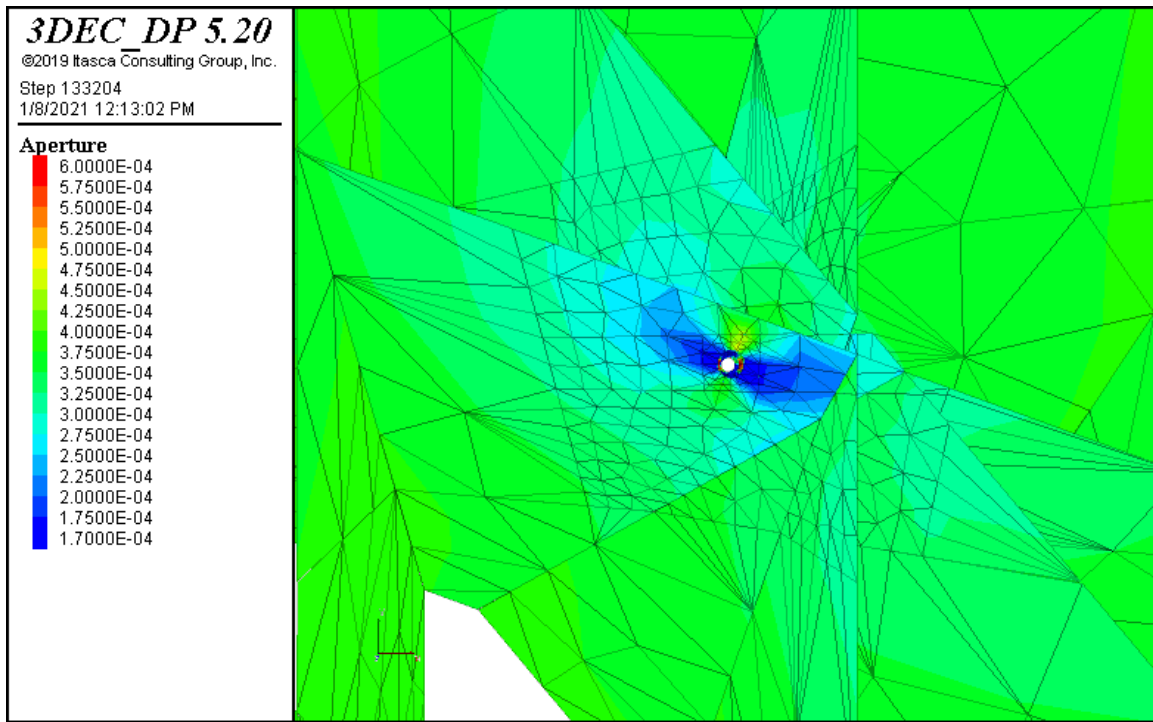
شکل (أ-۱) فشارمنغذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



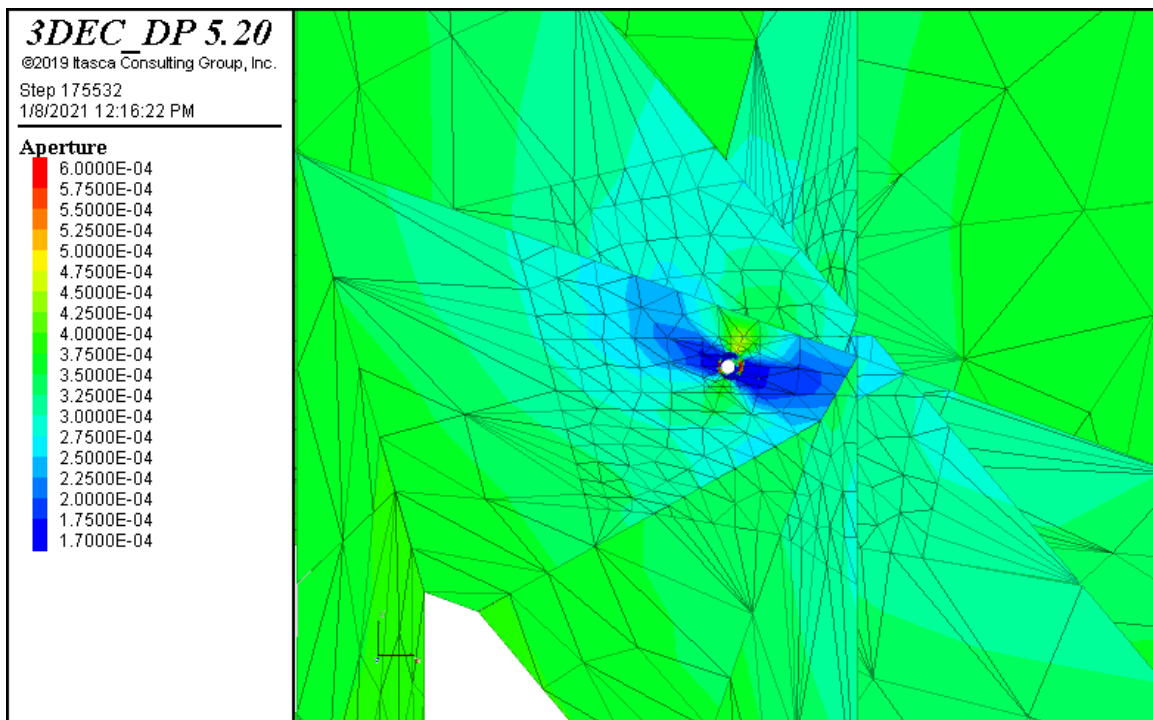
شکل (أ-۲) فشارمغذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



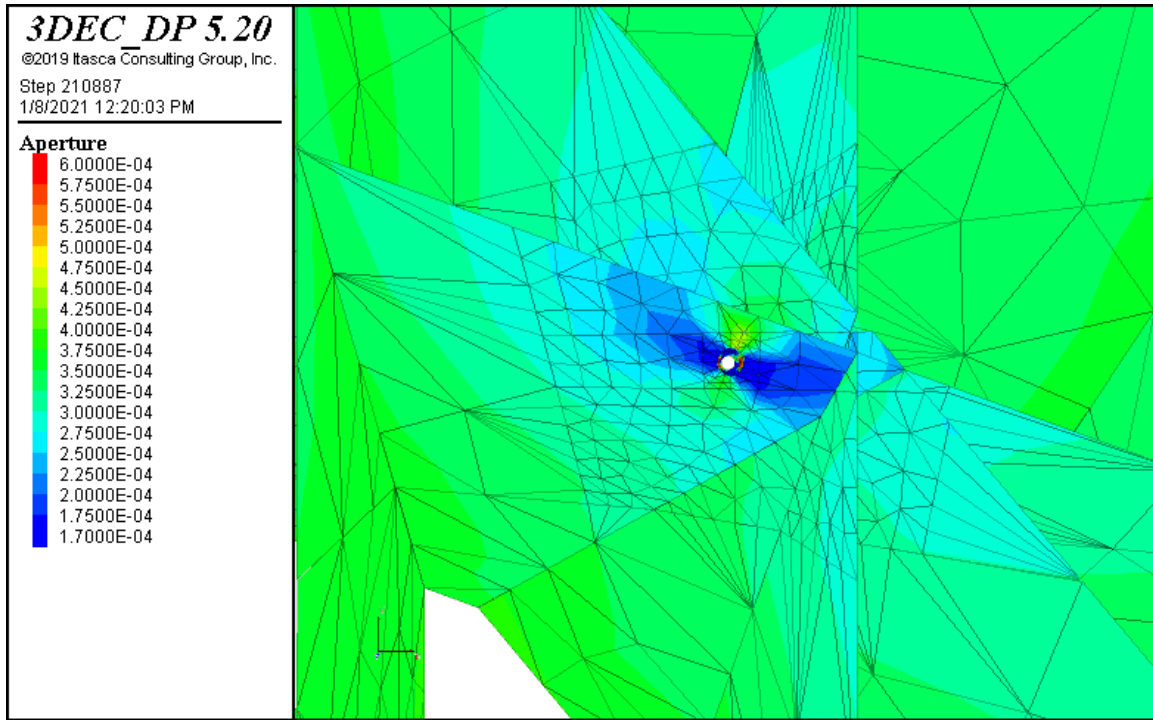
شکل (أ-۳) فشارمغذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٤) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.

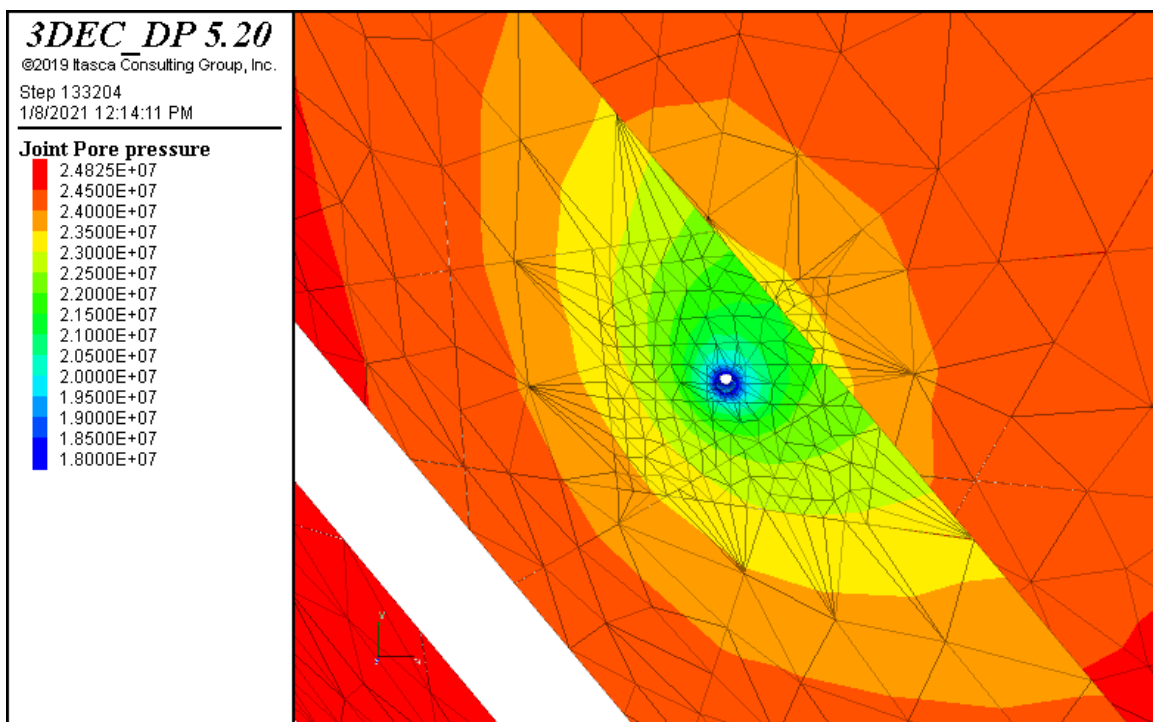


شکل (أ-٥) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.

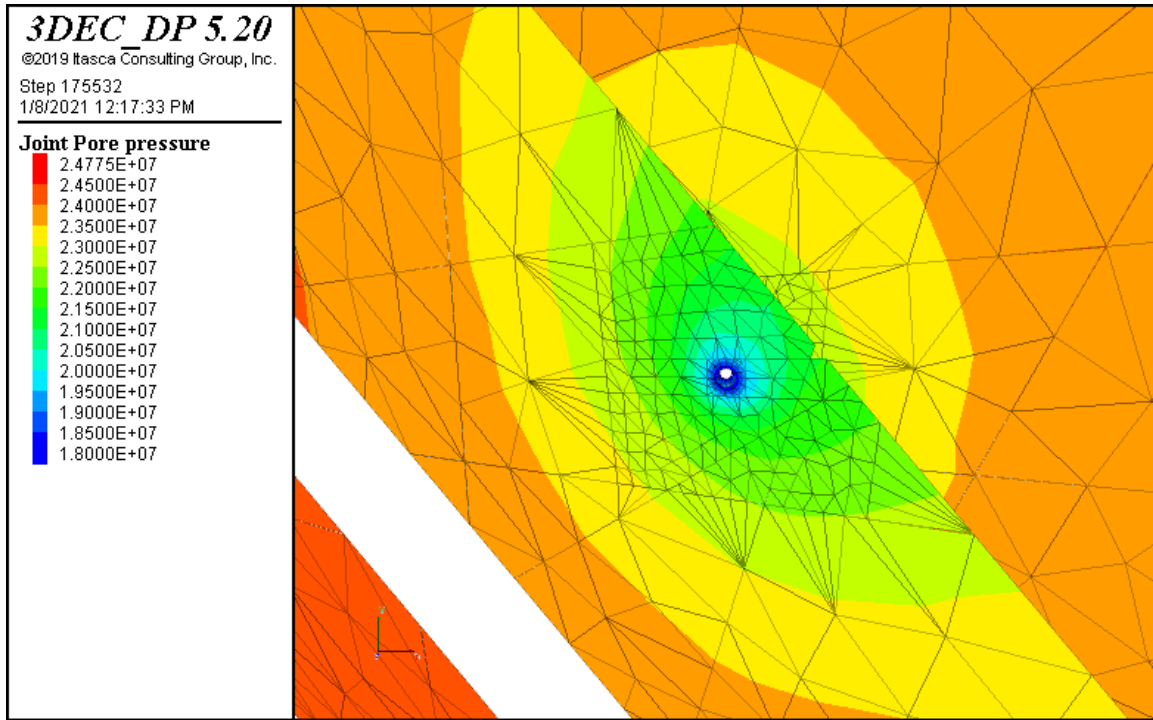


شکل (أ-٤) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.

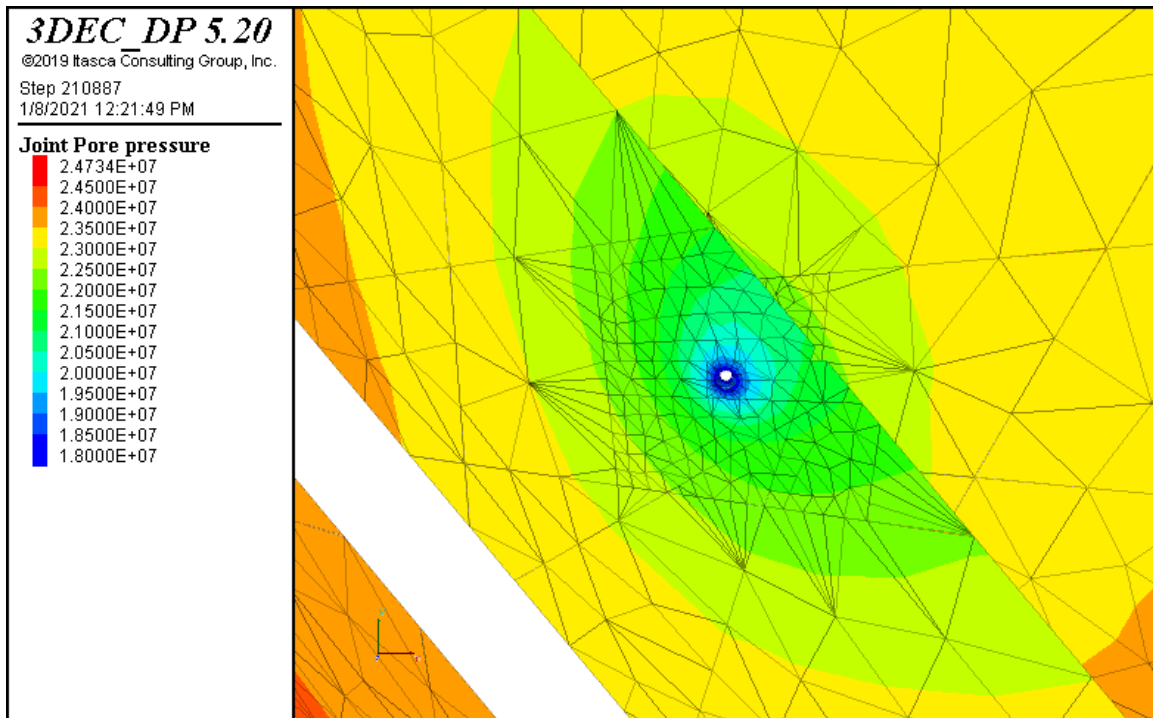
دوزه شماره ١٠



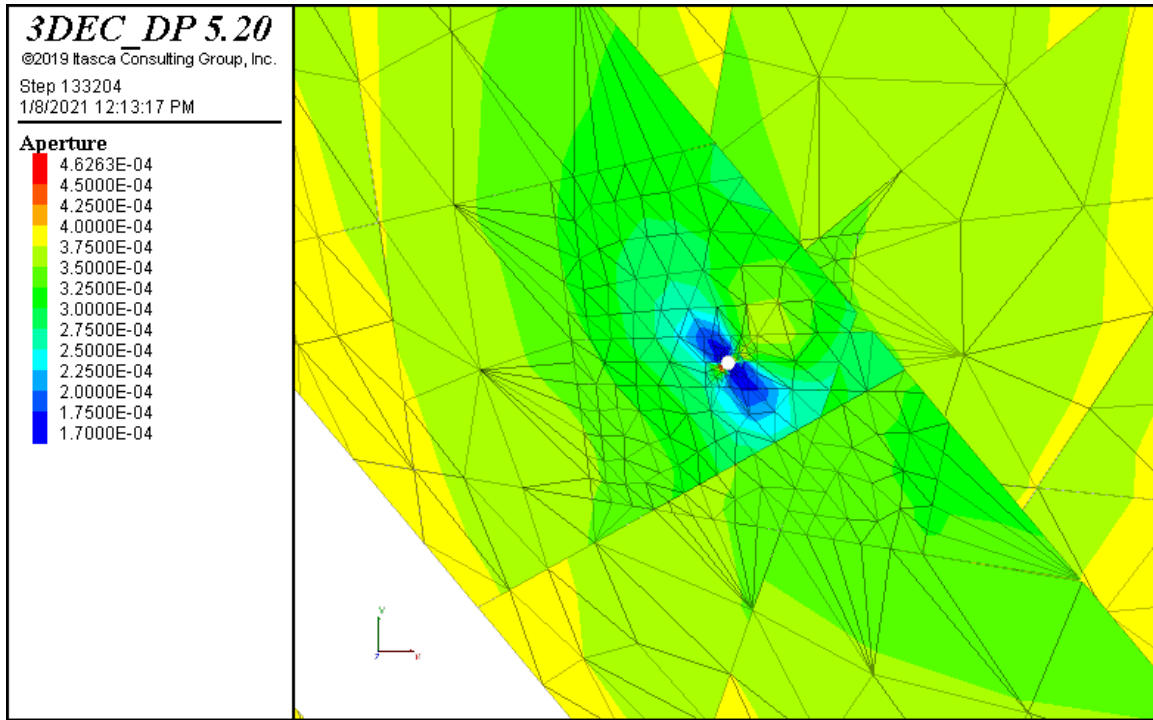
شکل (أ-٧) فشارمنفذی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.



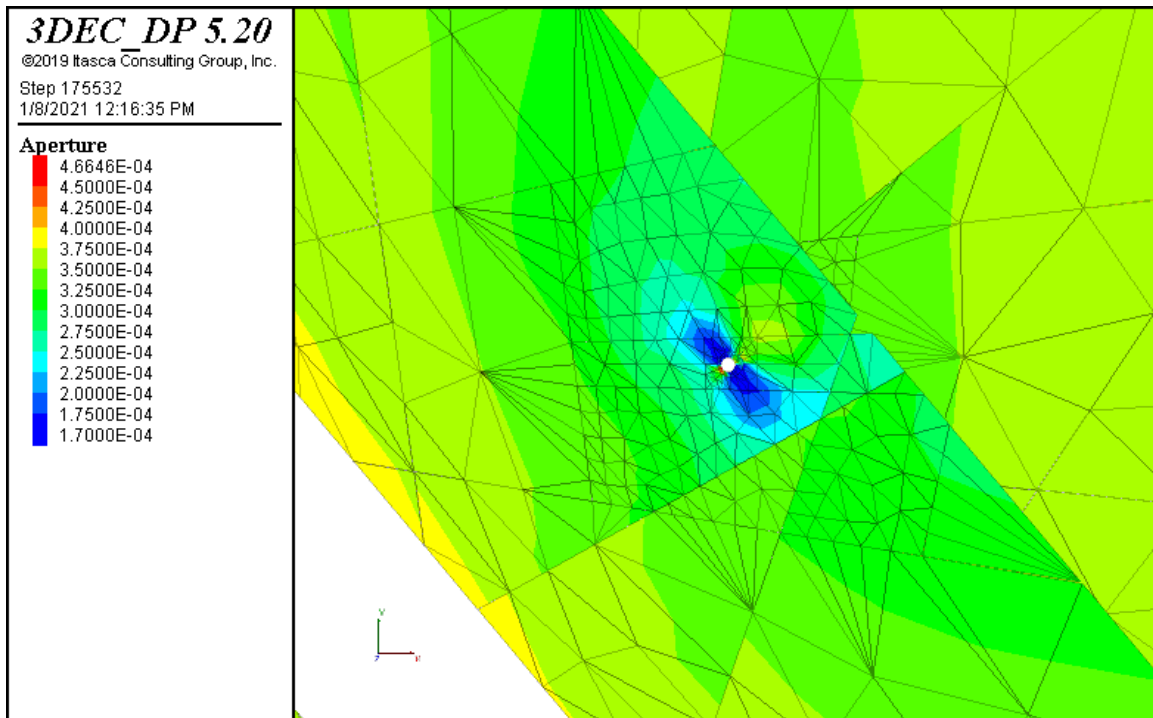
شکل (أ-۸) فشارمغذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



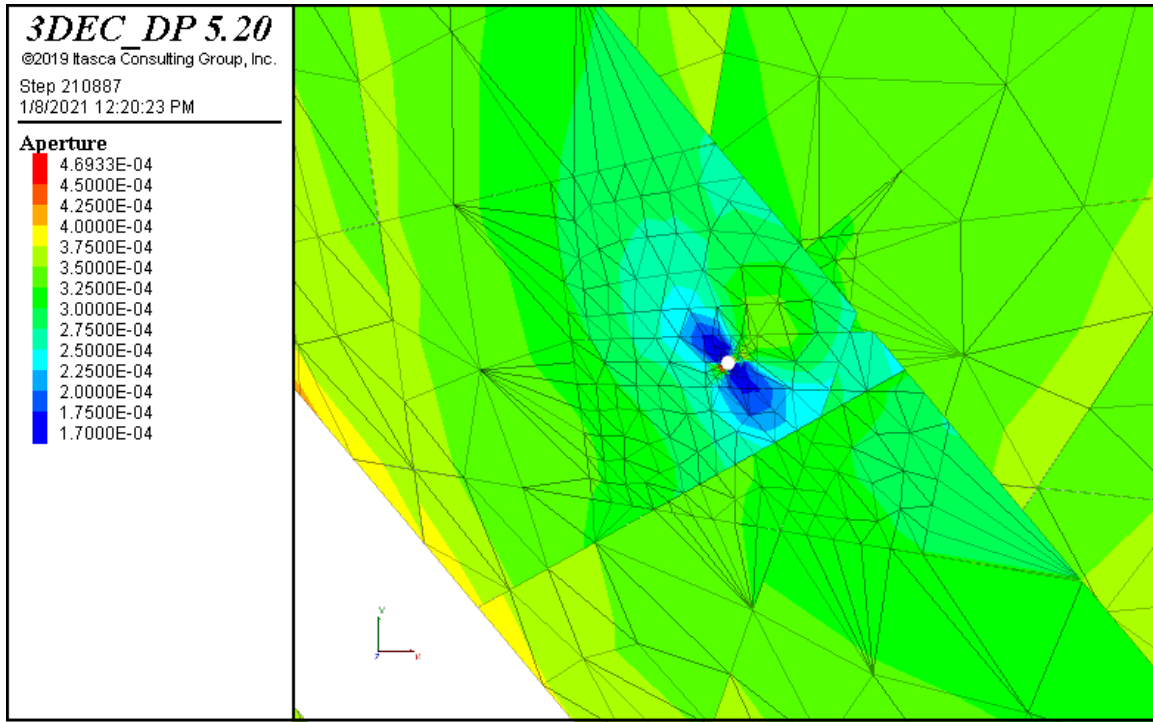
شکل (أ-۹) فشارمغذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۱۰) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.

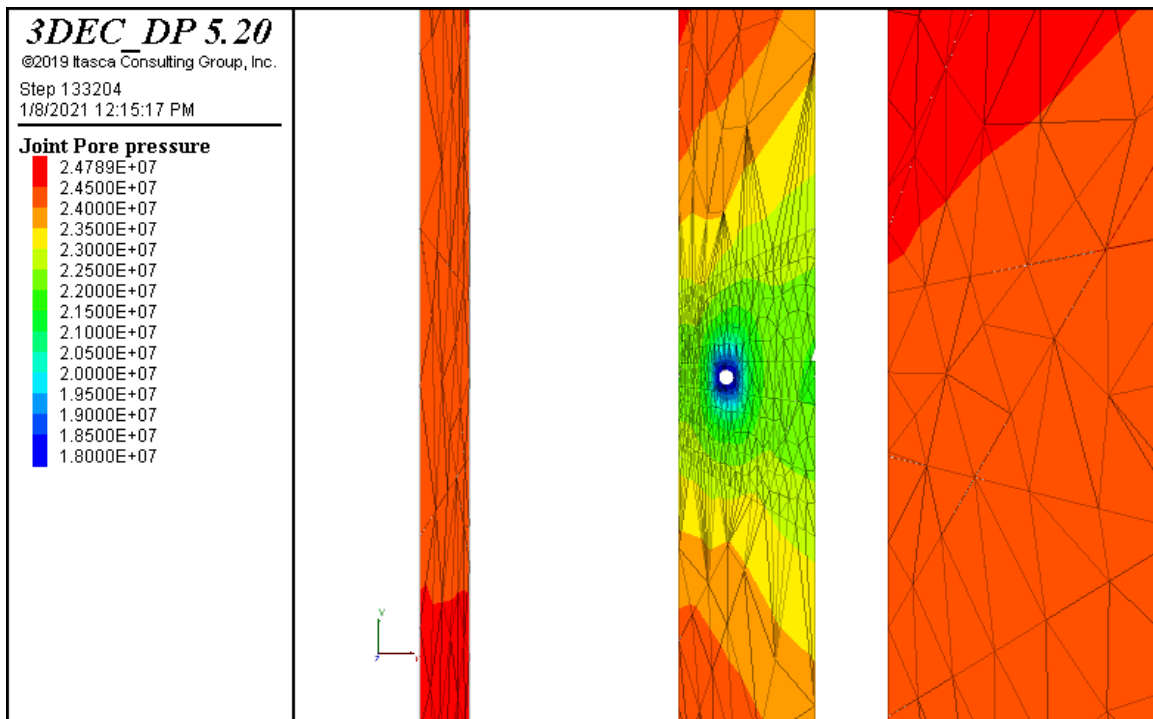


شکل (أ-۱۱) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.

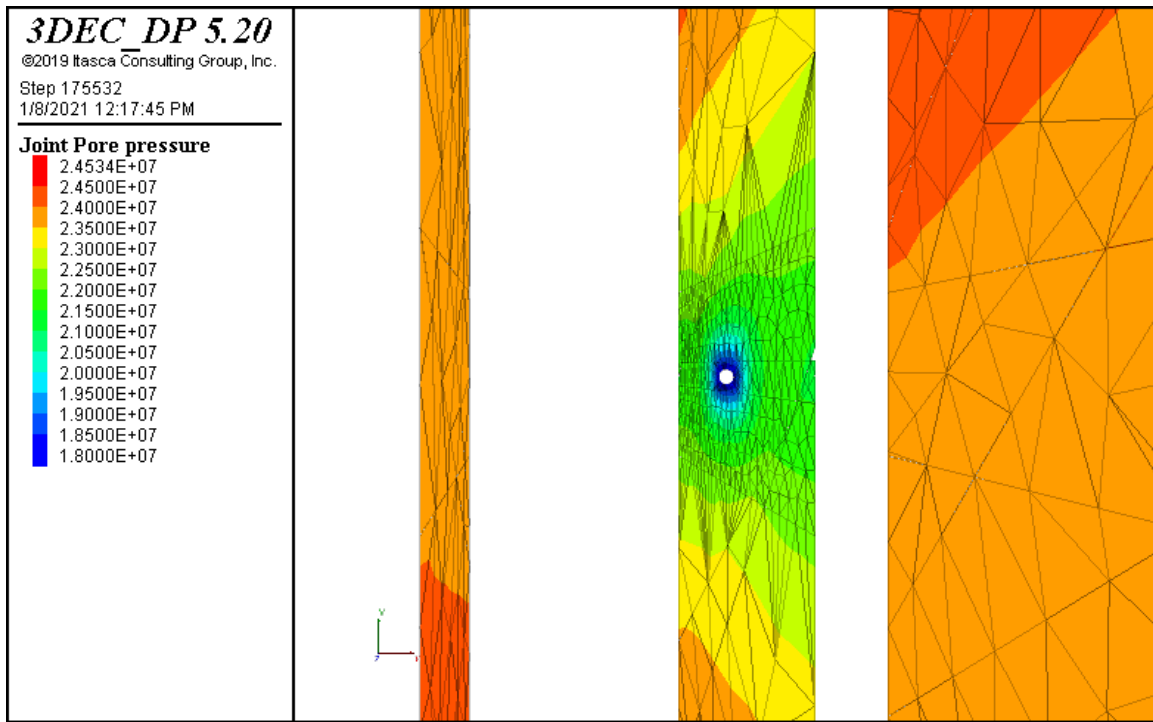


شکل (أ-۱۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

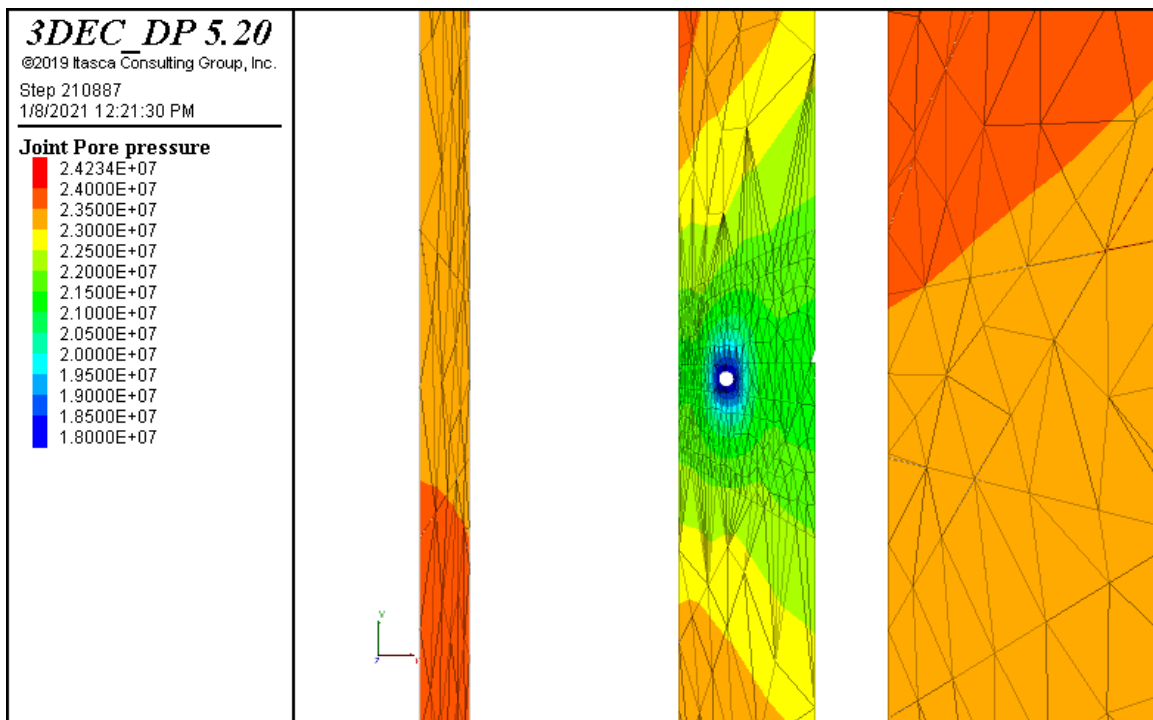
درزه شماره ۱۱



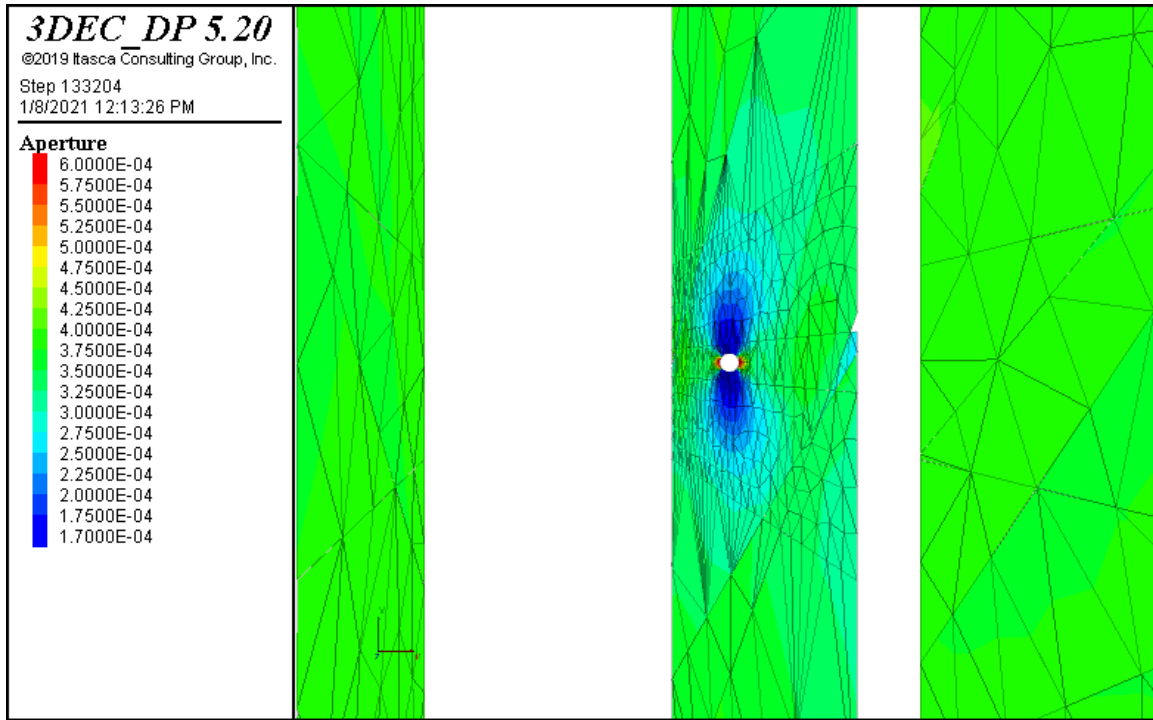
شکل (أ-۱۳) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



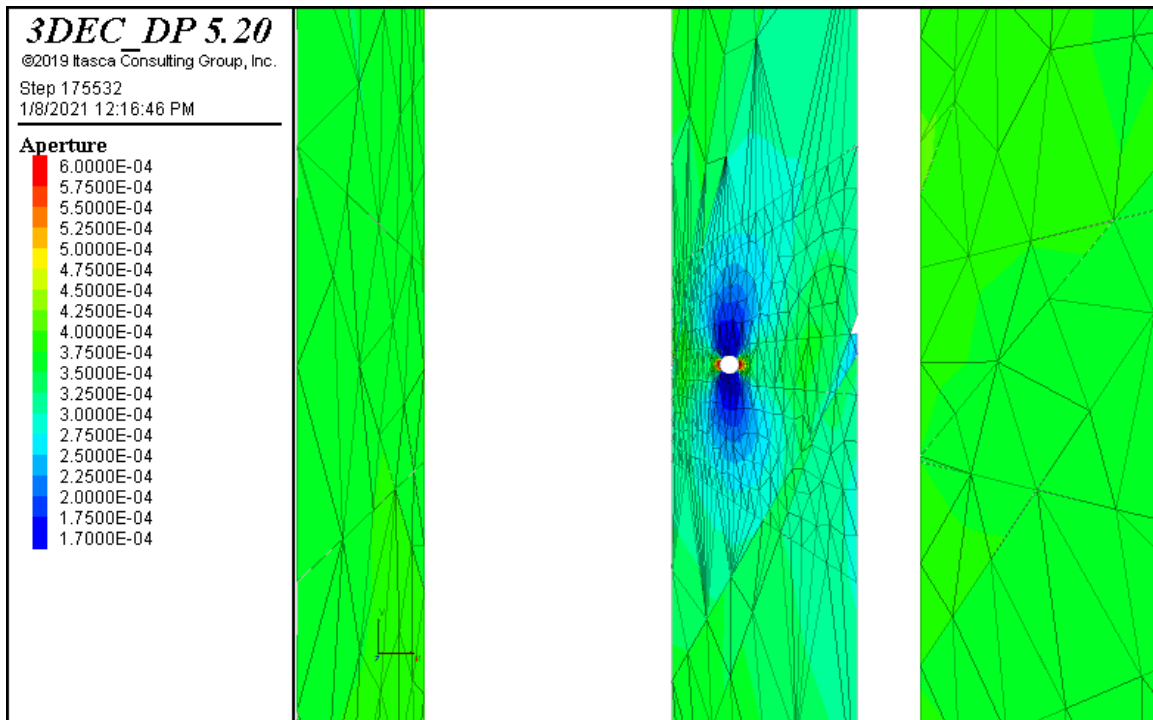
شکل (أ-۱۴) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



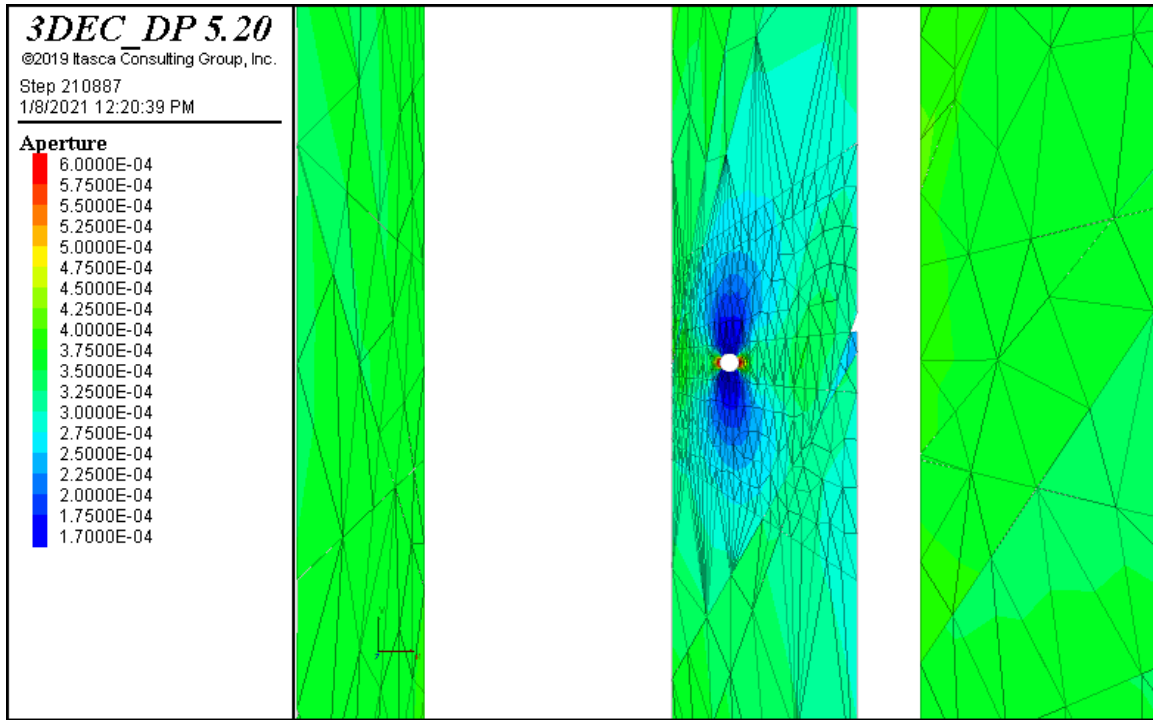
شکل (أ-۱۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۱۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.

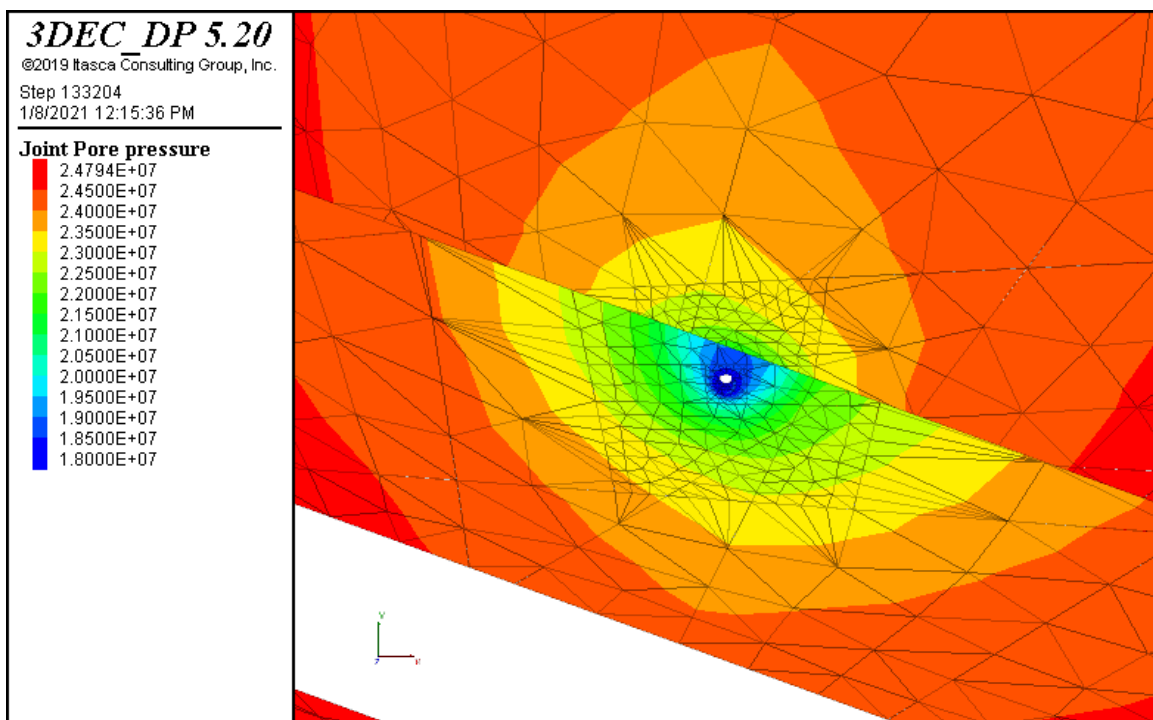


شکل (أ-۱۷) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.

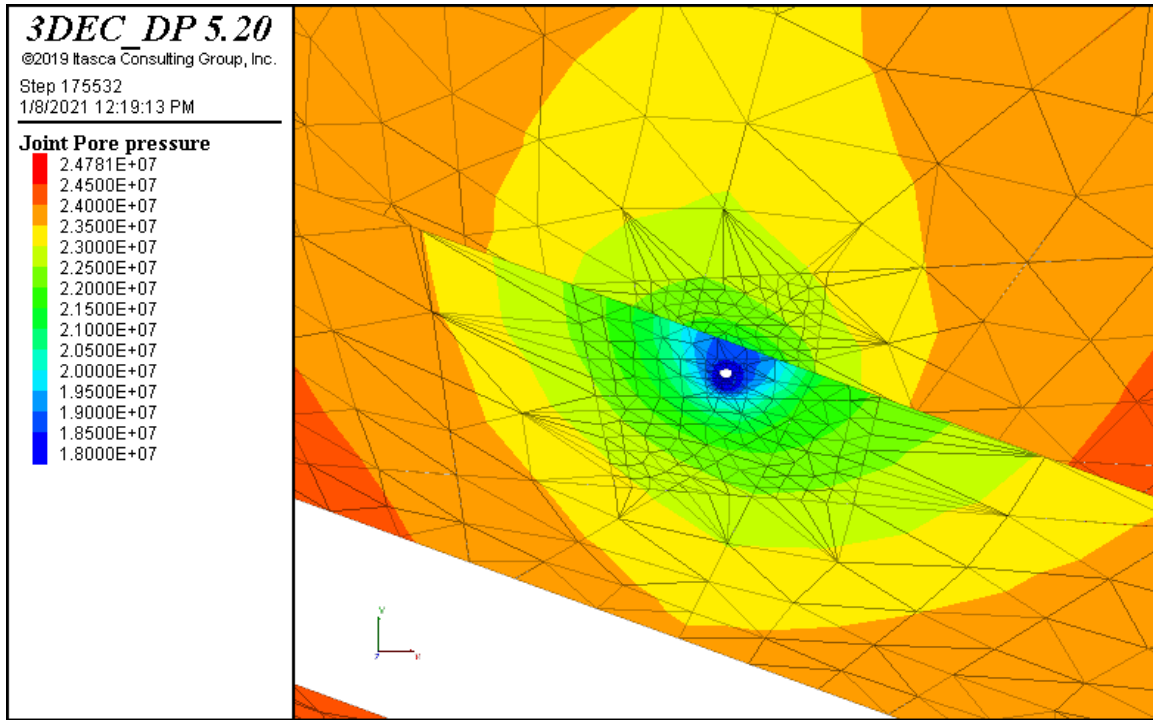


شکل (أ-۱۸) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

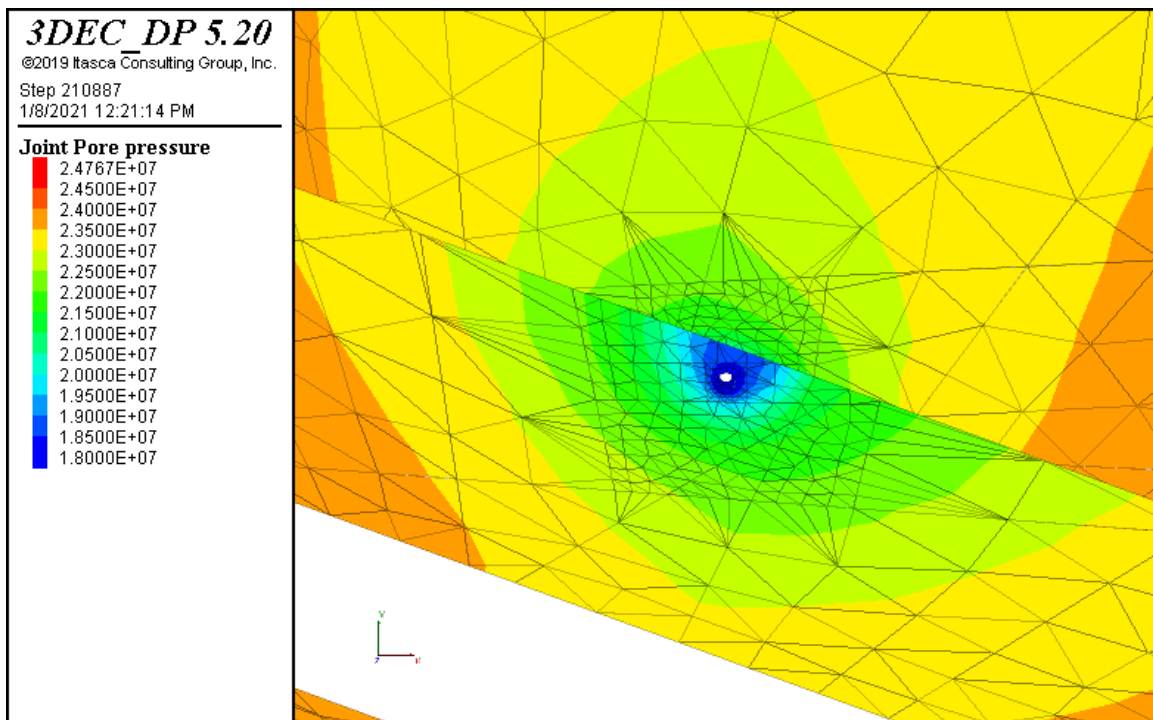
درزه شماره ۱۲



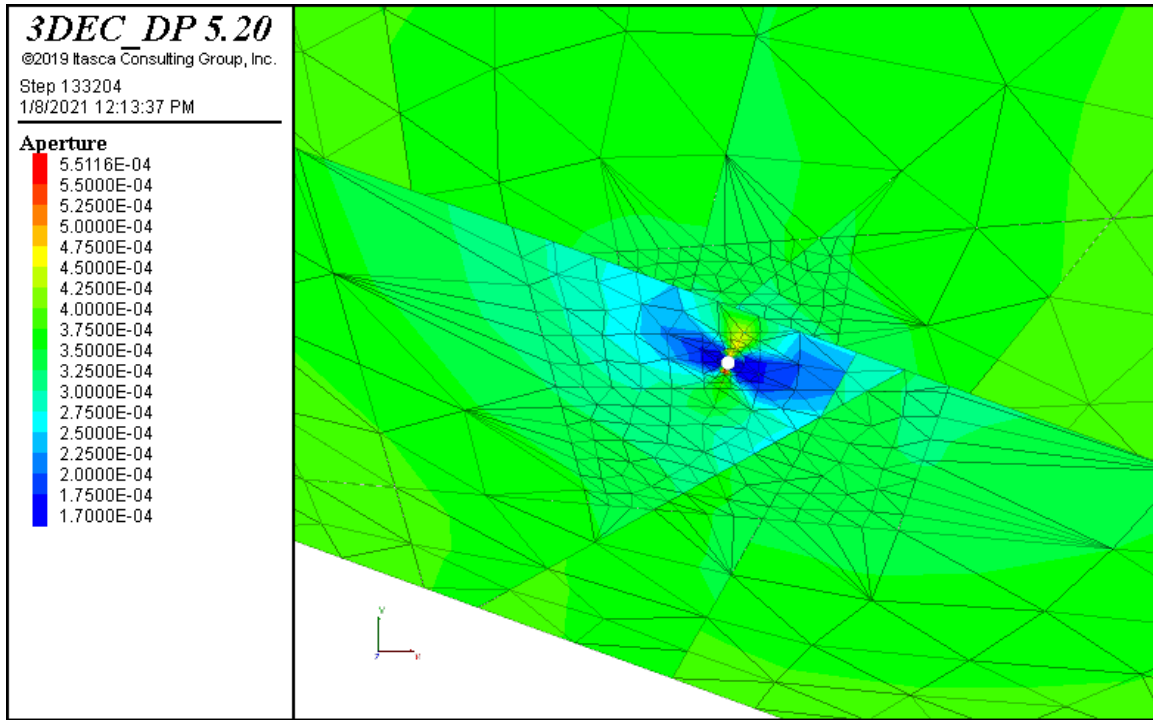
شکل (أ-۱۹) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



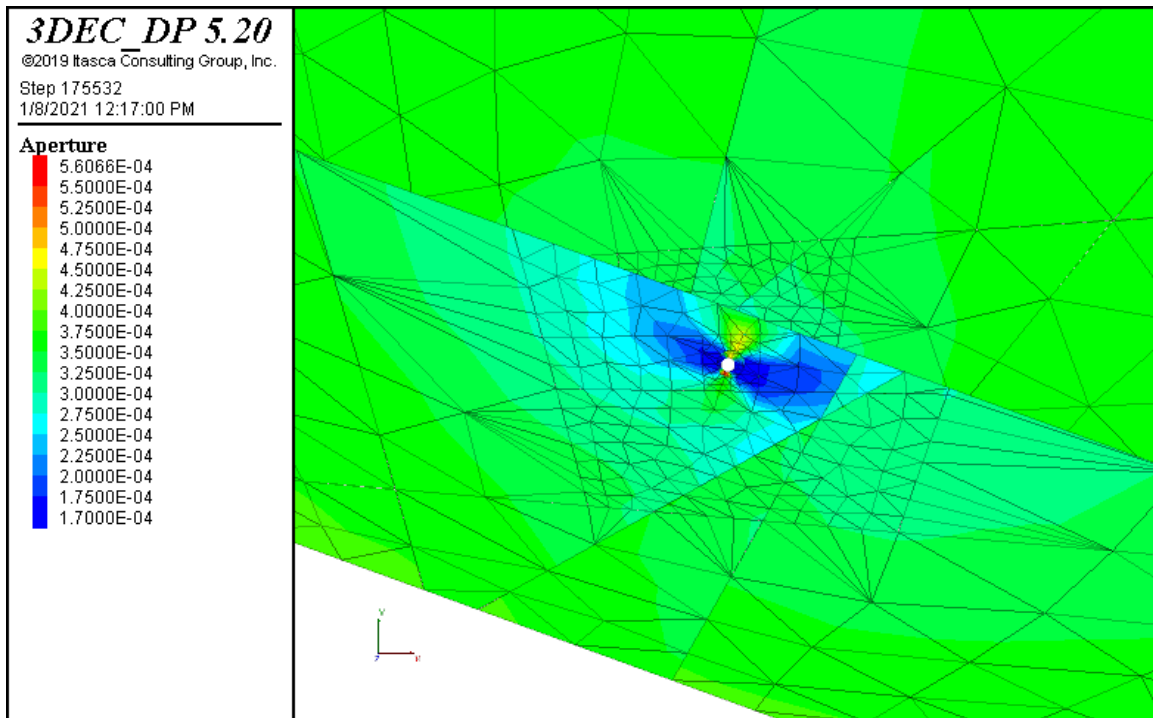
شکل (أ-۲۰) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



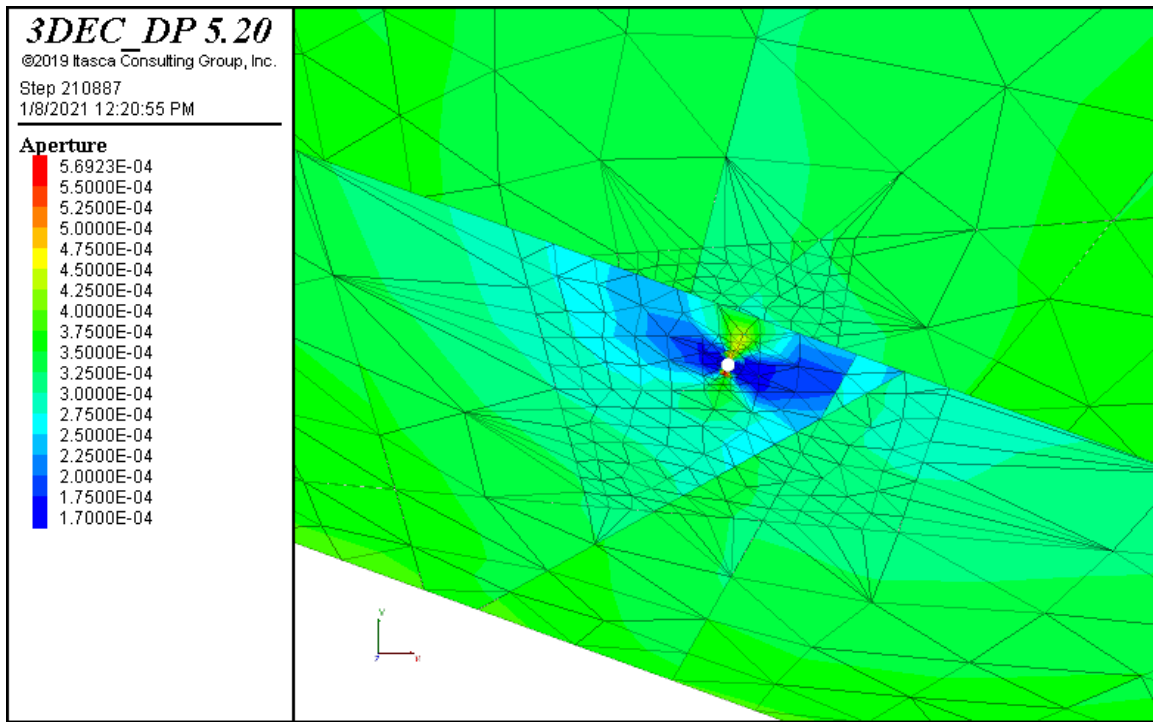
شکل (أ-۲۱) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



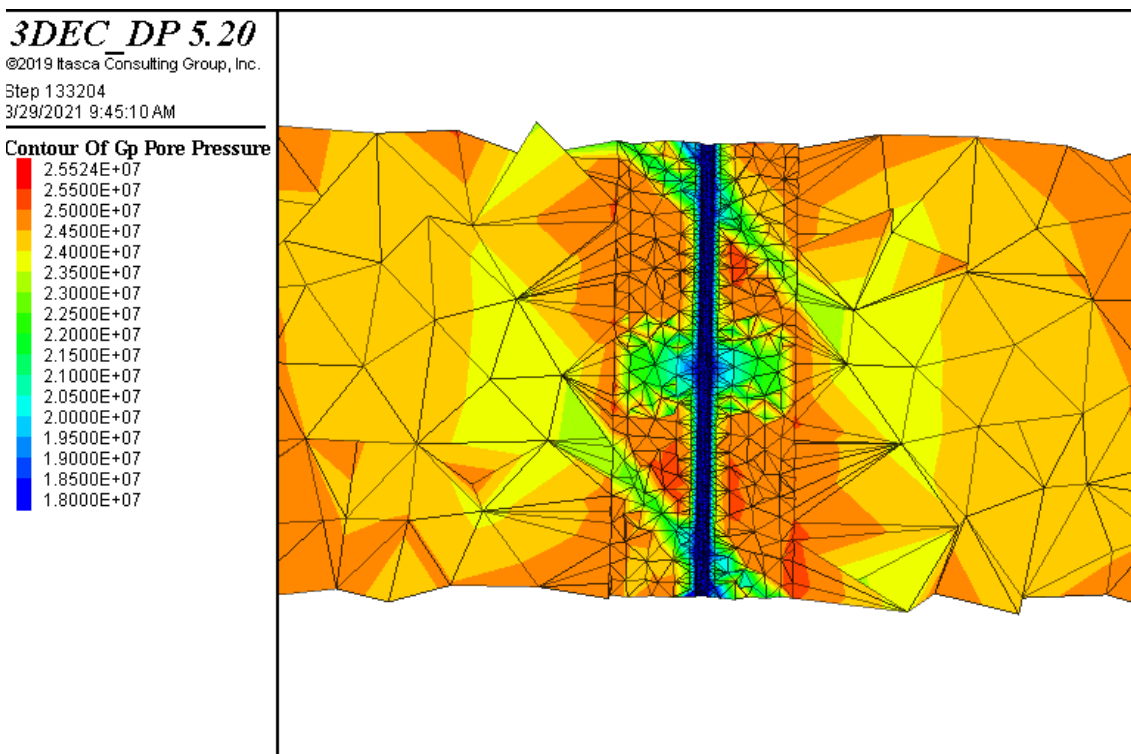
شکل (أ-۲۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۲۳) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۲۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۲۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از مدل در چاه شماره ۱.

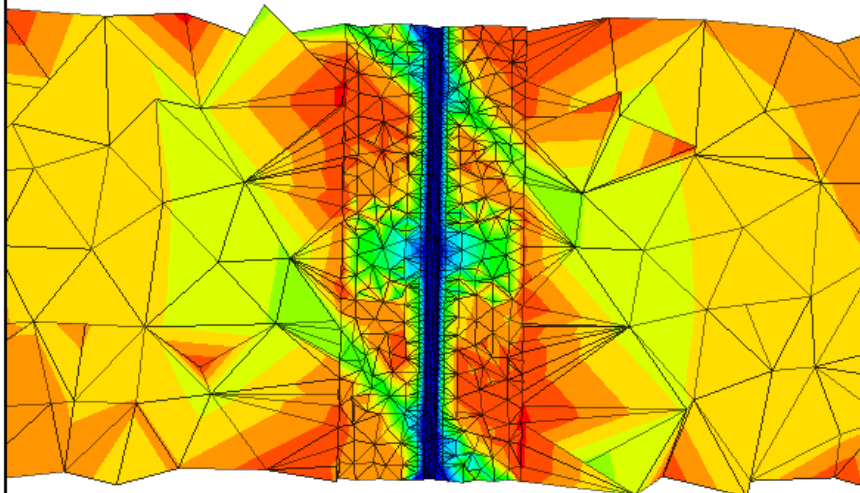
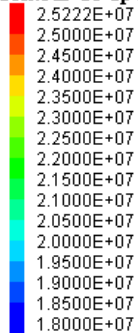
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 175532

3/29/2021 9:45:30 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۲۶) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

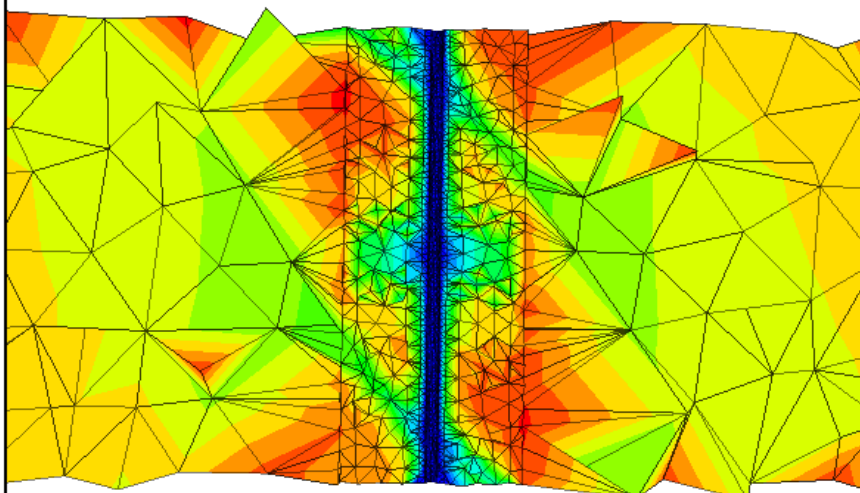
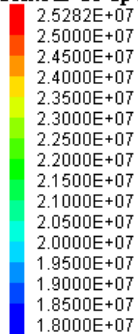
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 210887

3/29/2021 9:46:40 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۲۷) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

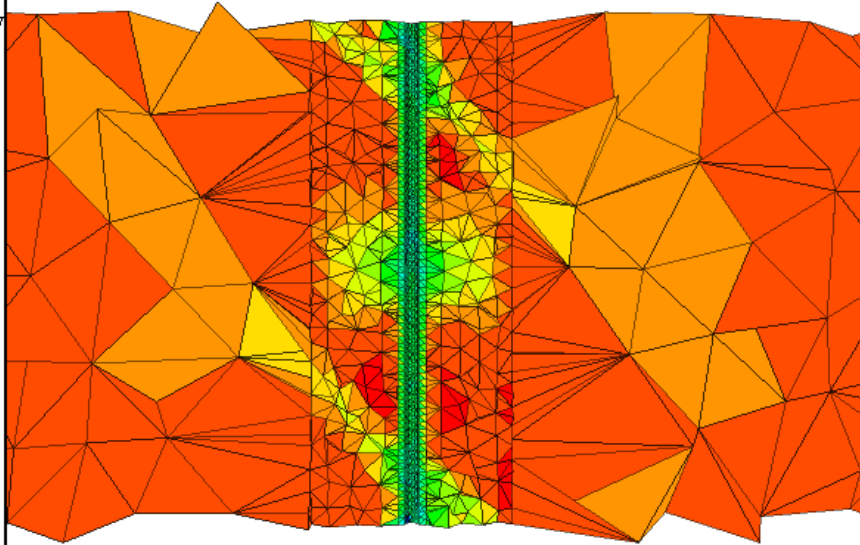
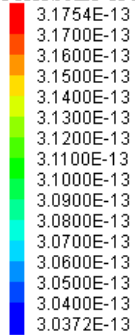
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 133204

3/29/2021 9:44:57 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۲۸) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

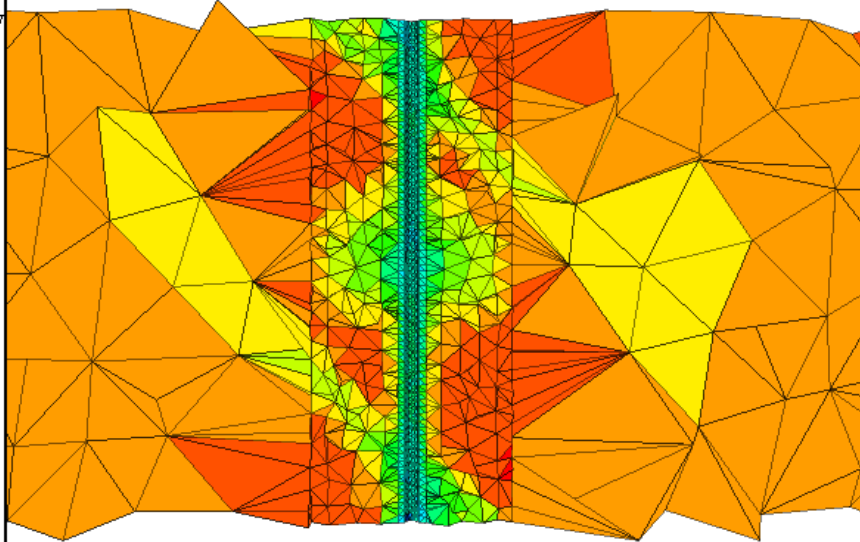
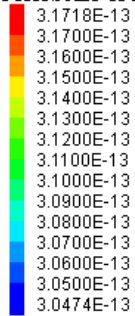
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

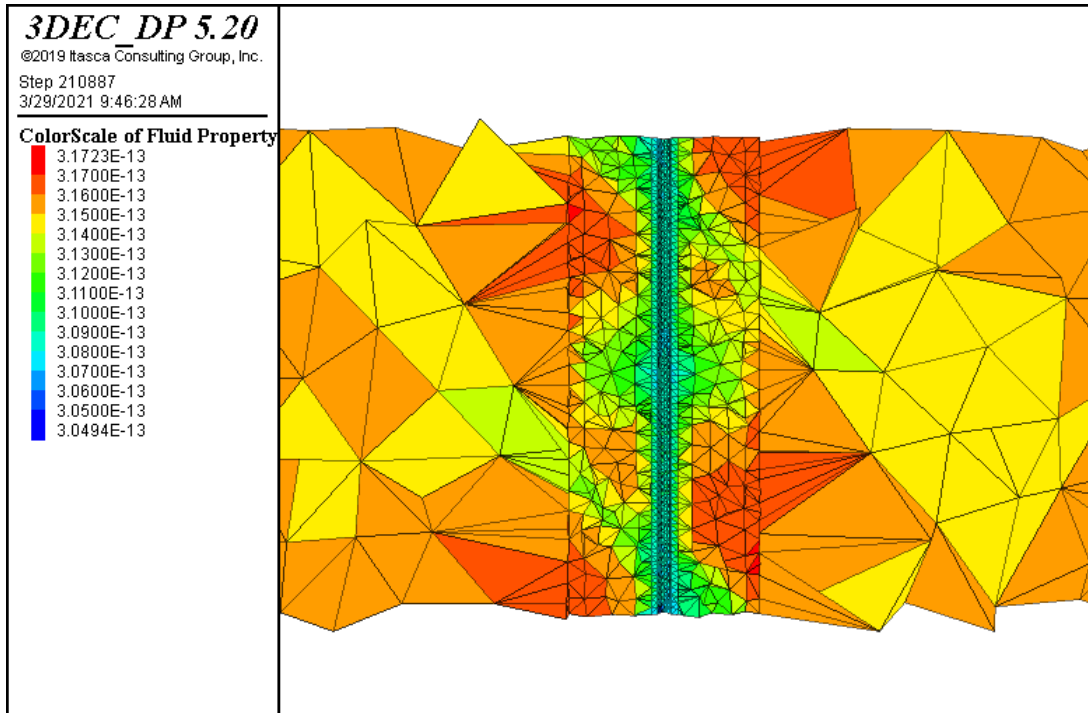
Step 175532

3/29/2021 9:45:56 AM

ColorScale of Fluid Property

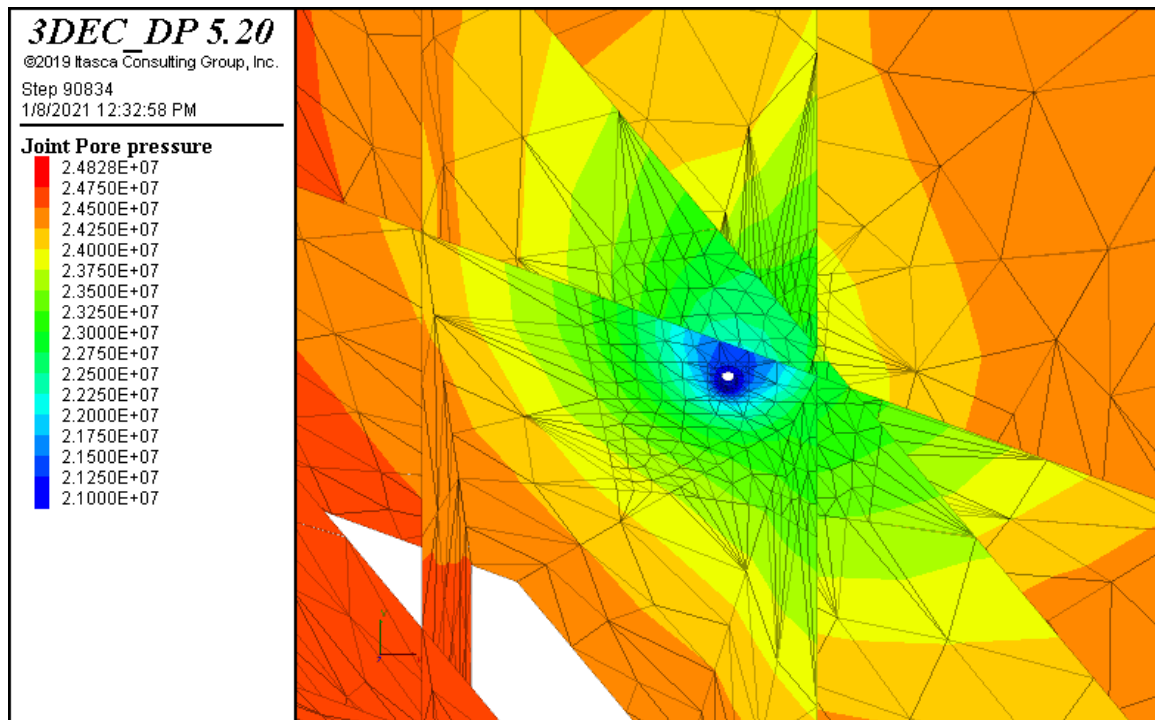


شکل (أ-۲۹) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

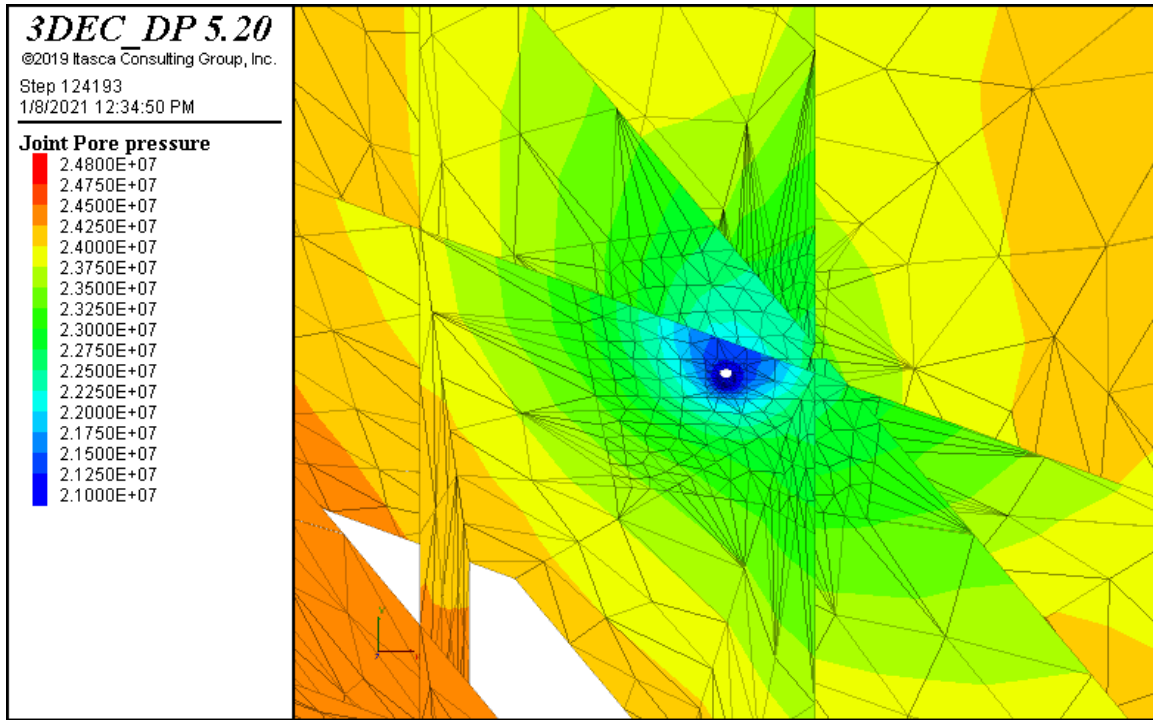


شکل (أ-۳۰) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

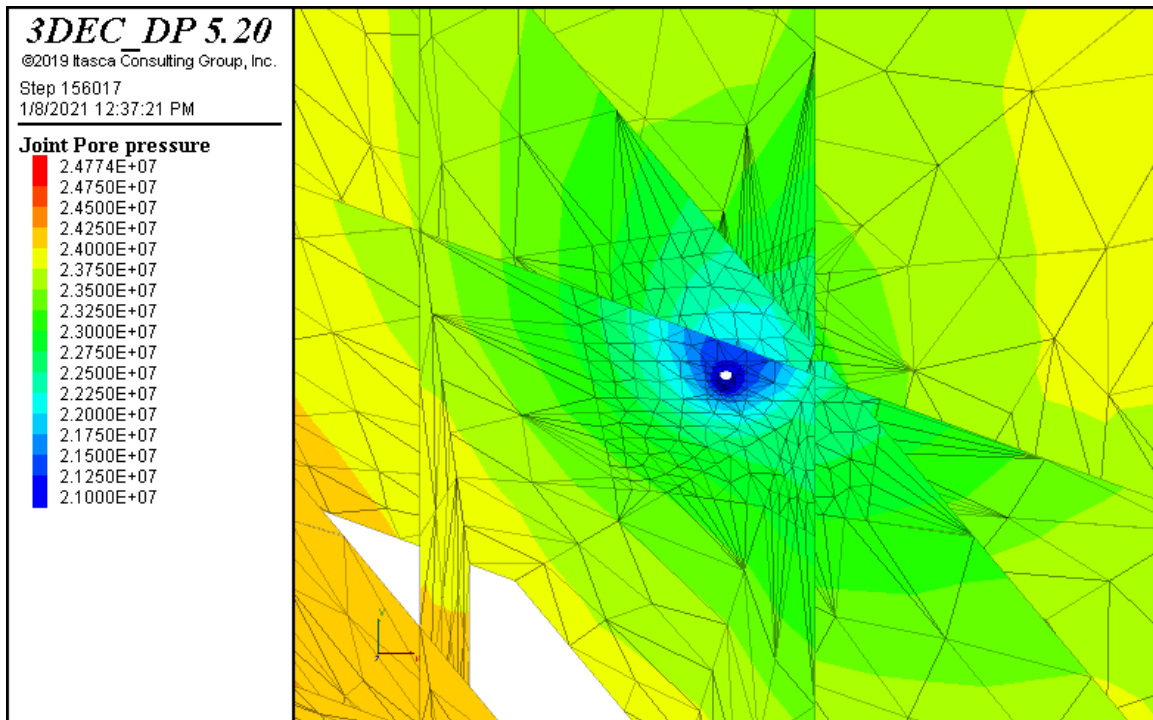
۲. چاه شماره ۱- فشار درون چاه ۲۱ مگاپاسکال



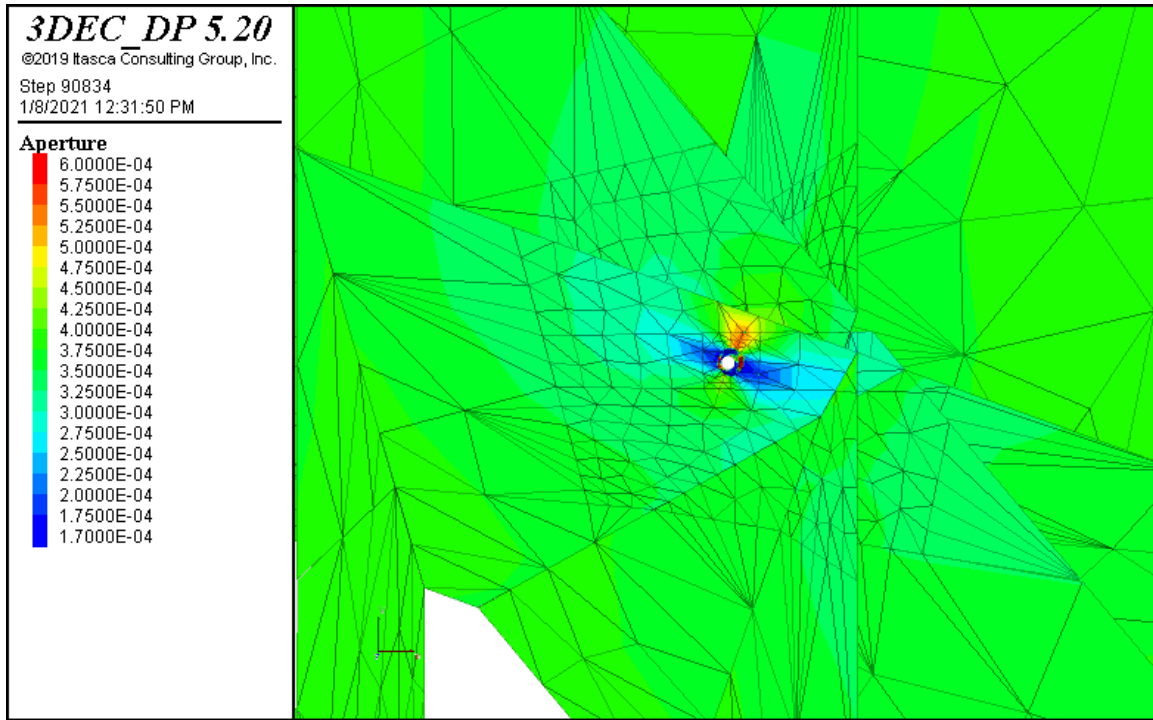
شکل (أ-۳۱) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



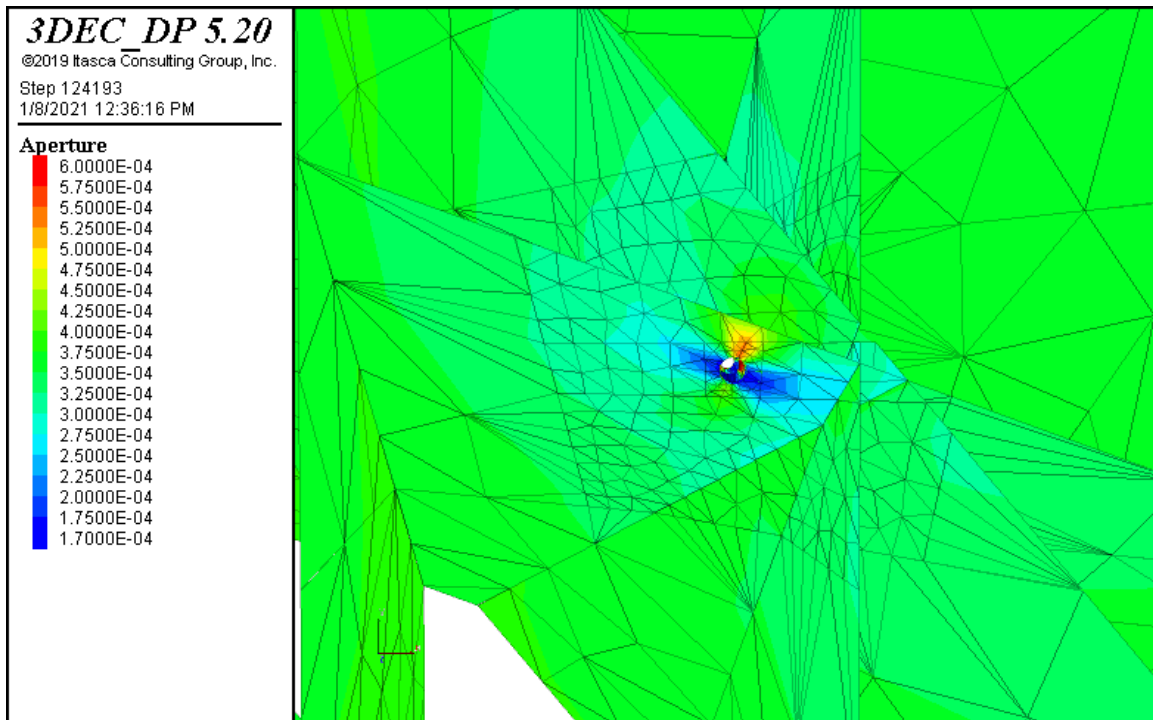
شکل (أ-۳۲) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



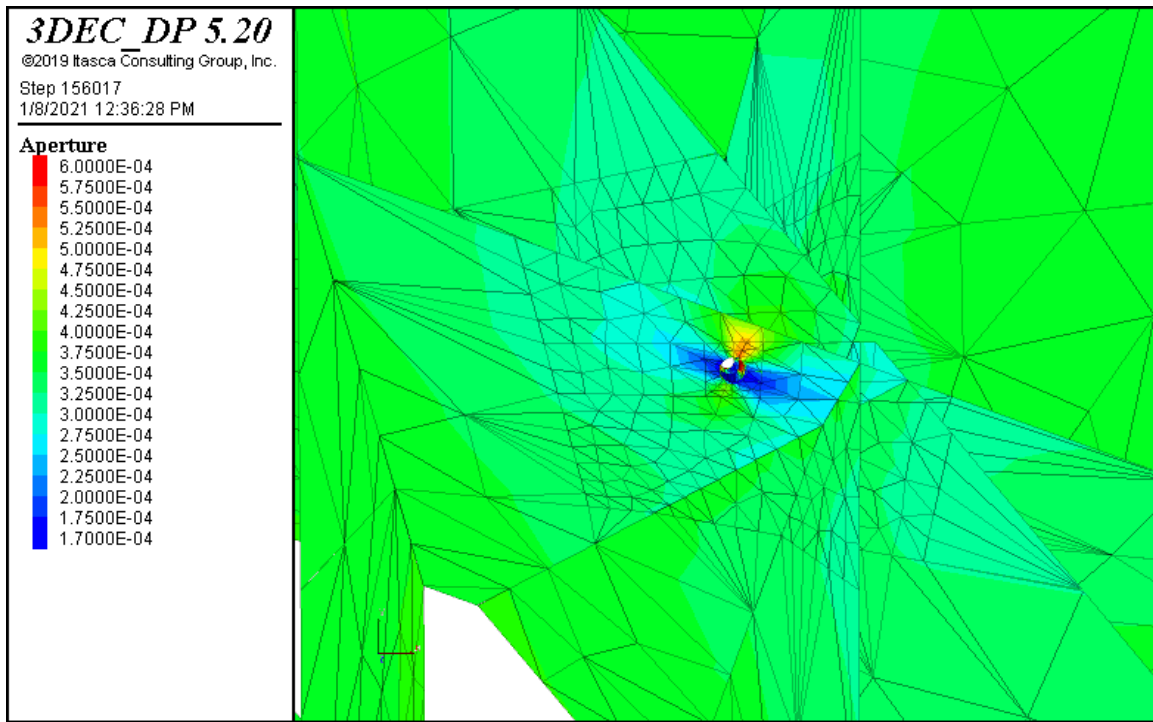
شکل (أ-۳۳) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۳۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.

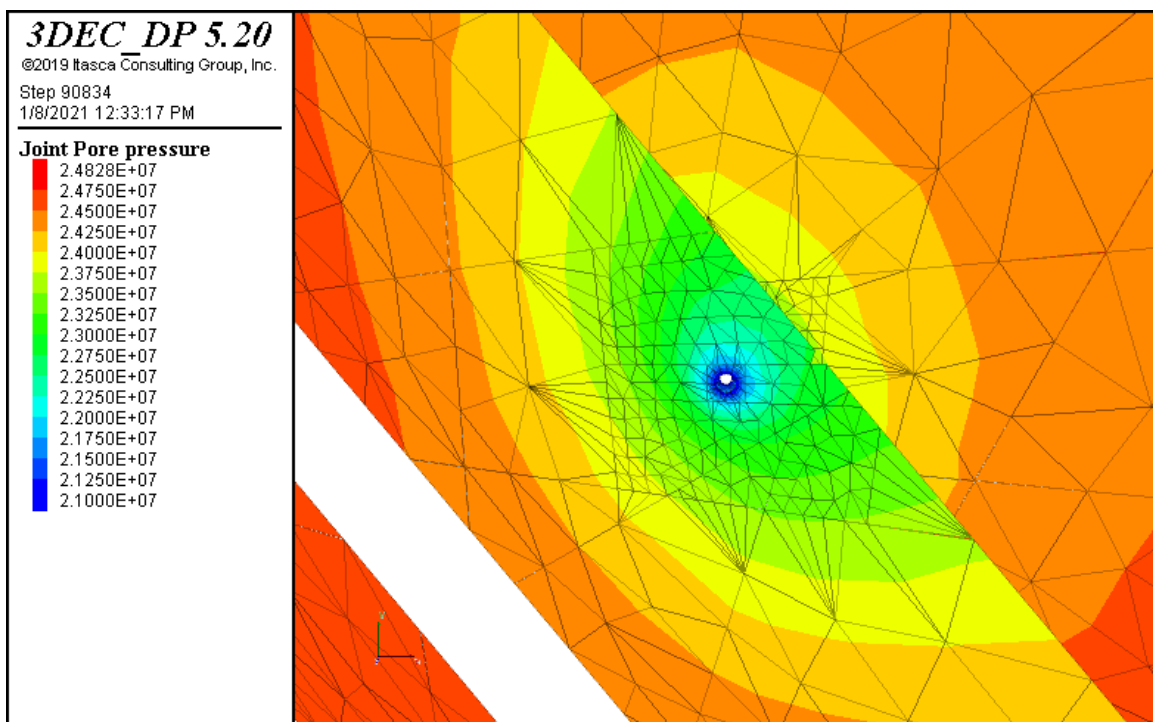


شکل (أ-۳۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.

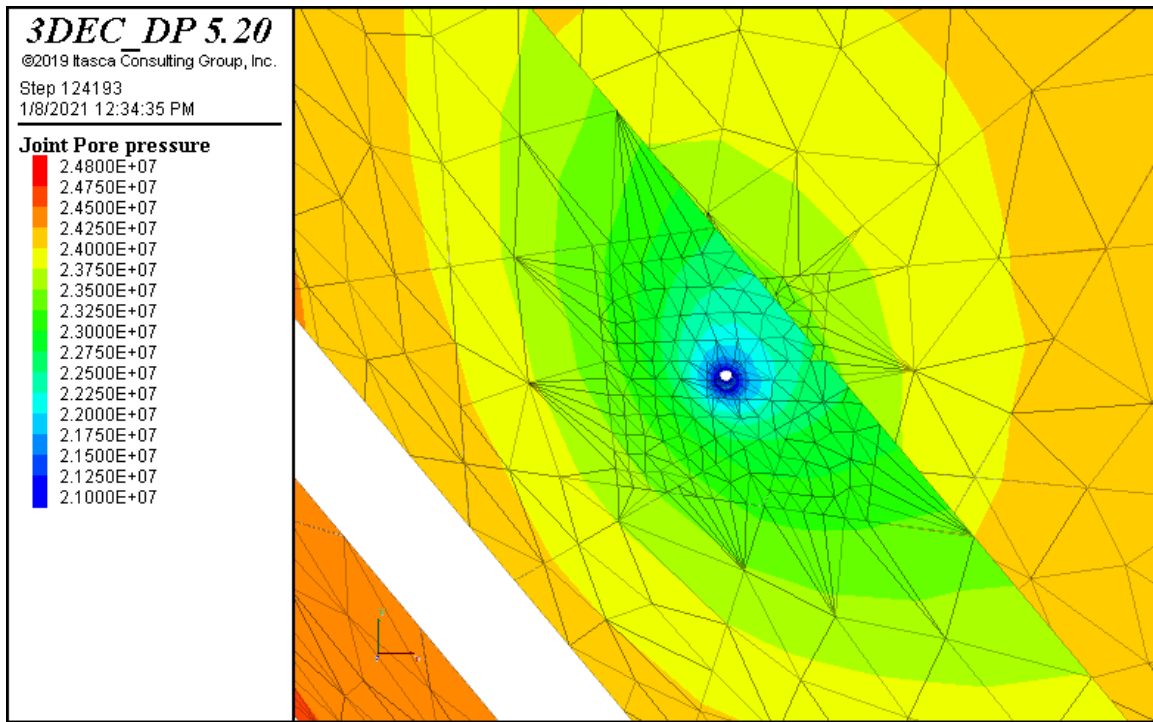


شکل (أ-۳۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

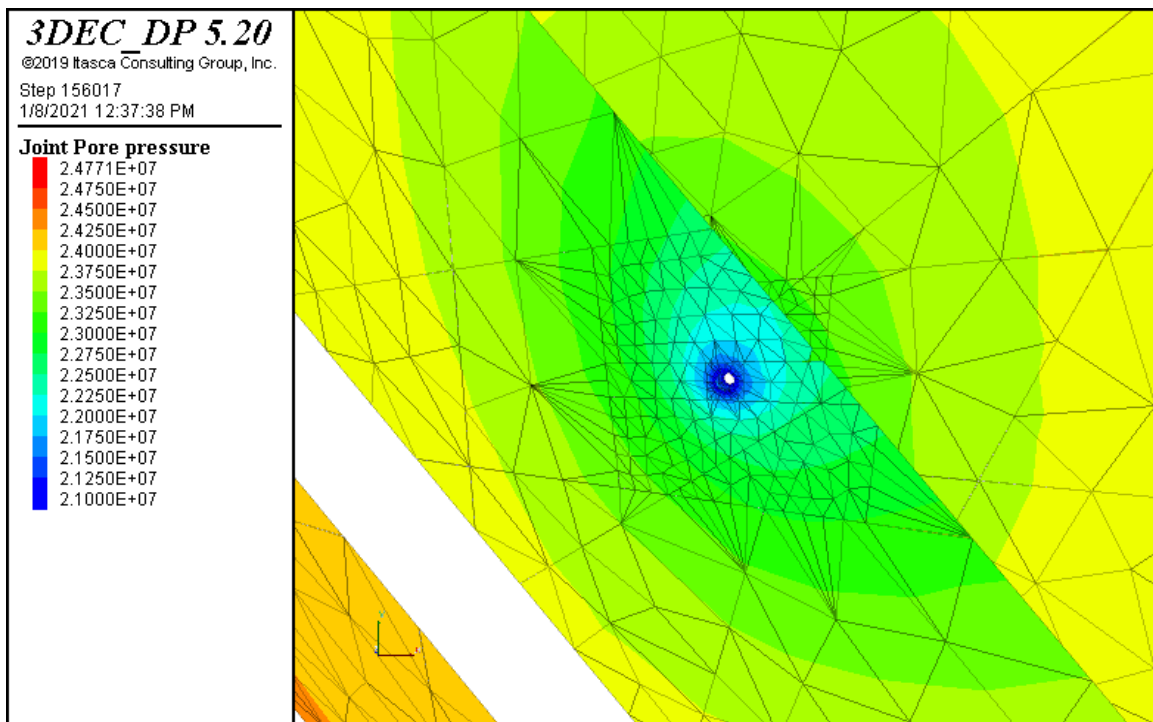
درزه شماره ۱۰



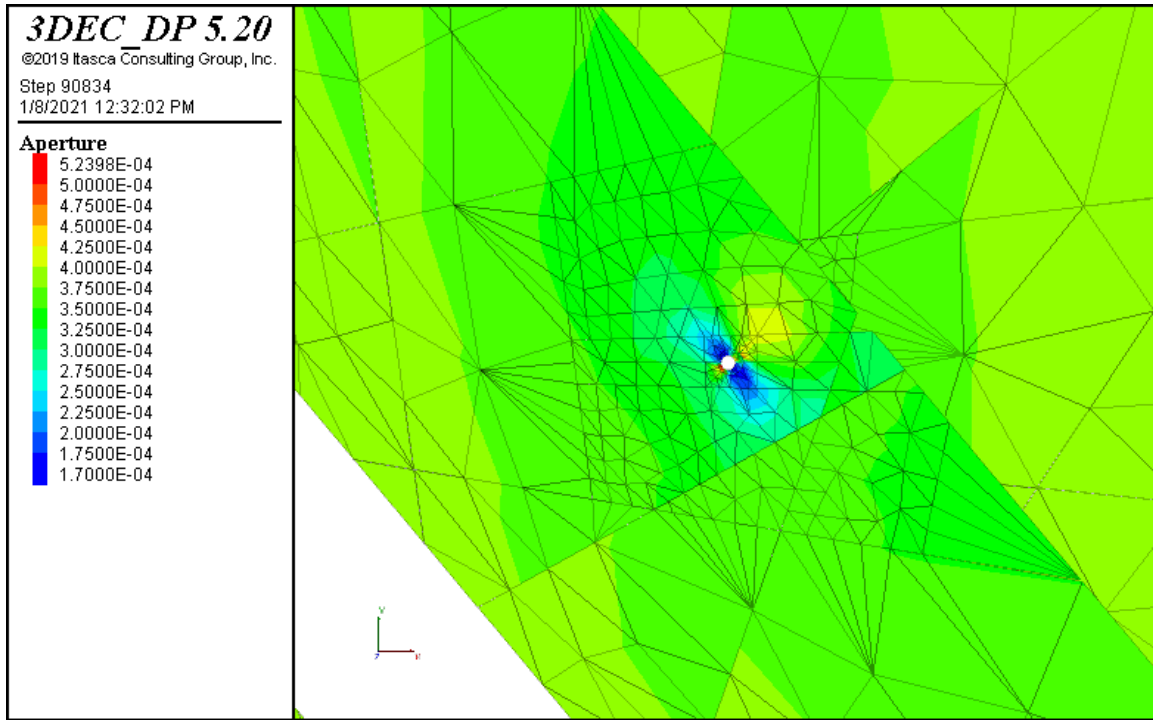
شکل (أ-۳۷) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



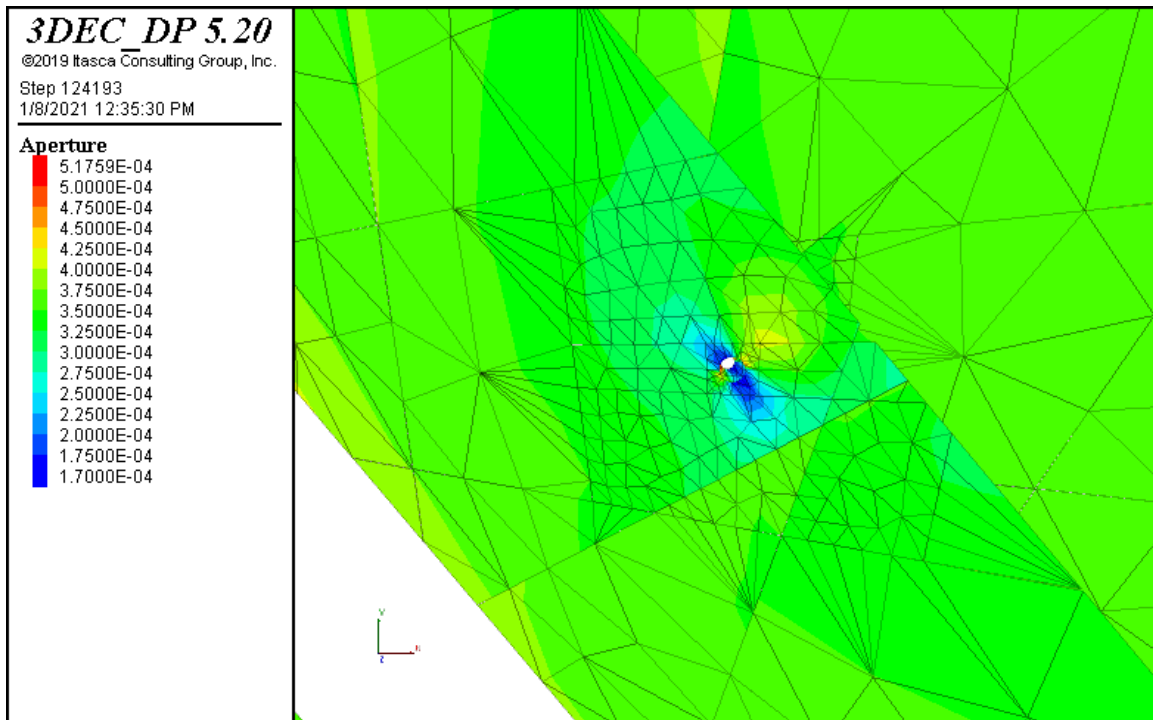
شکل (أ-۳۸) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



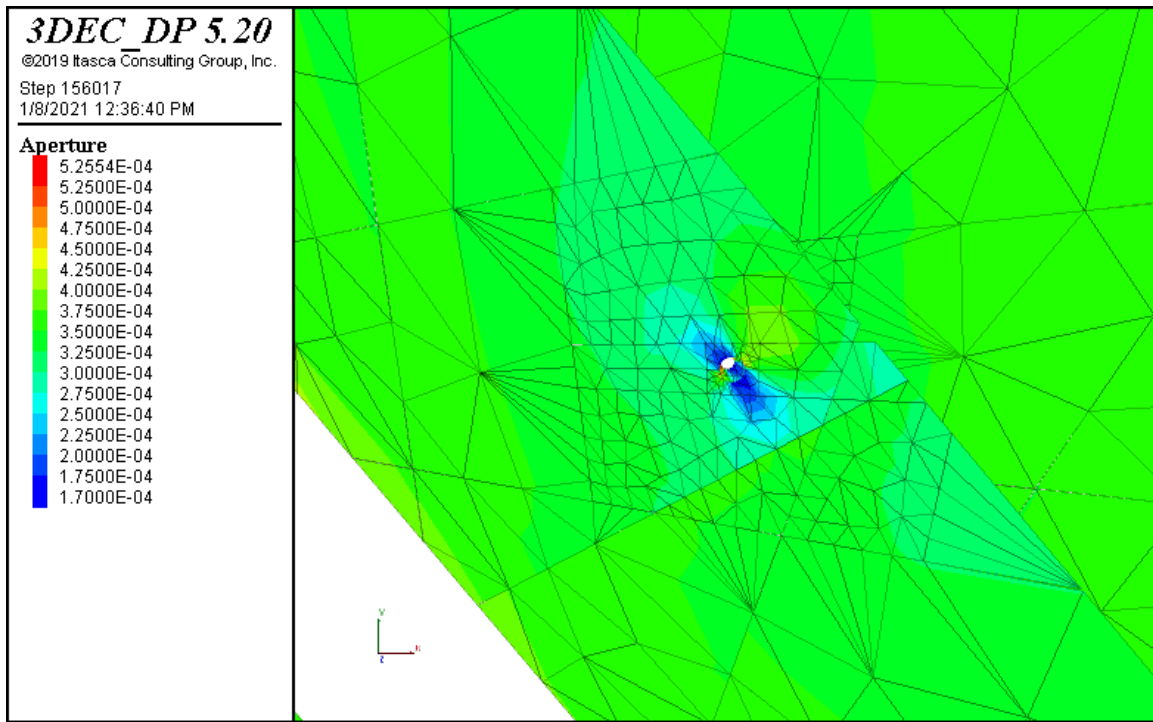
شکل (أ-۳۹) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٤٠) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.

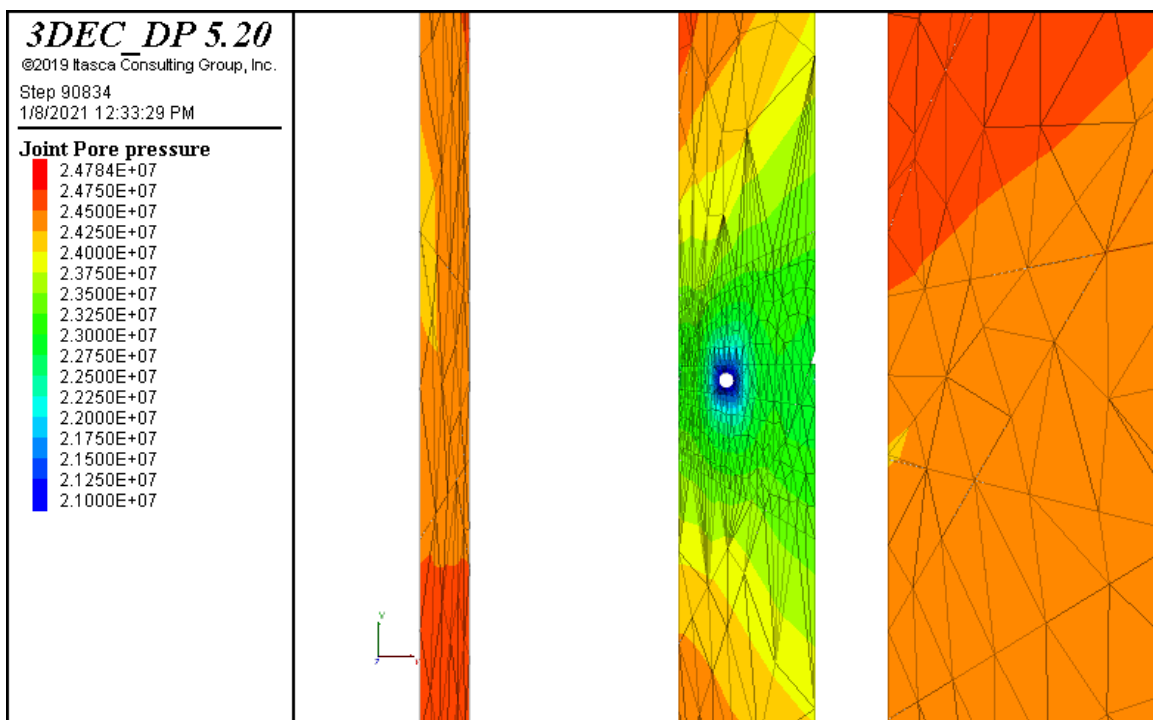


شکل (أ-٤١) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.

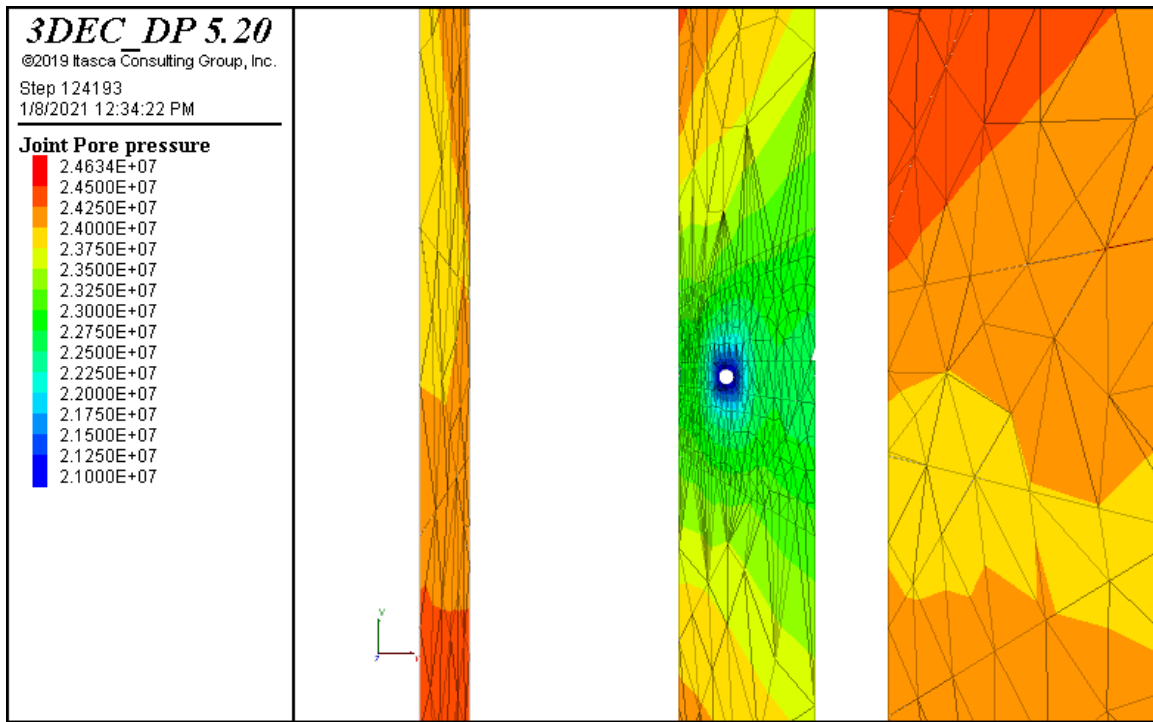


شکل (أ-۴۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

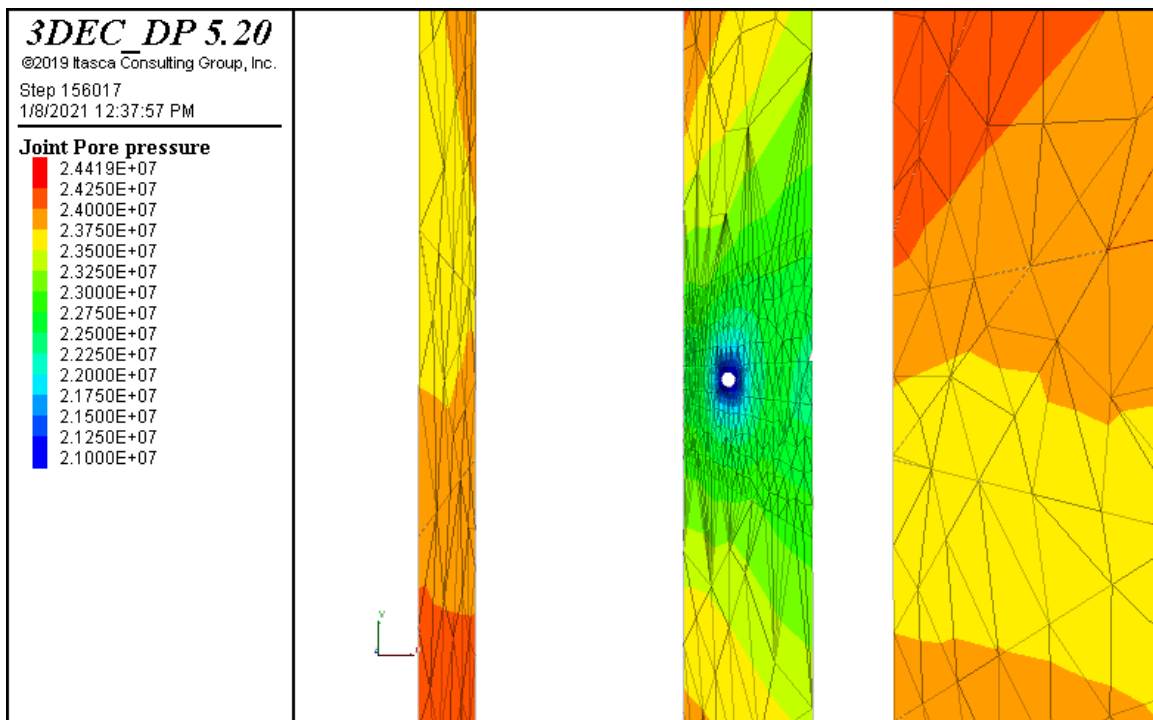
دوزه شماره ۱۱



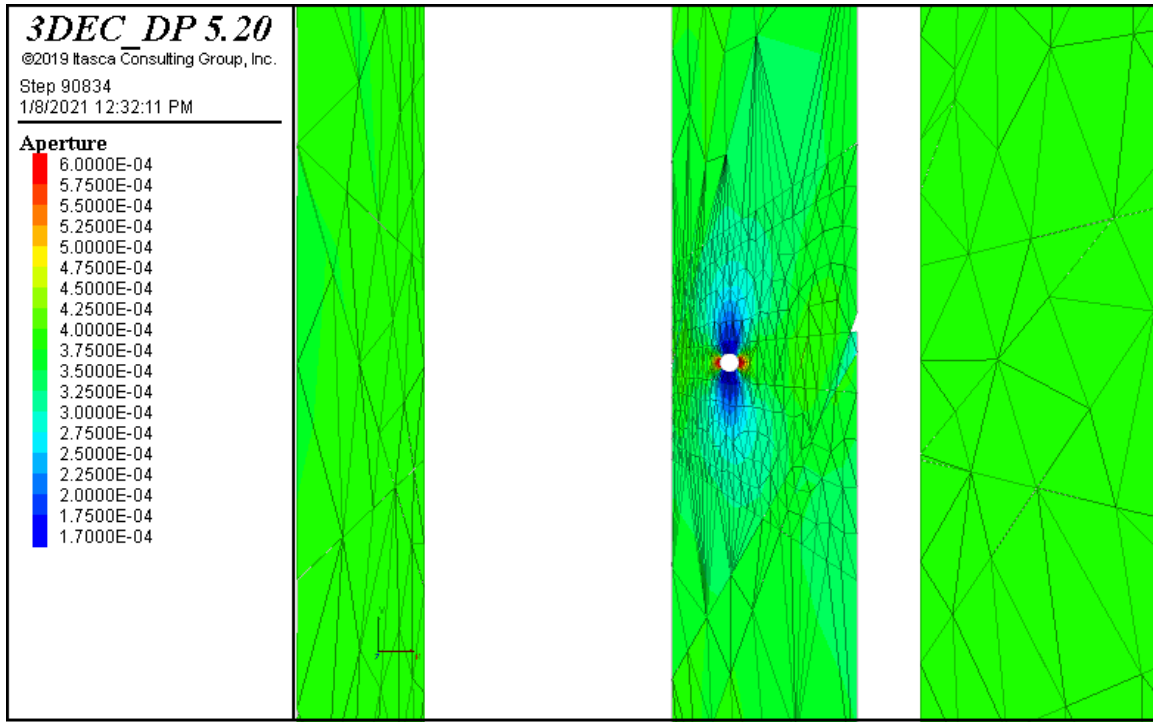
شکل (أ-۴۳) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



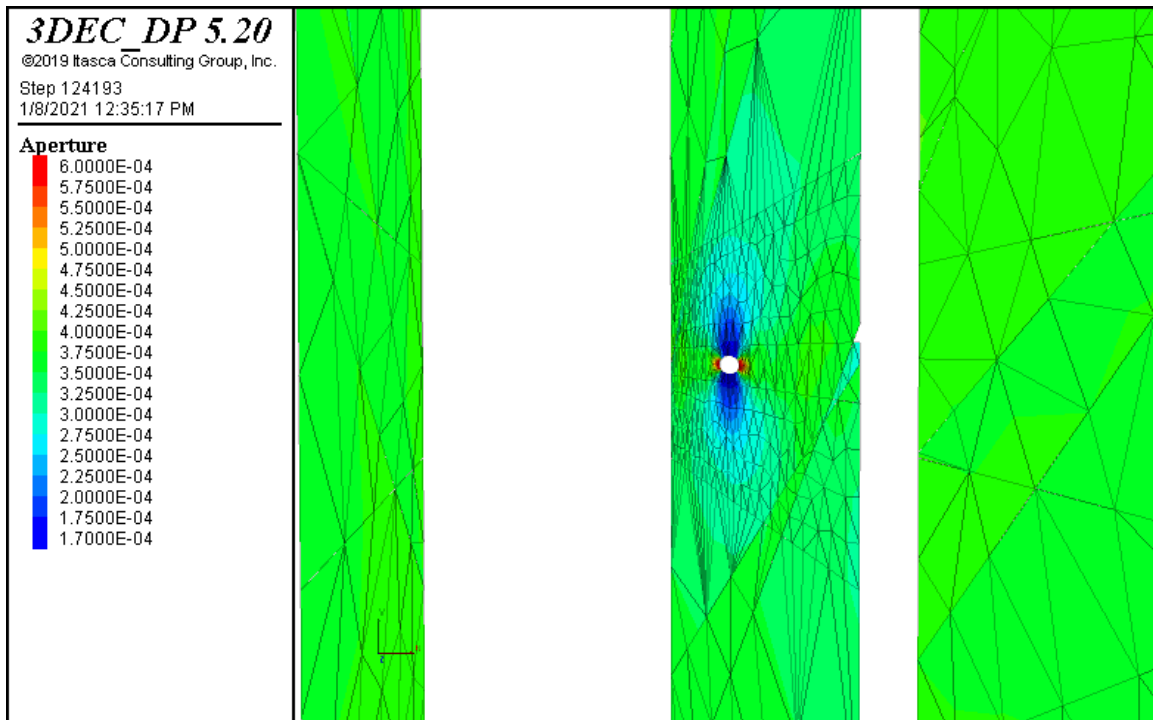
شکل (أ-۴۴) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



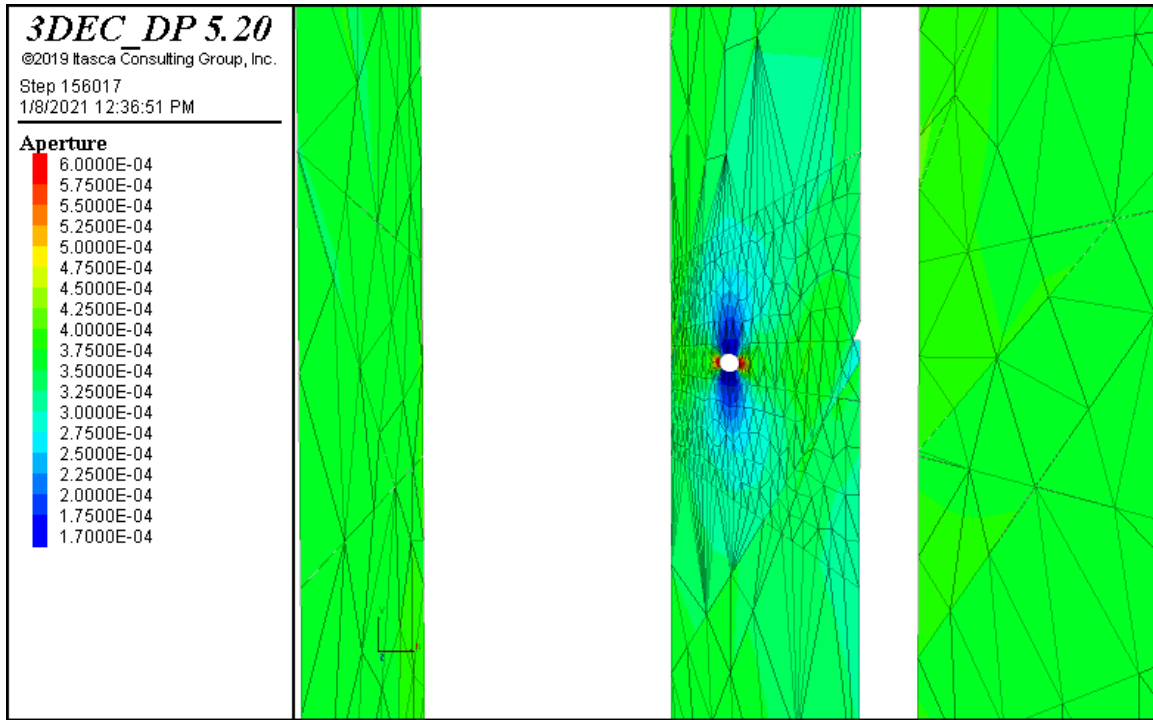
شکل (أ-۴۵) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٤٦) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.

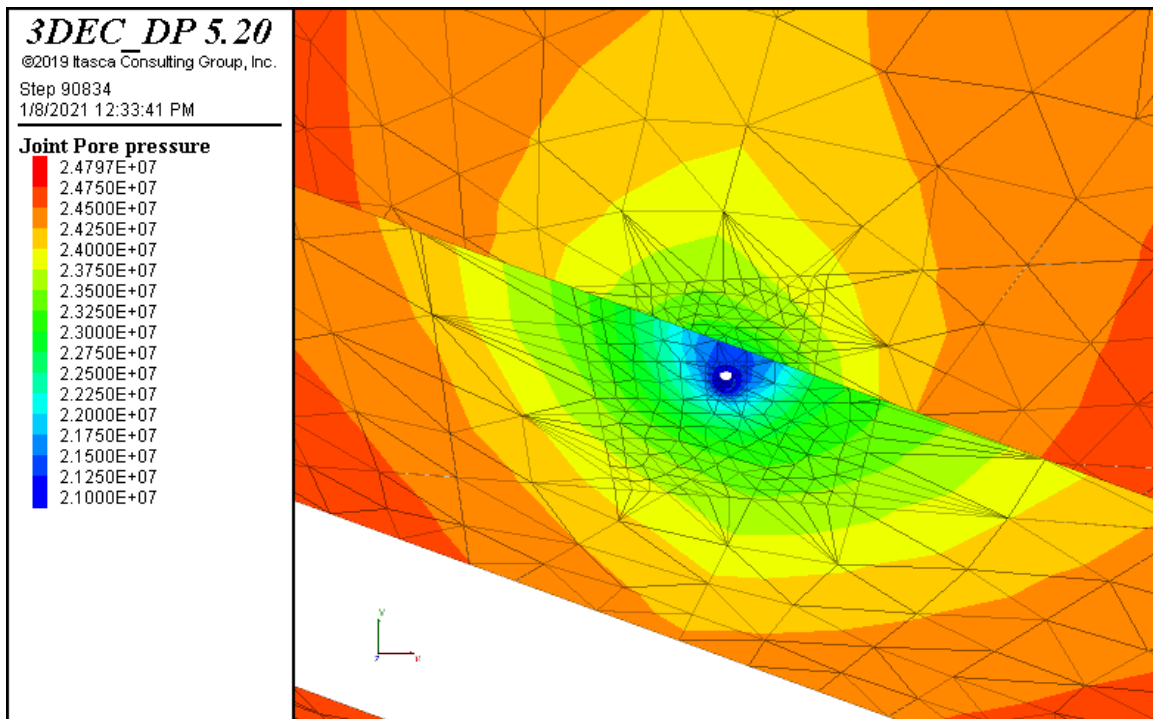


شکل (أ-٤٧) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.

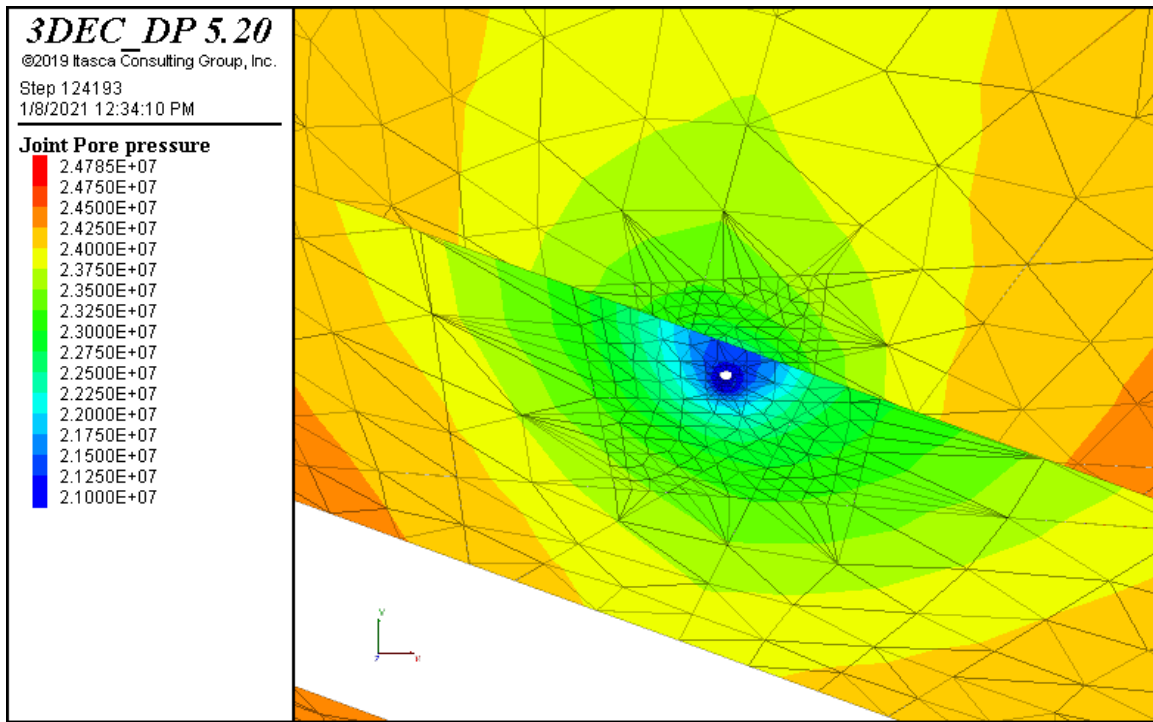


شکل (أ-۴۸) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

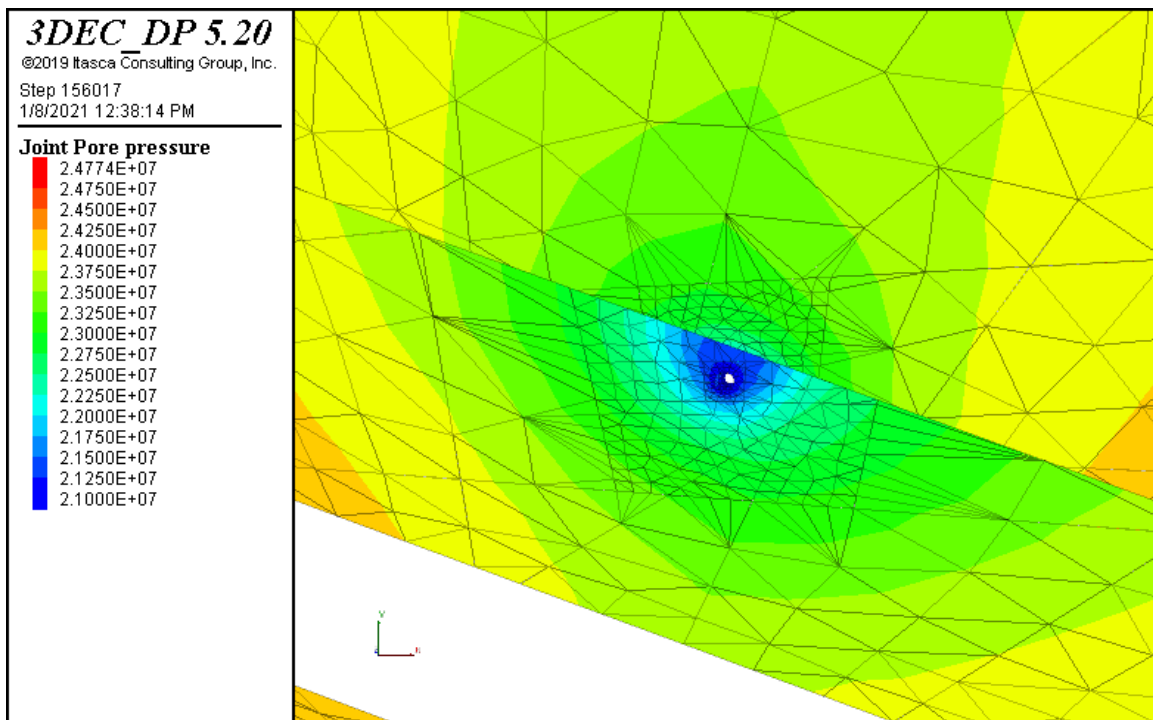
دَرزِه شماره ۱۲



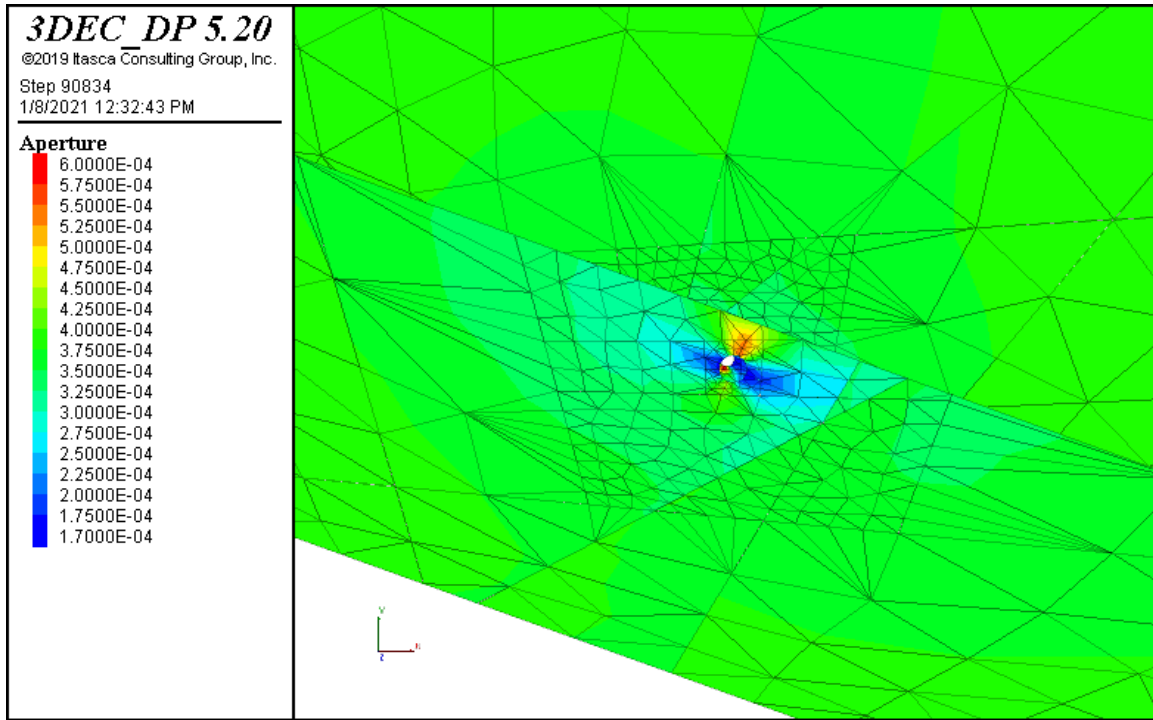
شکل (أ-۴۹) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



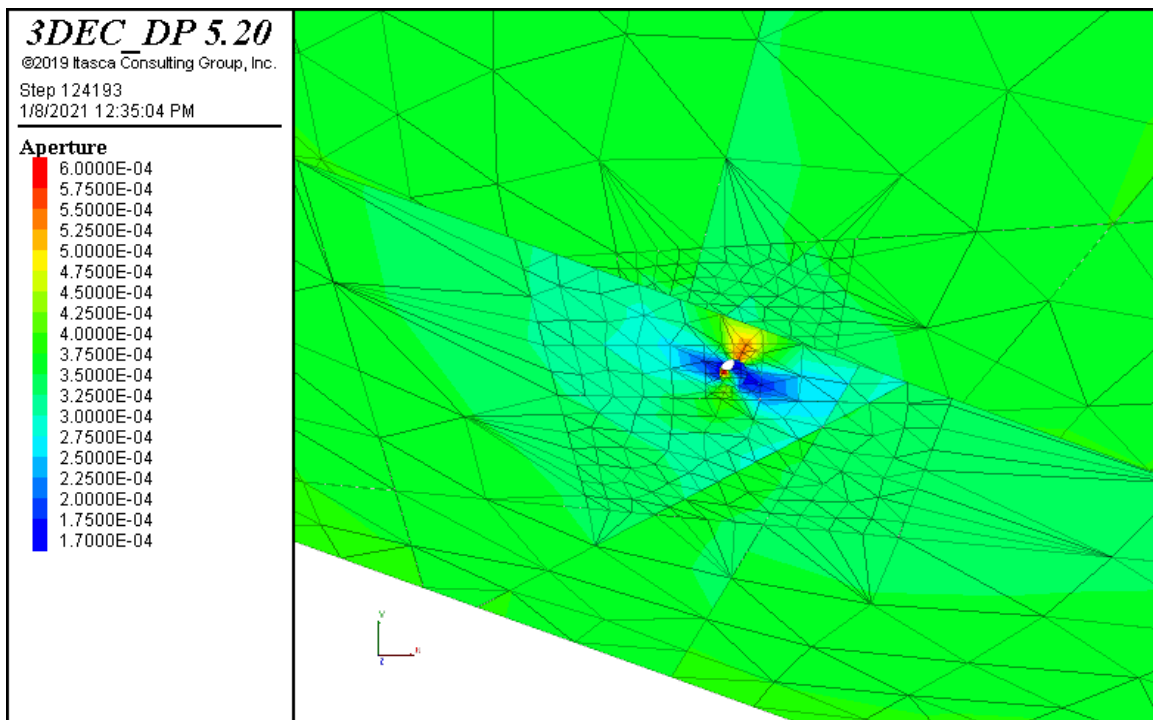
شکل (أ-٥٠) فشارمنفذی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



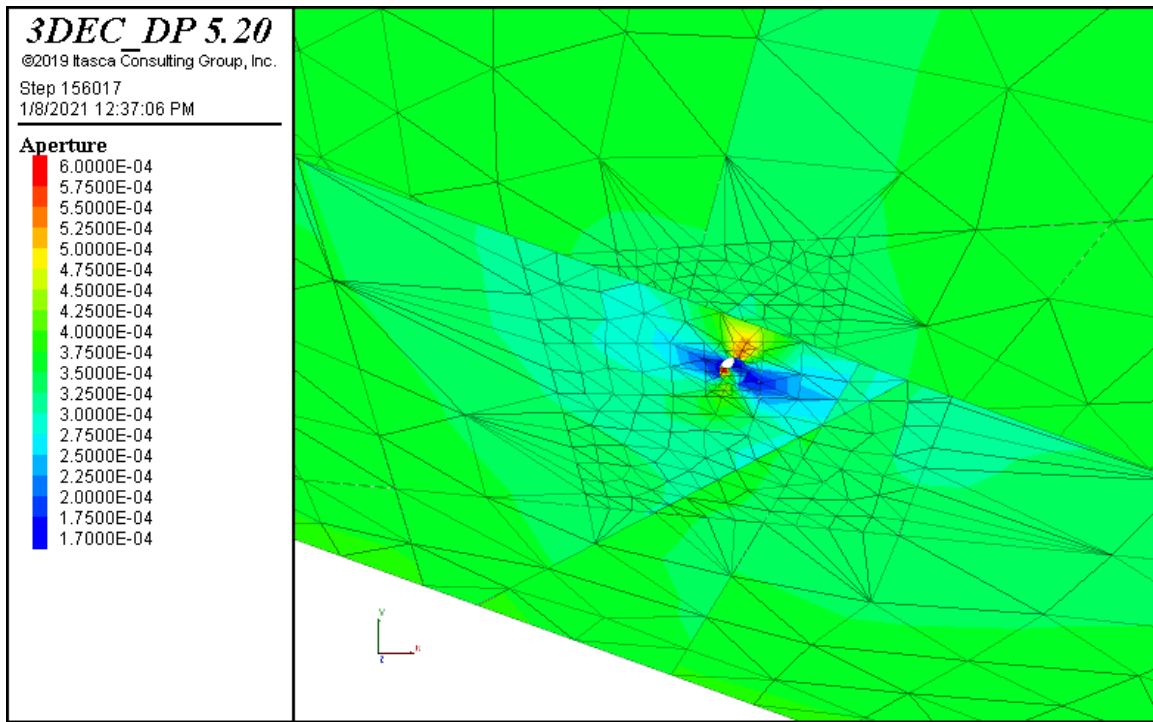
شکل (أ-٥١) فشارمنفذی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



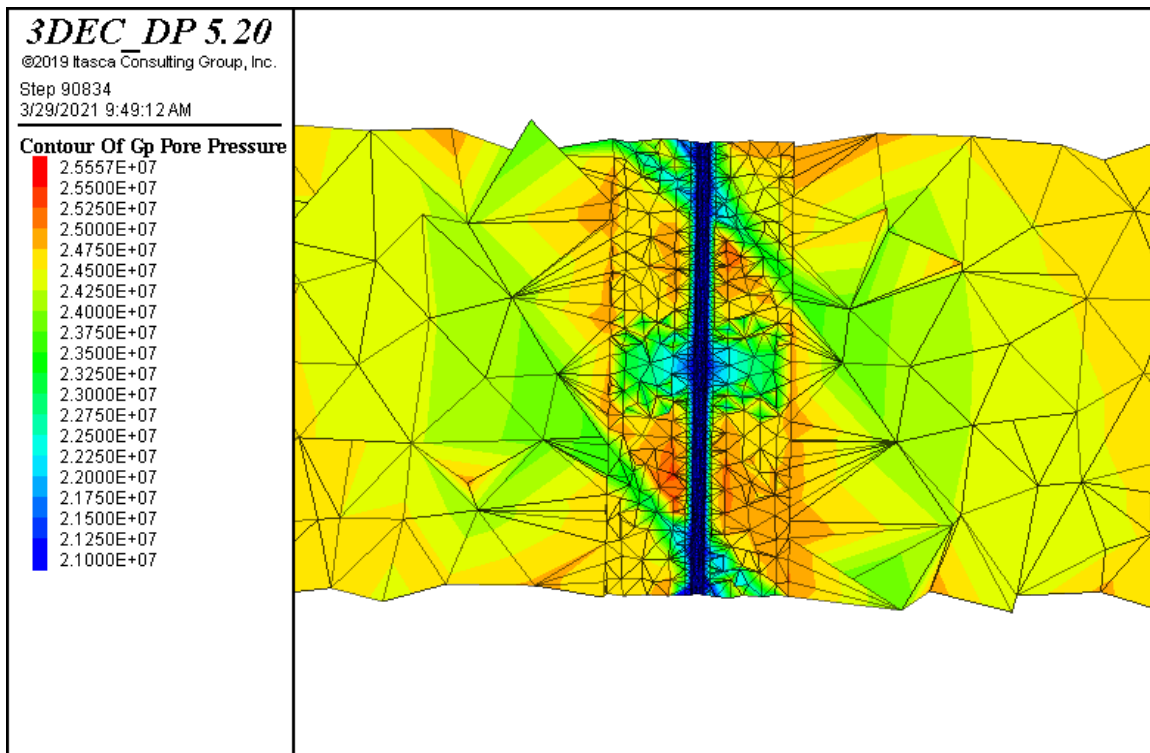
شکل (أ-۵۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۵۳) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۵۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۵۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در چاه شماره ۱.

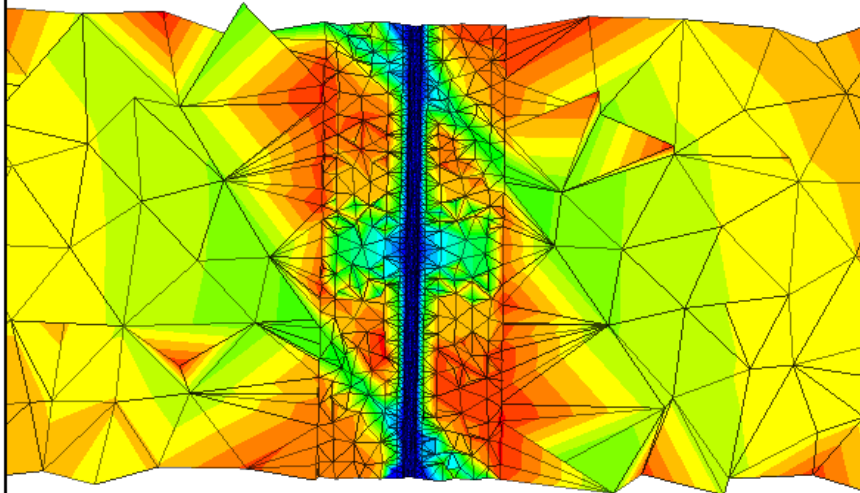
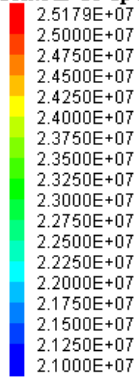
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 124193

3/29/2021 9:49:38 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۵۶) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

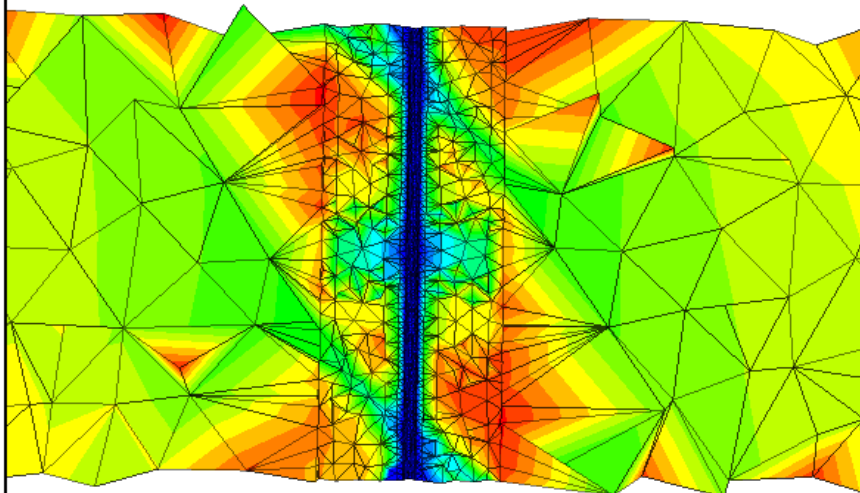
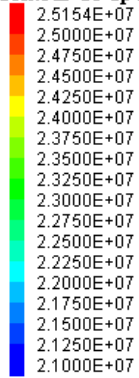
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 156017

3/29/2021 9:50:38 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۵۷) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

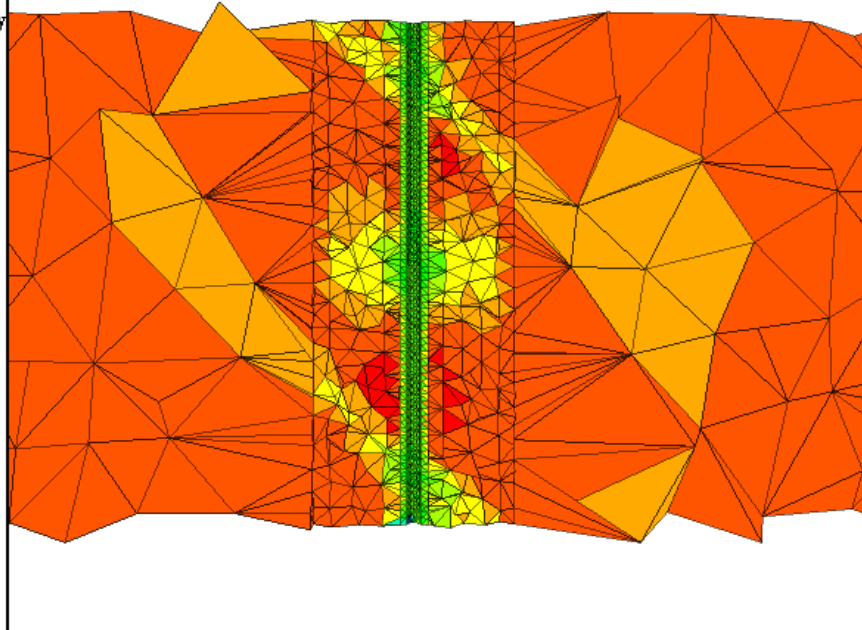
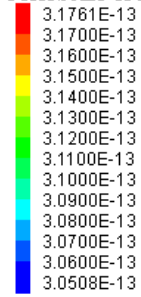
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 90834

3/29/2021 9:48:44 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۵۸) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

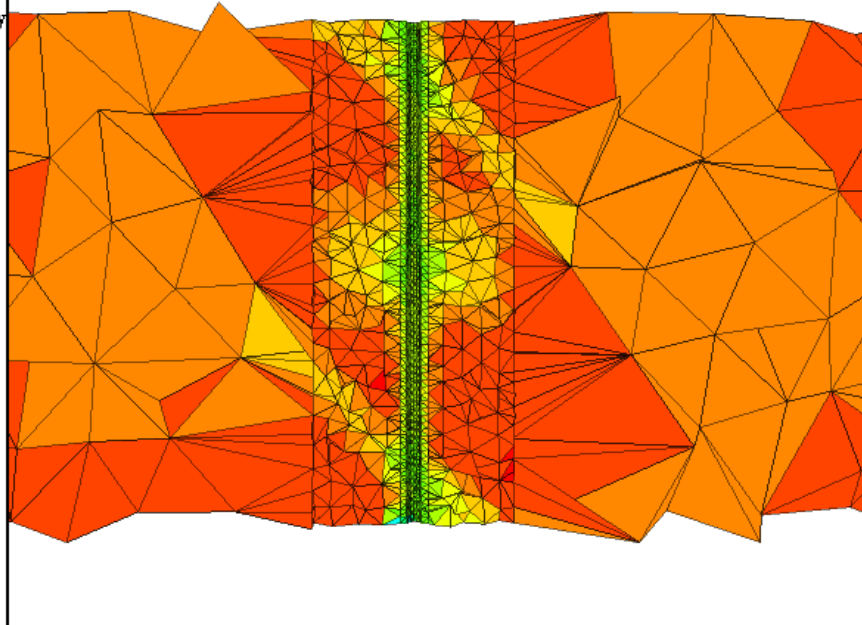
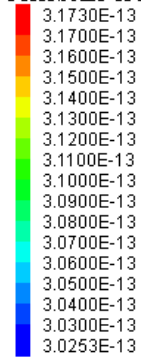
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 124193

3/29/2021 9:49:56 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۵۹) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

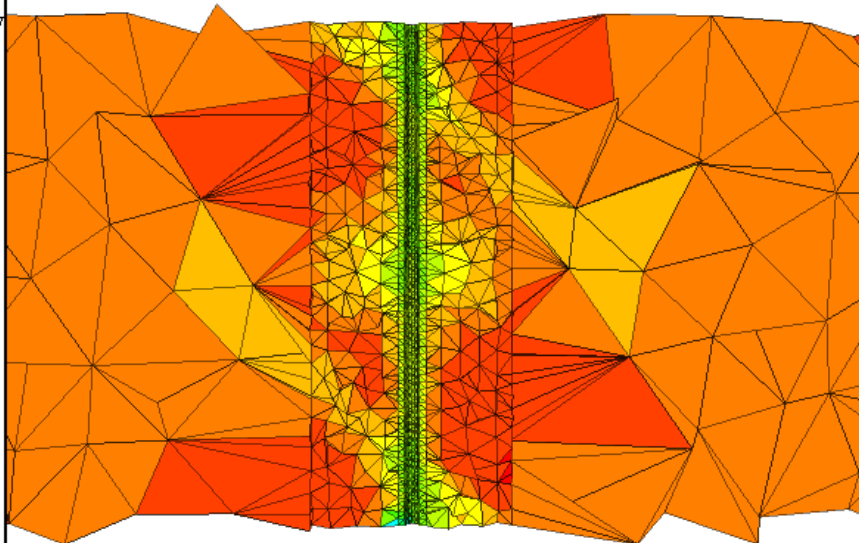
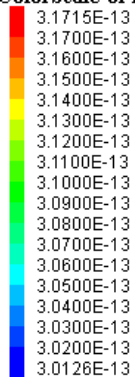
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 156017

3/29/2021 9:50:27 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۶۰) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۱.

۳. چاه شماره ۲- فشار درون چاه ۱۸ مگاپاسکال

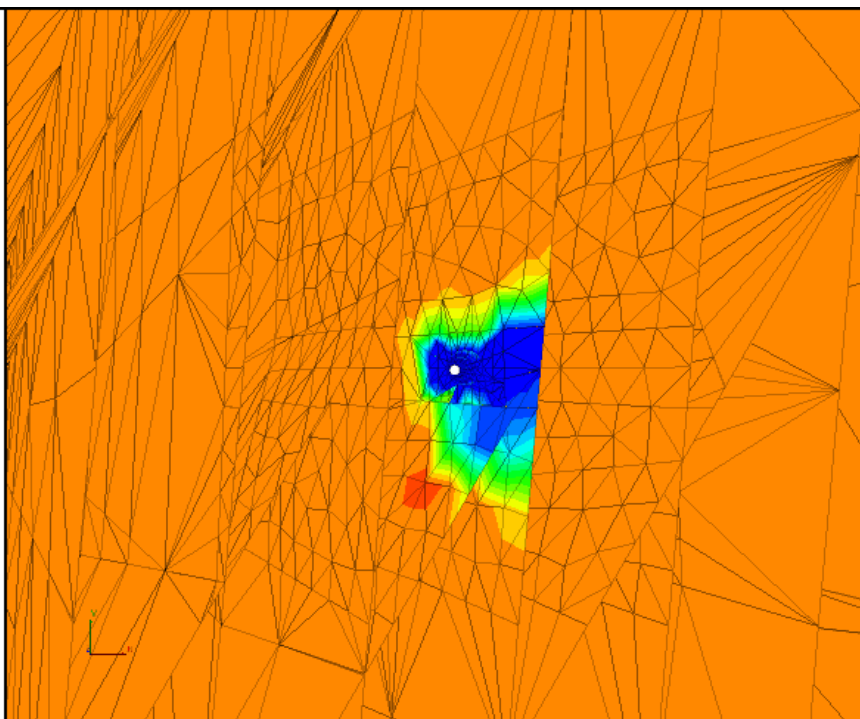
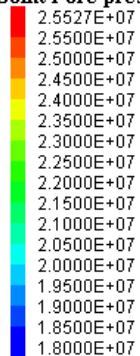
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

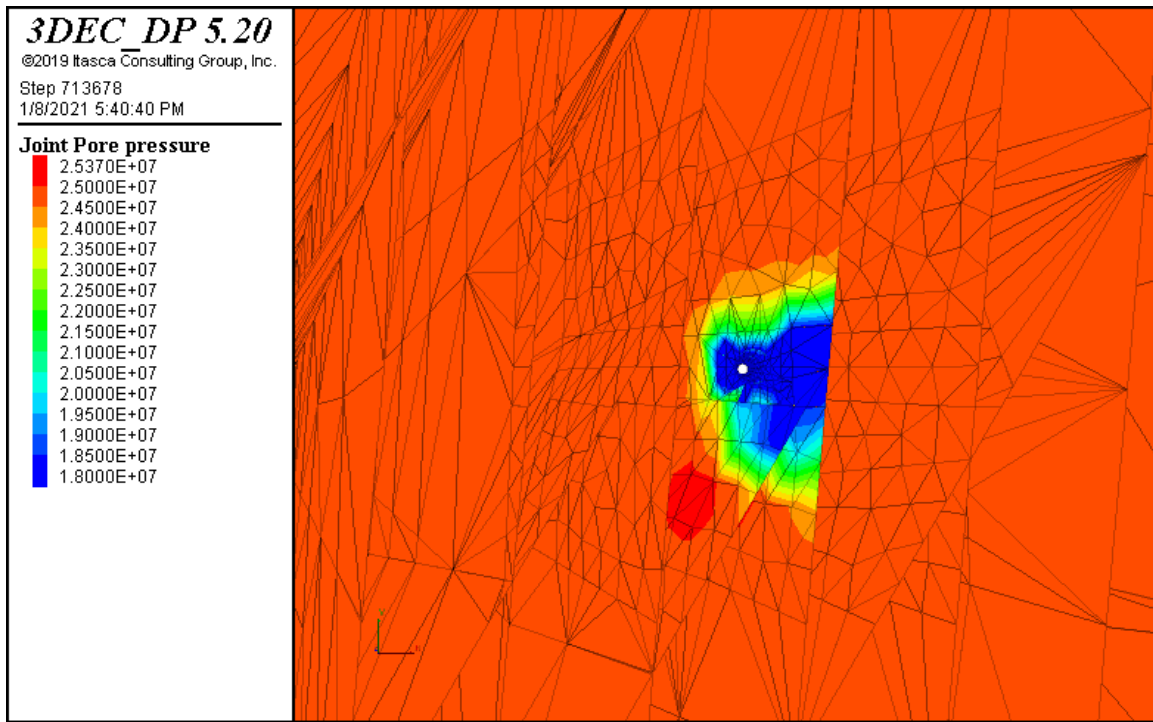
Step 431283

1/8/2021 5:40:20 PM

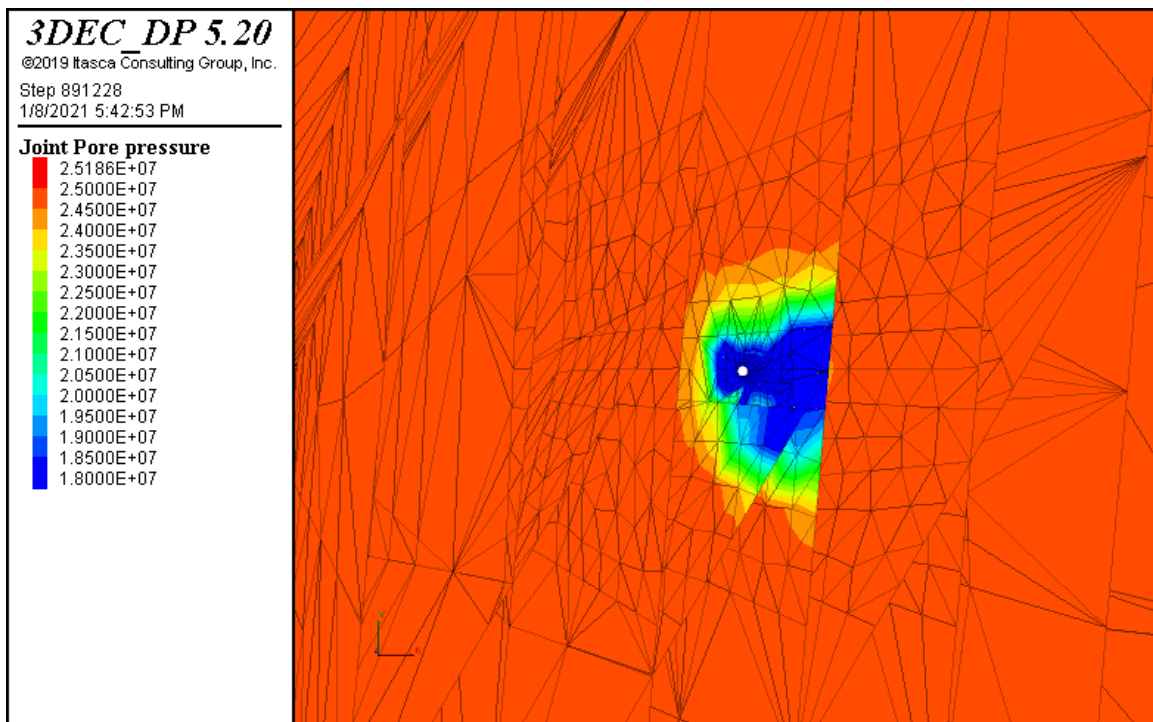
Joint Pore pressure



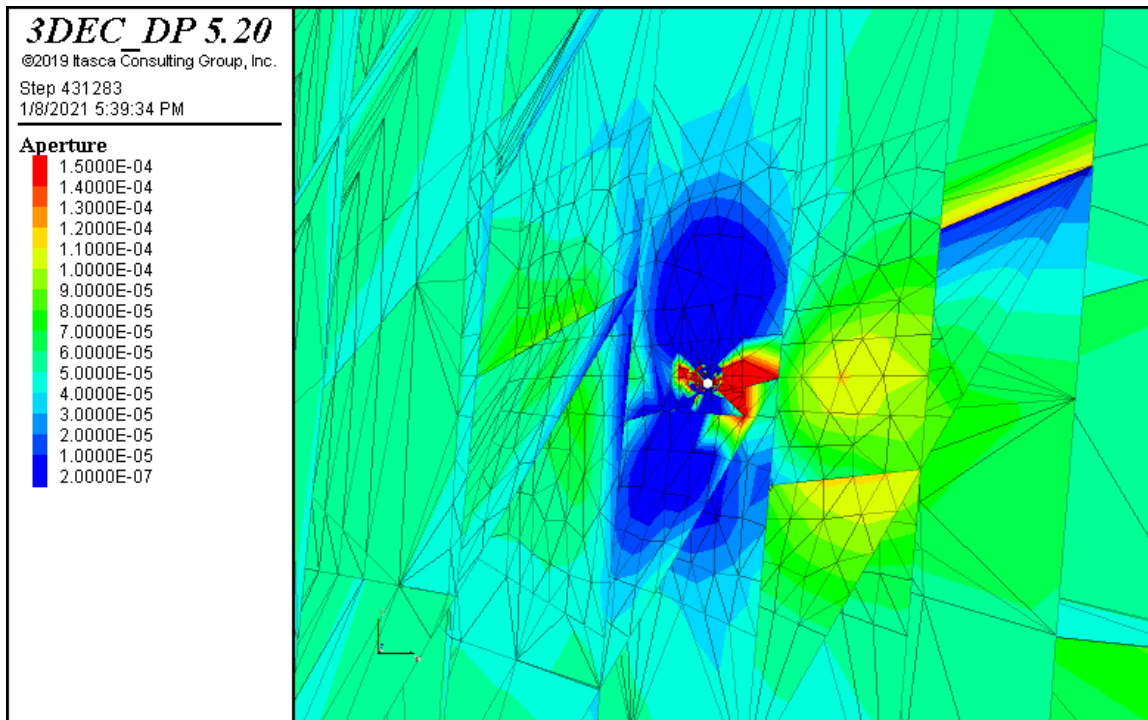
شکل (أ-۶۱) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



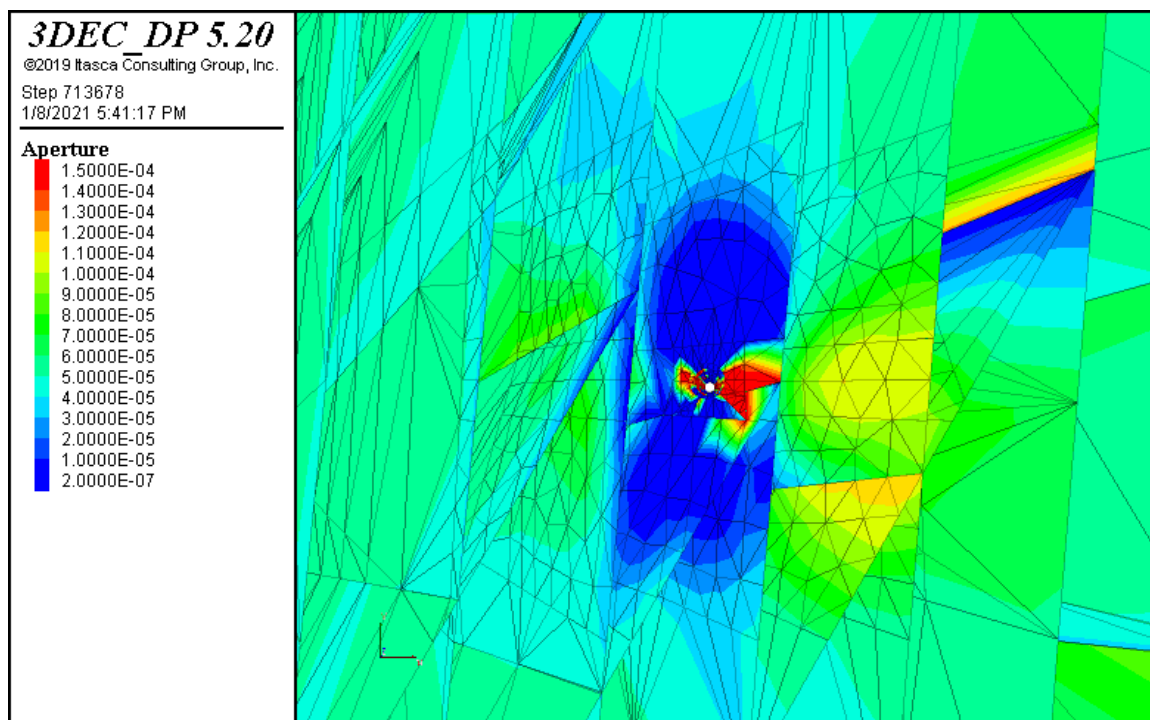
شکل (أ-٦٢) فشارمنفذی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



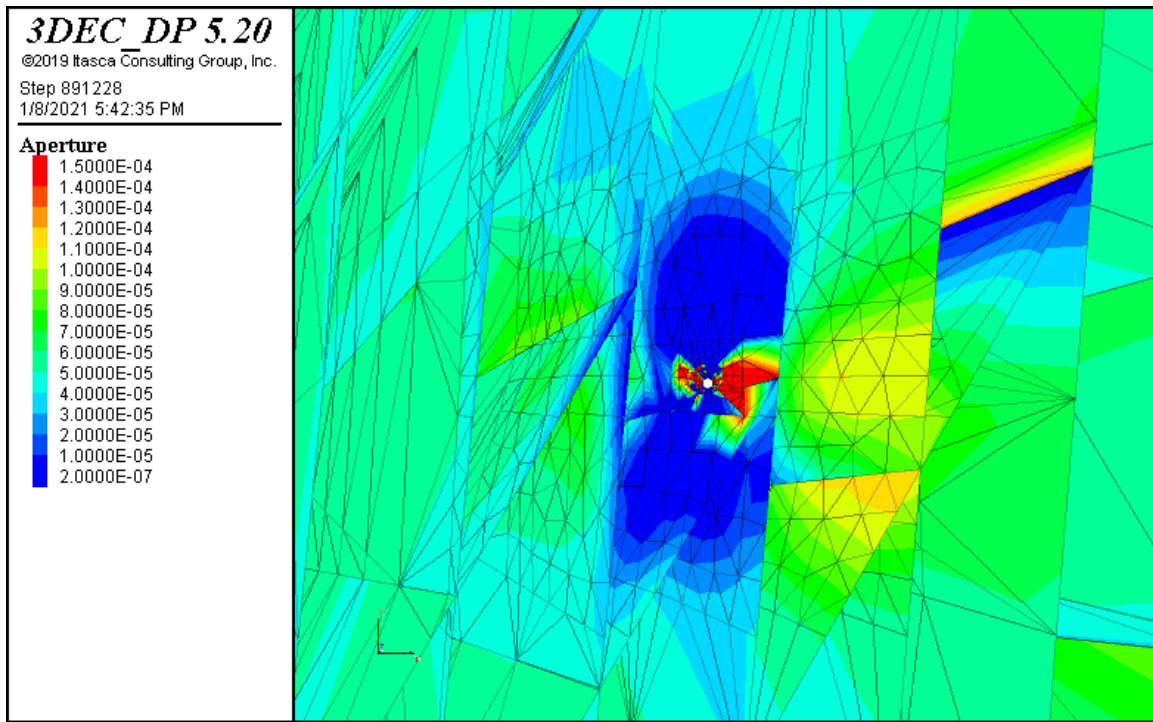
شکل (أ-٦٣) فشارمنفذی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٦٤) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.

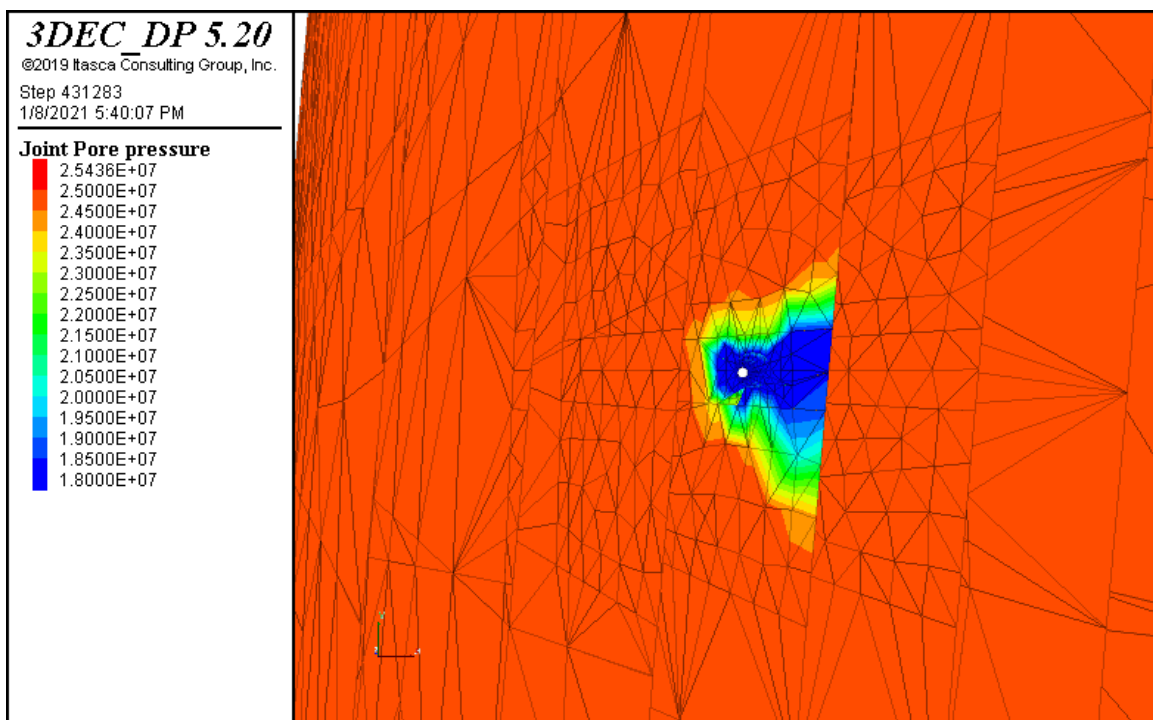


شکل (أ-٦٥) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.

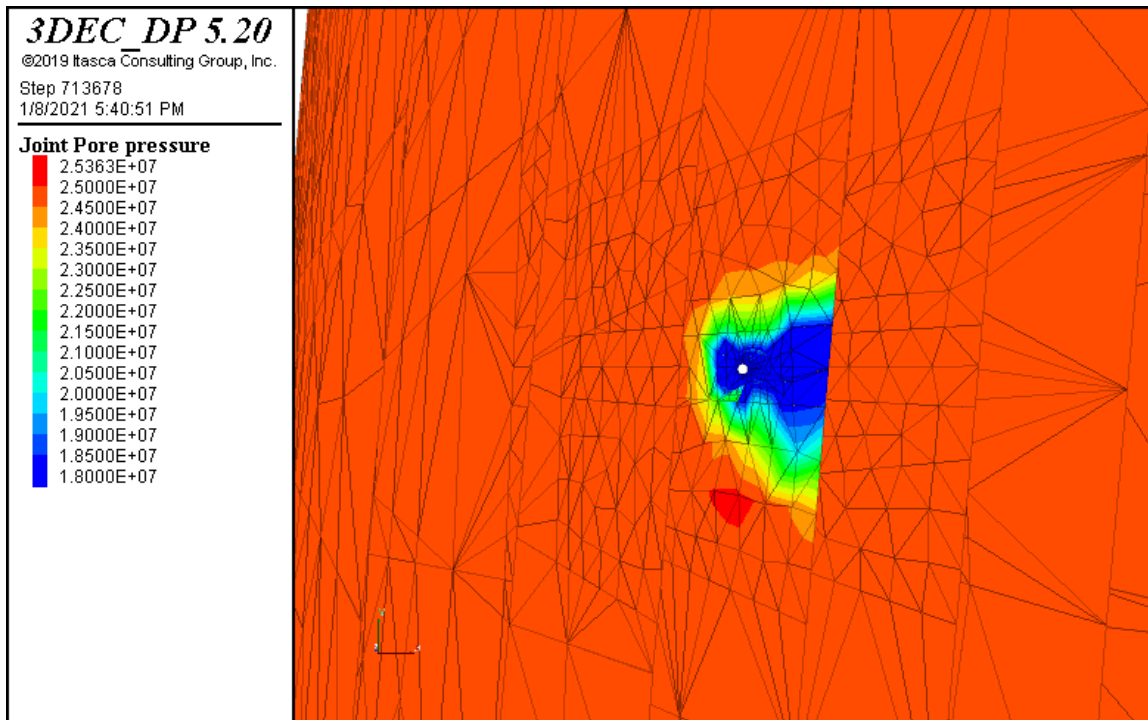


شکل (أ-۶۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

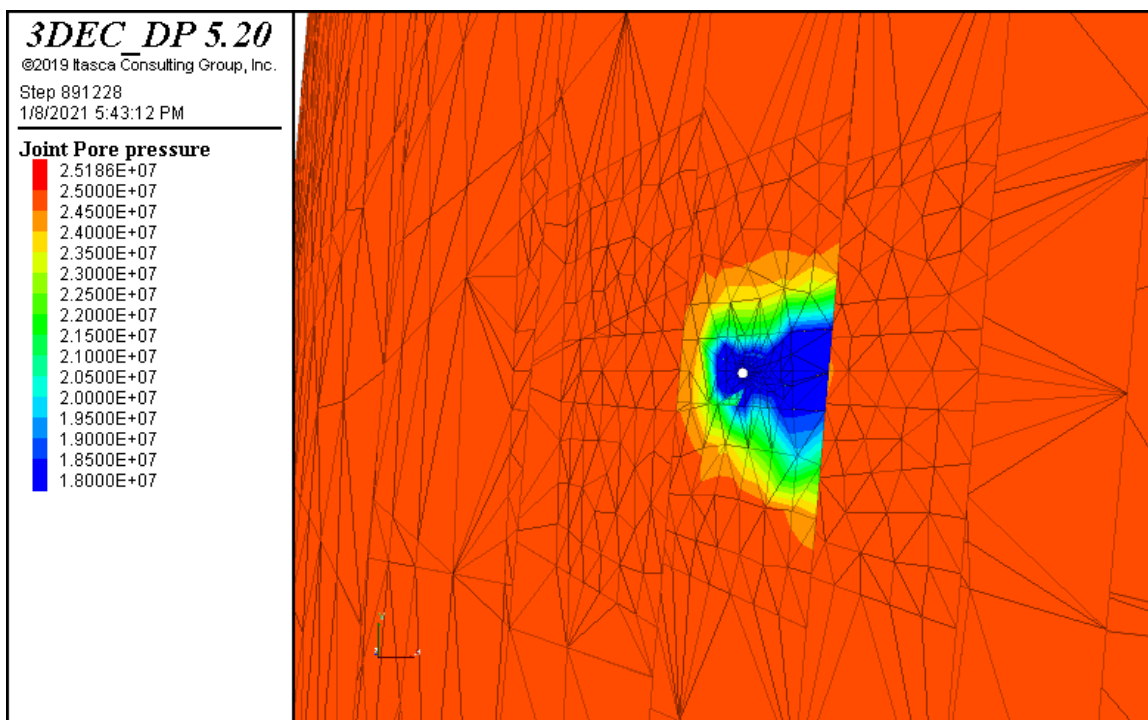
نمودار برای درزه شماره ۱۰



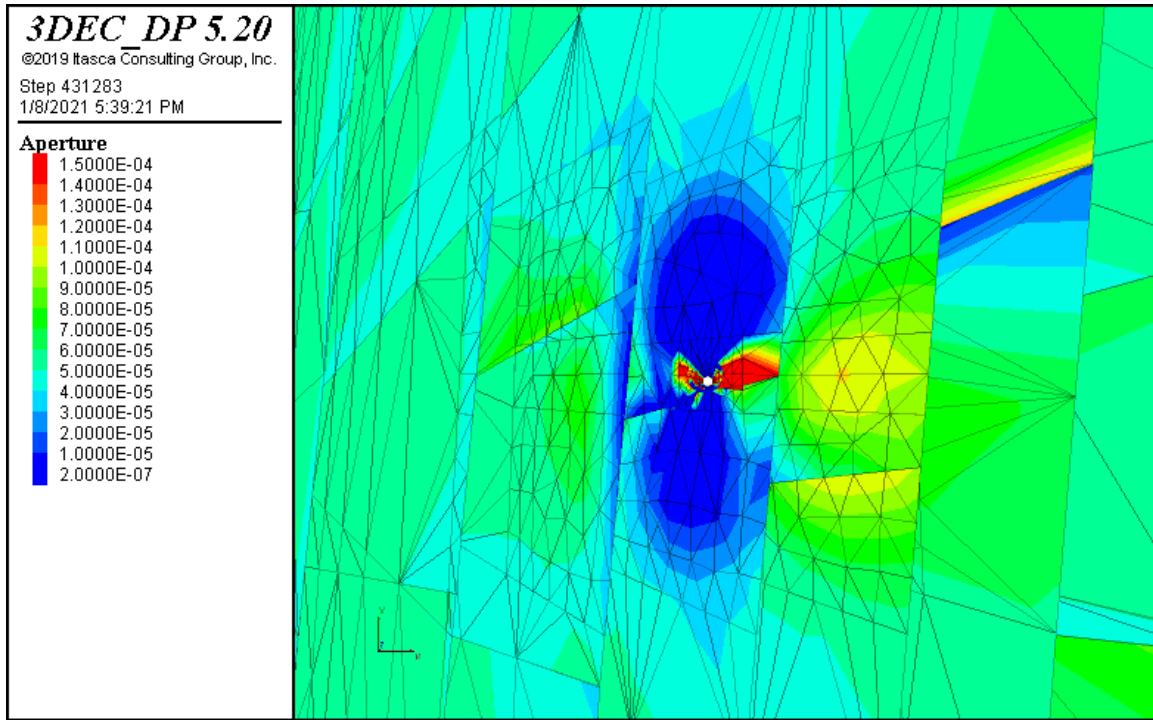
شکل (أ-۶۷) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



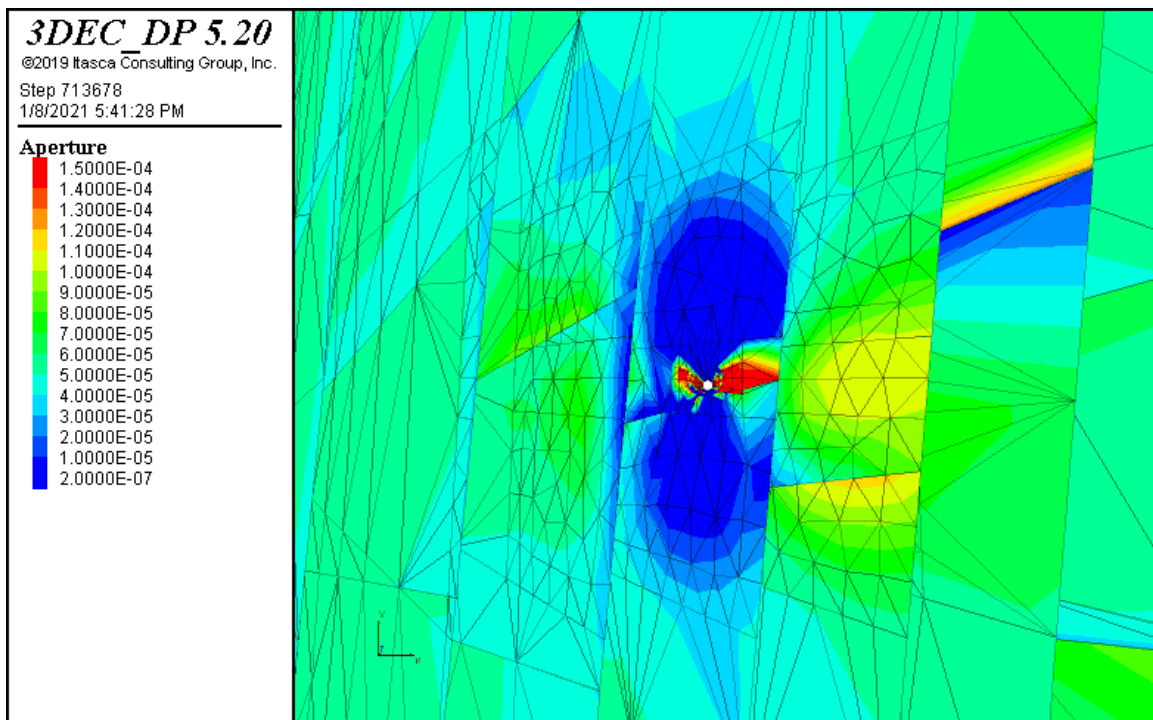
شکل (أ-٦٨) فشارمنفذی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



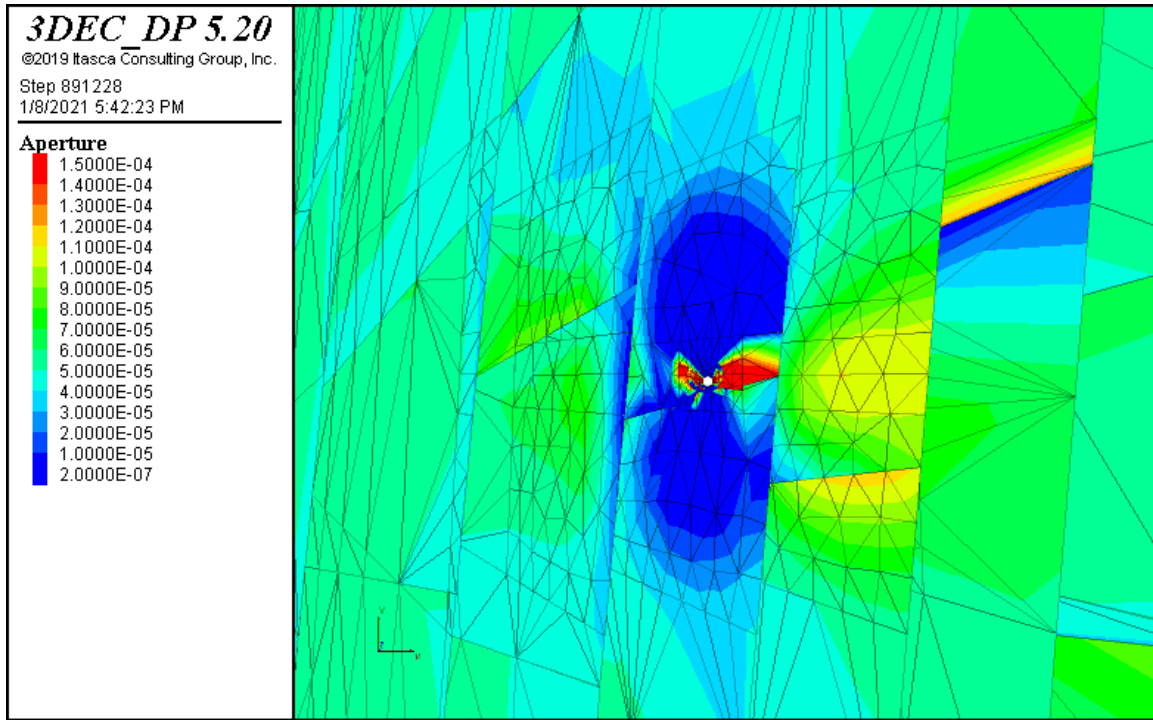
شکل (أ-٦٩) فشارمنفذی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٧٠) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.

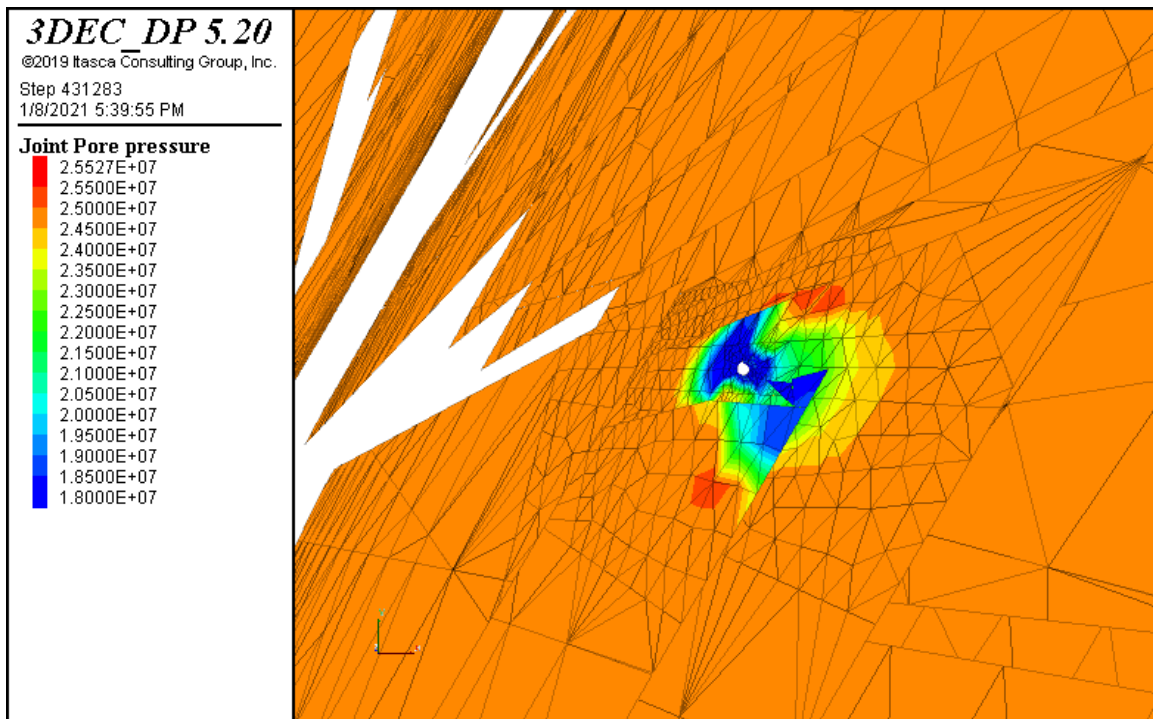


شکل (أ-٧١) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.

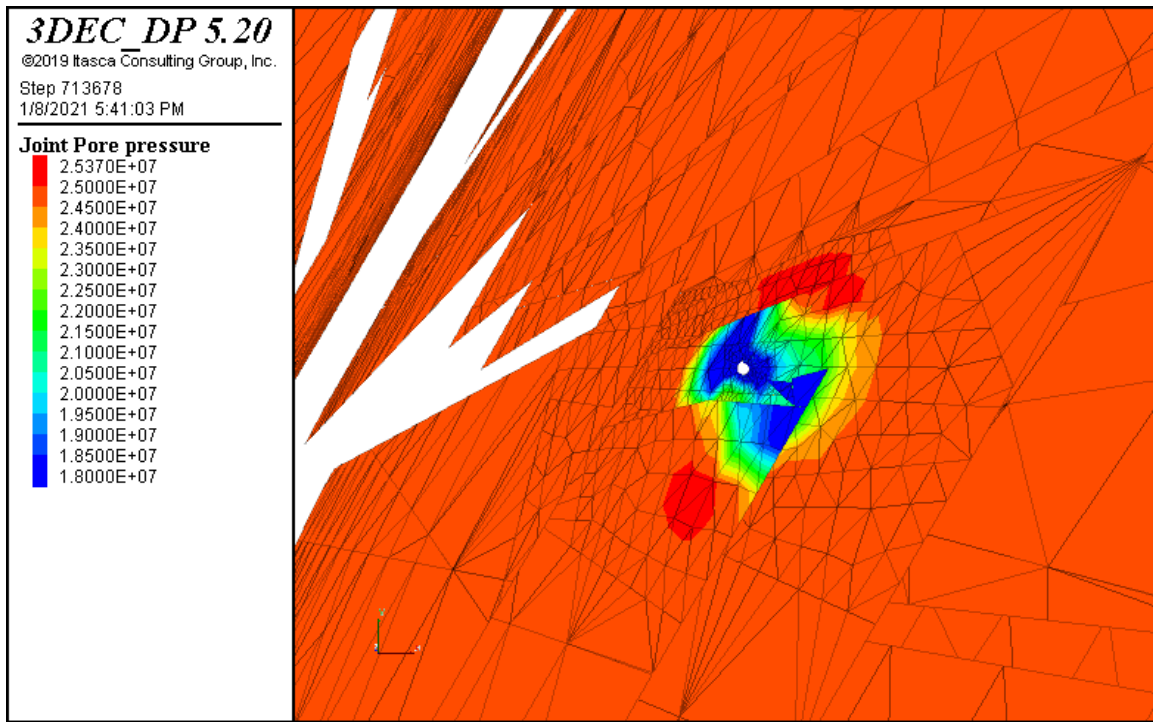


شکل (أ-٧٢) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.

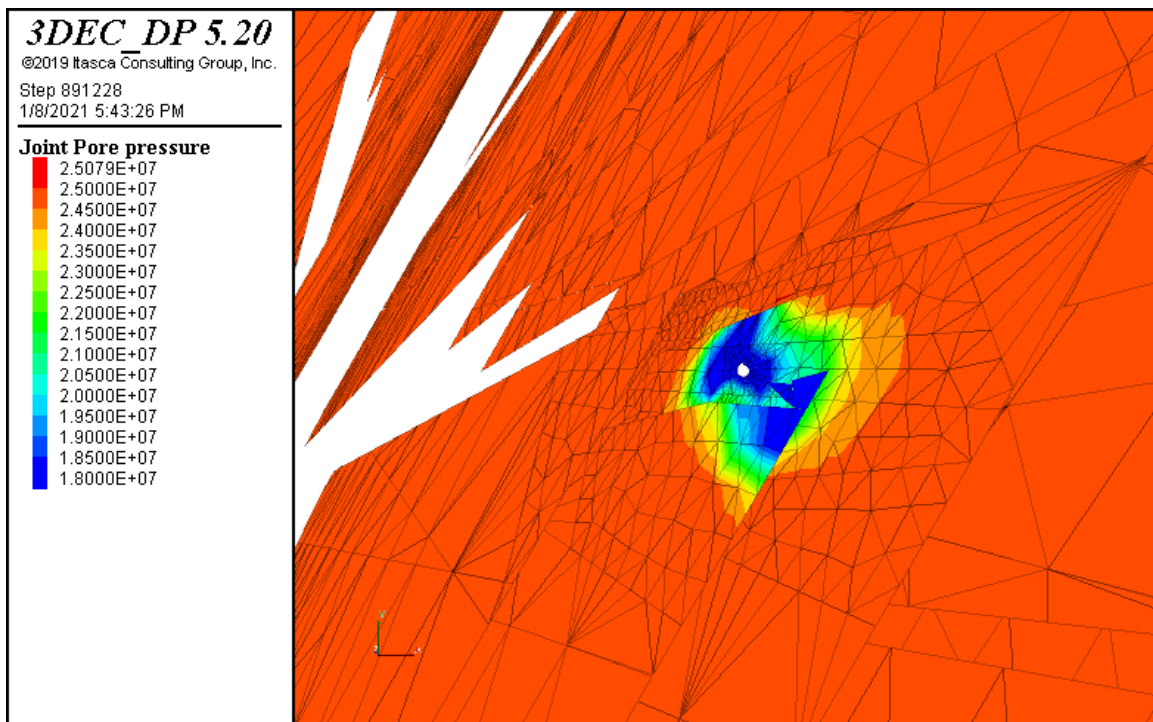
نمودار برای درزه شماره ١١



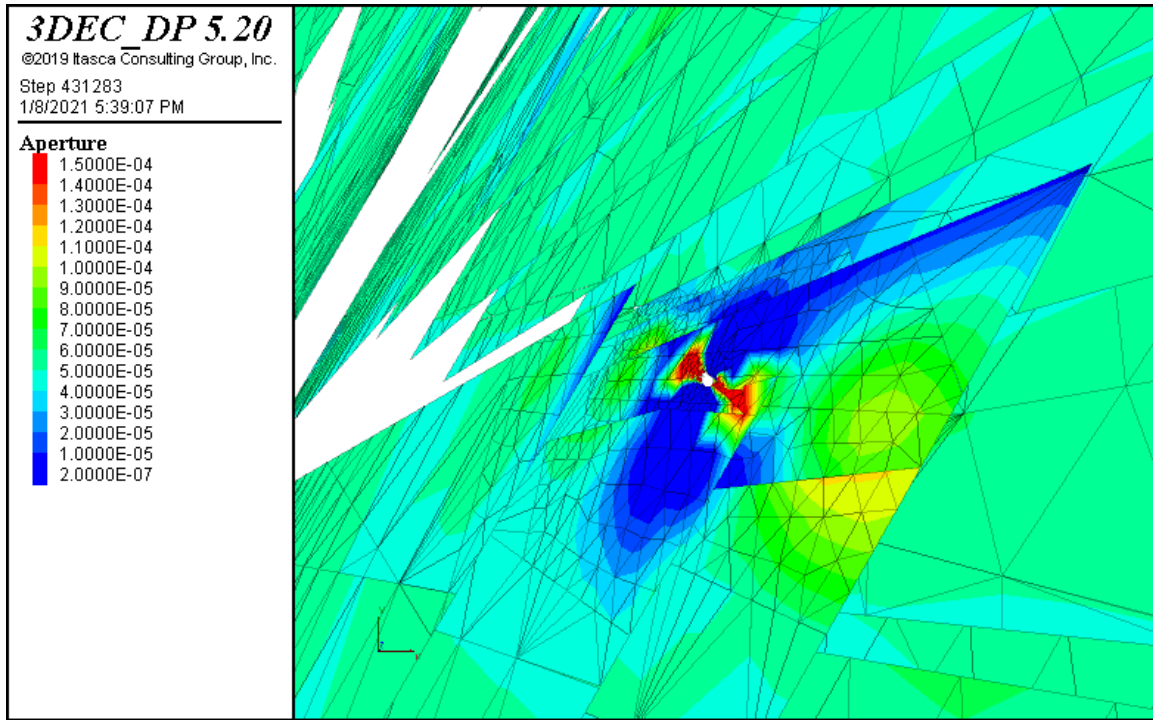
شکل (أ-٧٣) فشارمنفذی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.



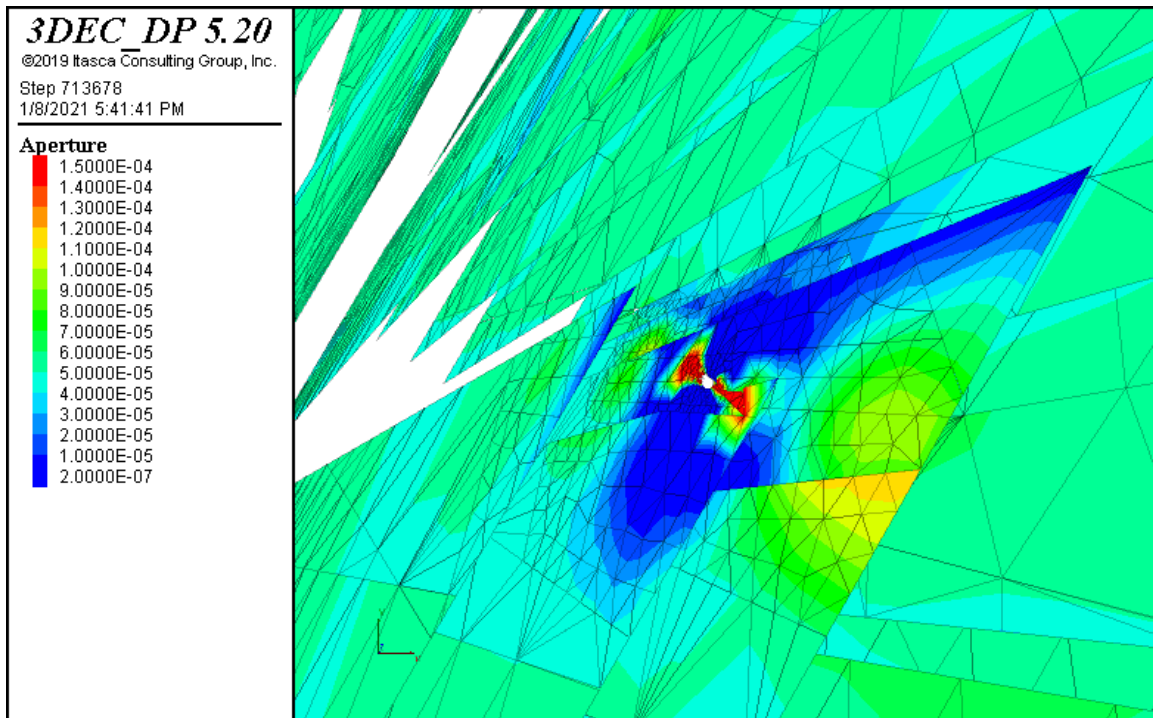
شکل (أ-٧٤) فشارمنفذی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



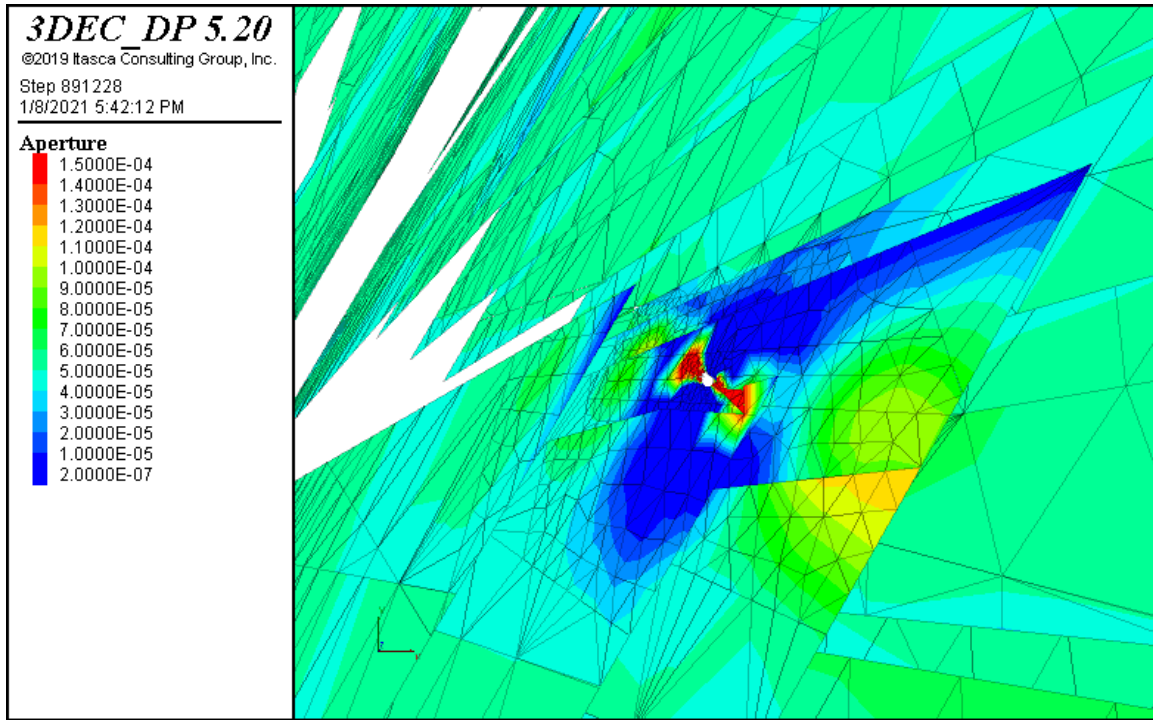
شکل (أ-٧٥) فشارمنفذی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



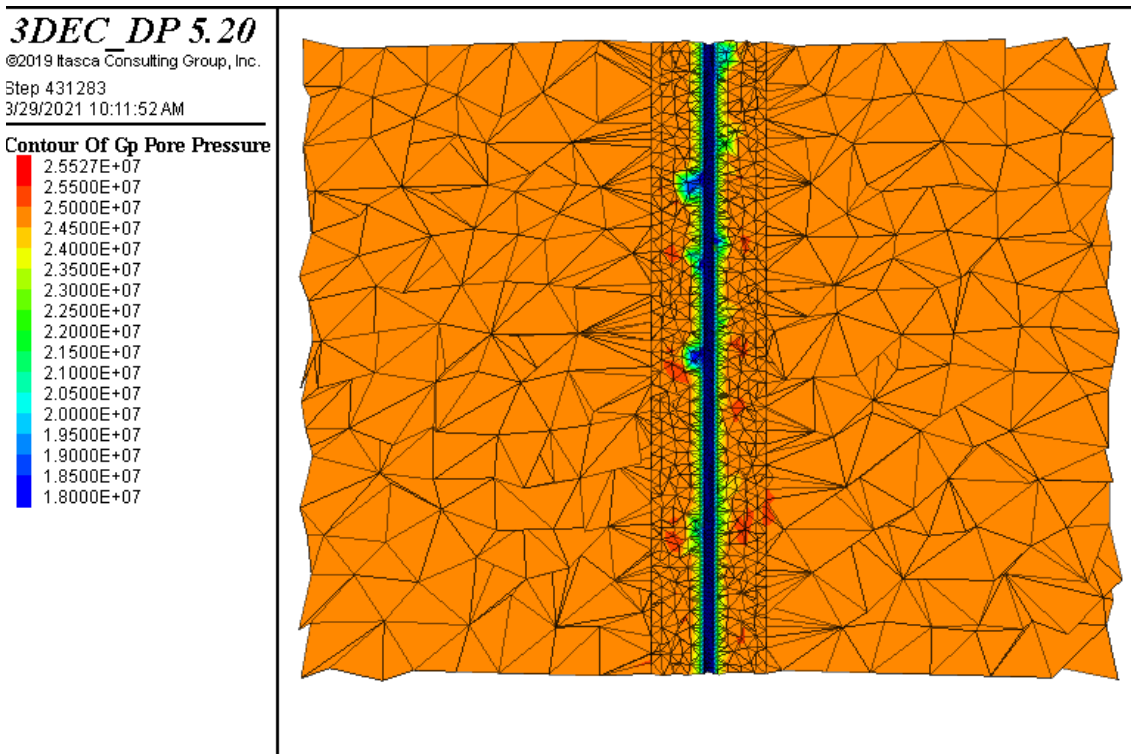
شکل (أ-٧٦) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ١ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٧٧) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٧٨) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-٧٩) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ١ ثانیه پس از مدل در چاه شماره ٢.

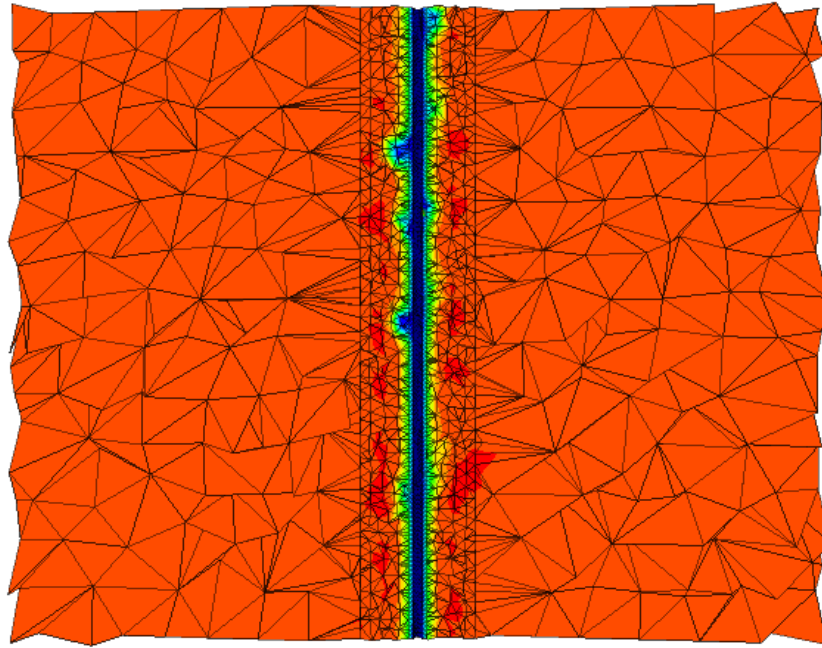
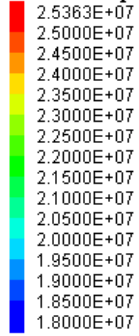
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 713678

3/29/2021 10:12:05 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۸۰) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

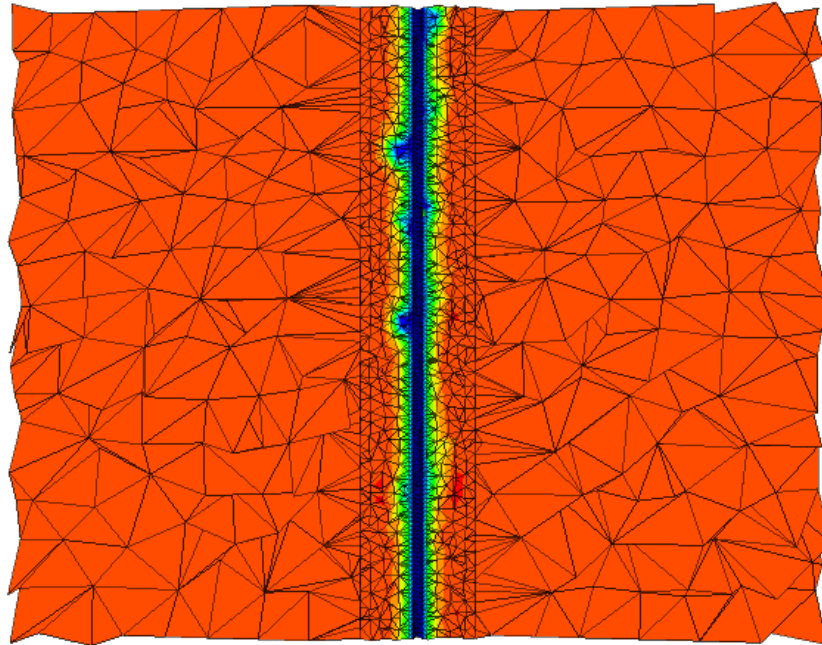
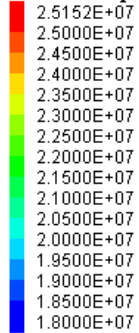
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 891228

3/29/2021 10:13:01 AM

Contour Of Gp Pore Pressure



شکل (أ-۸۱) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

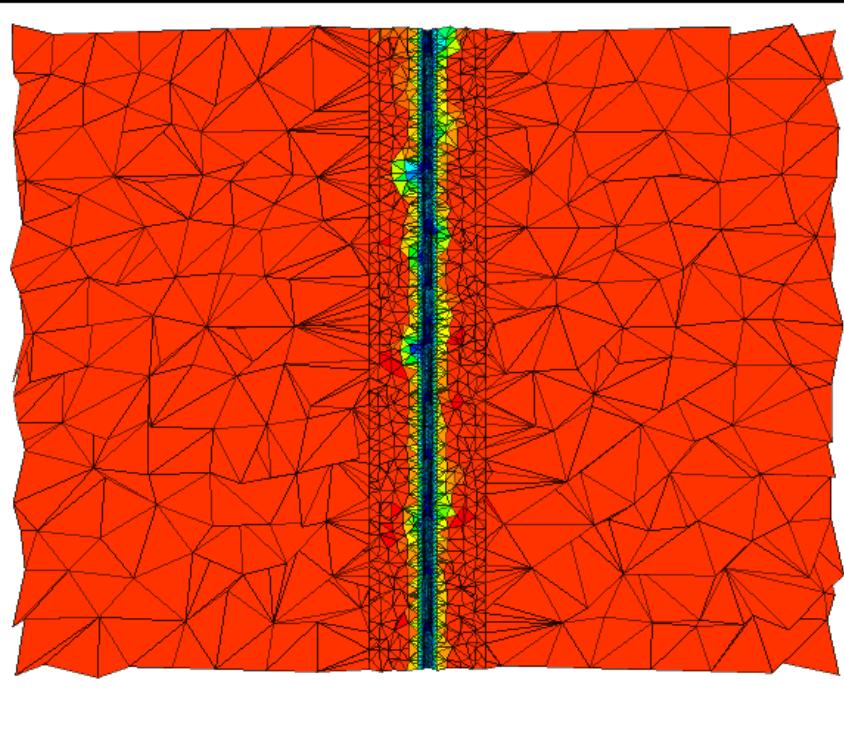
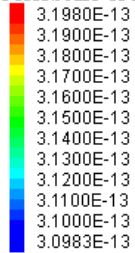
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 431283

3/29/2021 10:11:42 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۸۲) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

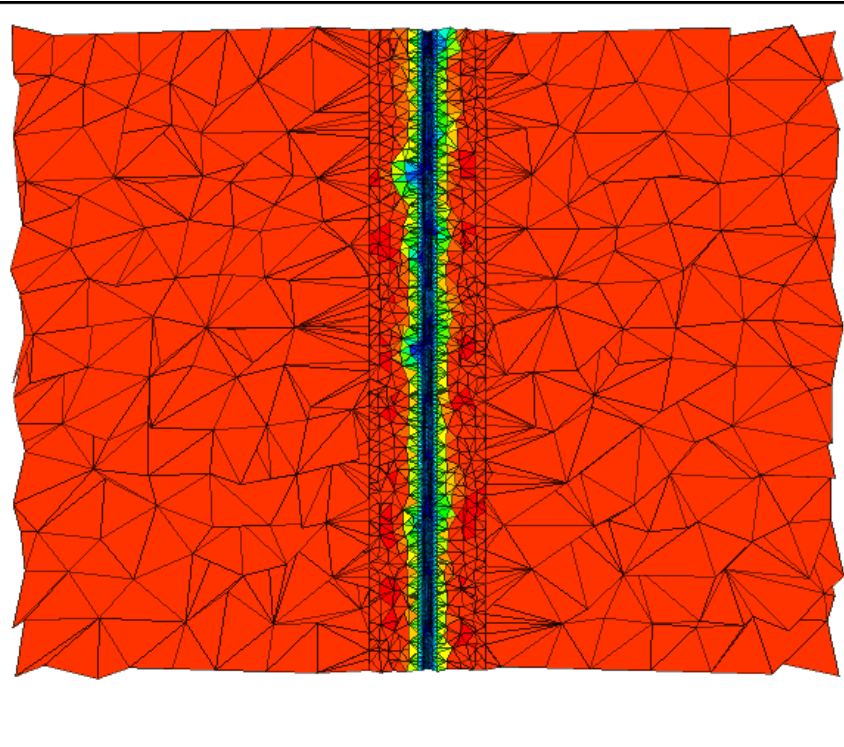
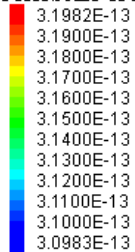
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 713678

3/29/2021 10:12:24 AM

ColorScale of Fluid Property



شکل (أ-۸۳) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

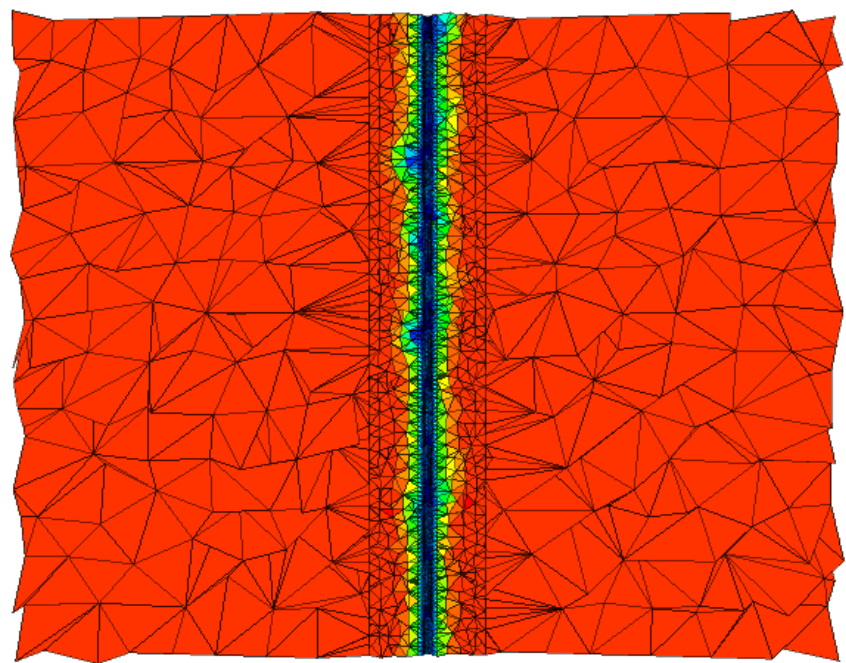
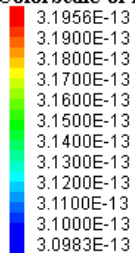
3DEC DP 5.20

©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 891228

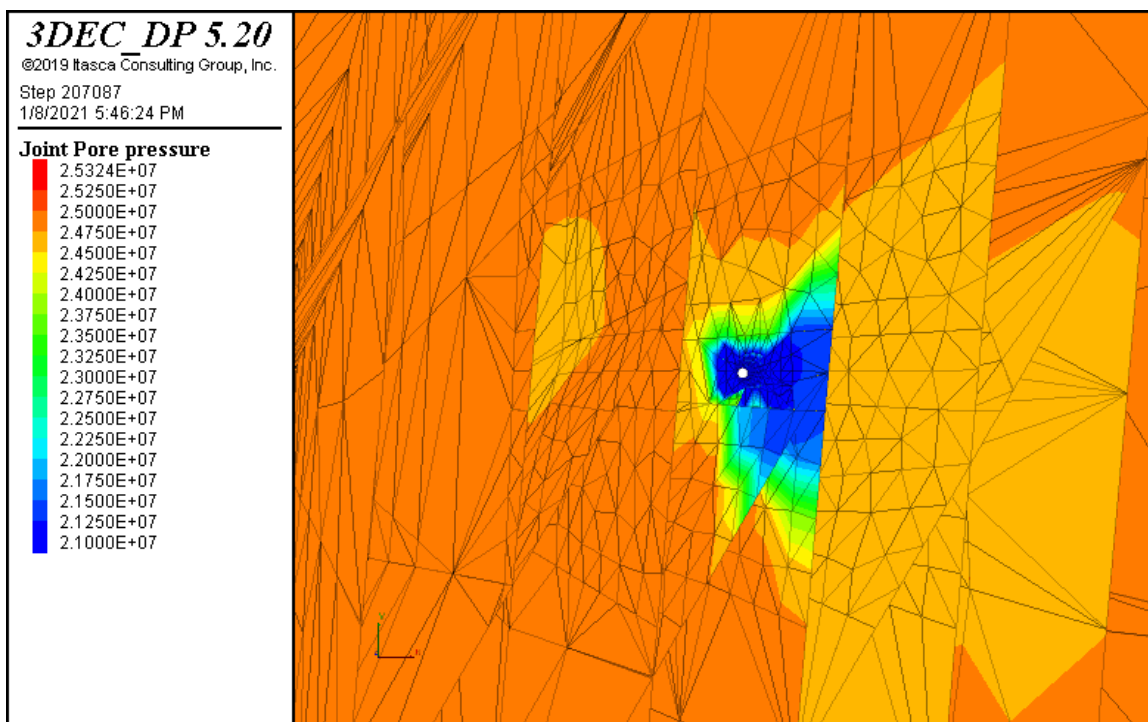
3/29/2021 10:12:50 AM

ColorScale of Fluid Property

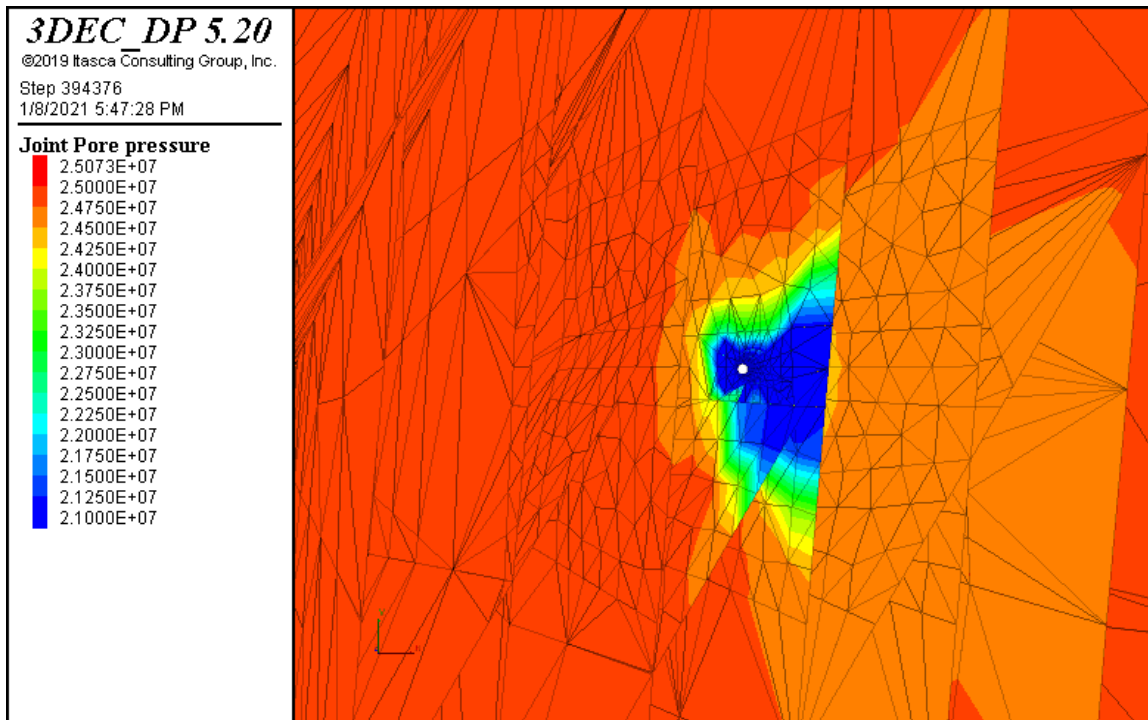


شکل (أ-۸۴) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

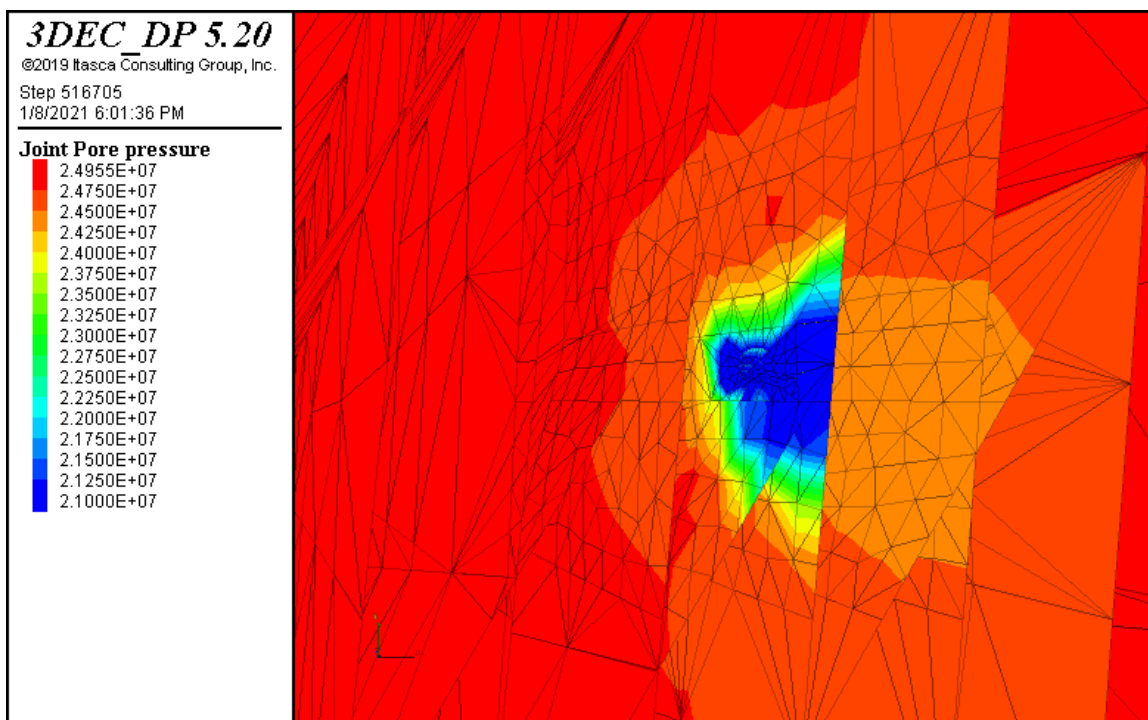
۴. چاه شماره ۲- فشار درون چاه ۲۱ مگاپاسکال



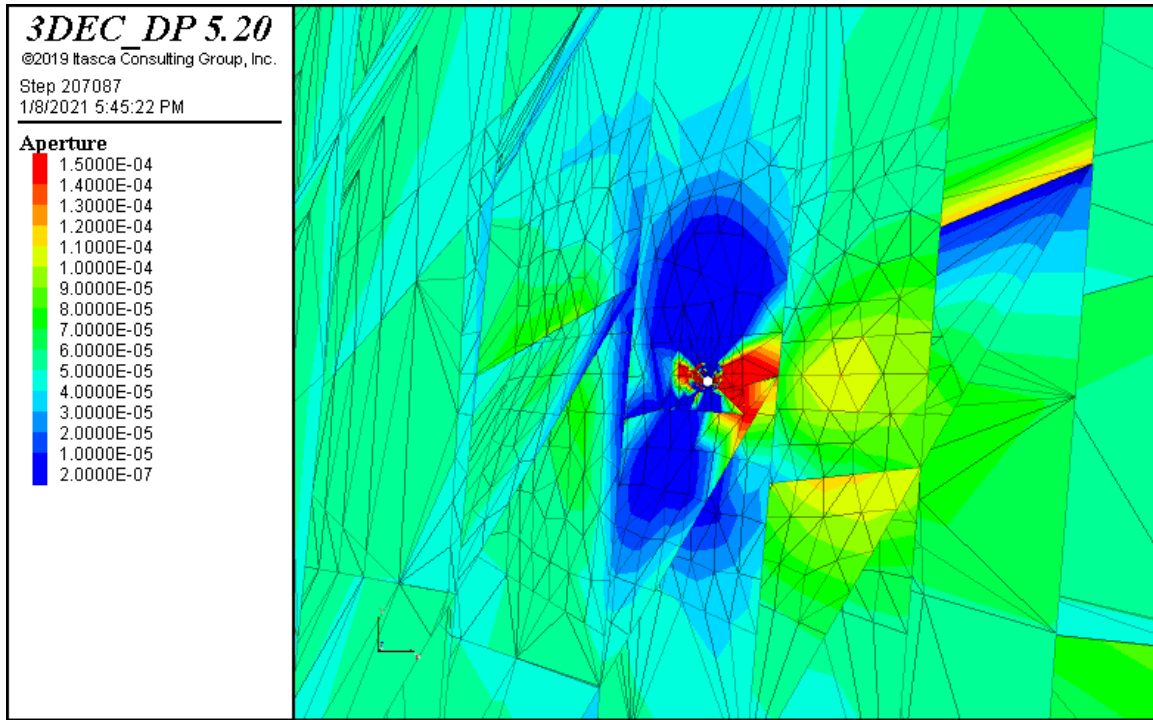
شکل (أ-۸۵) فشارمغذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



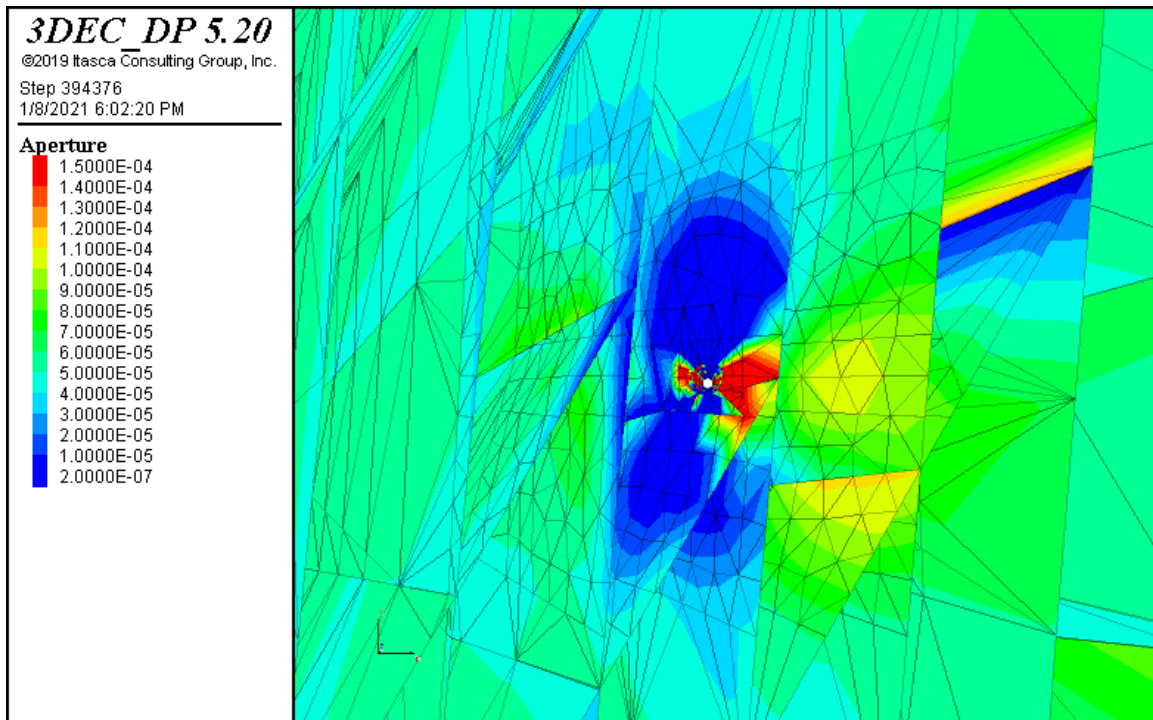
شکل (أ-٨٦) فشارمنفذی در زمان ٣ ثانیه پس از حل مدل.



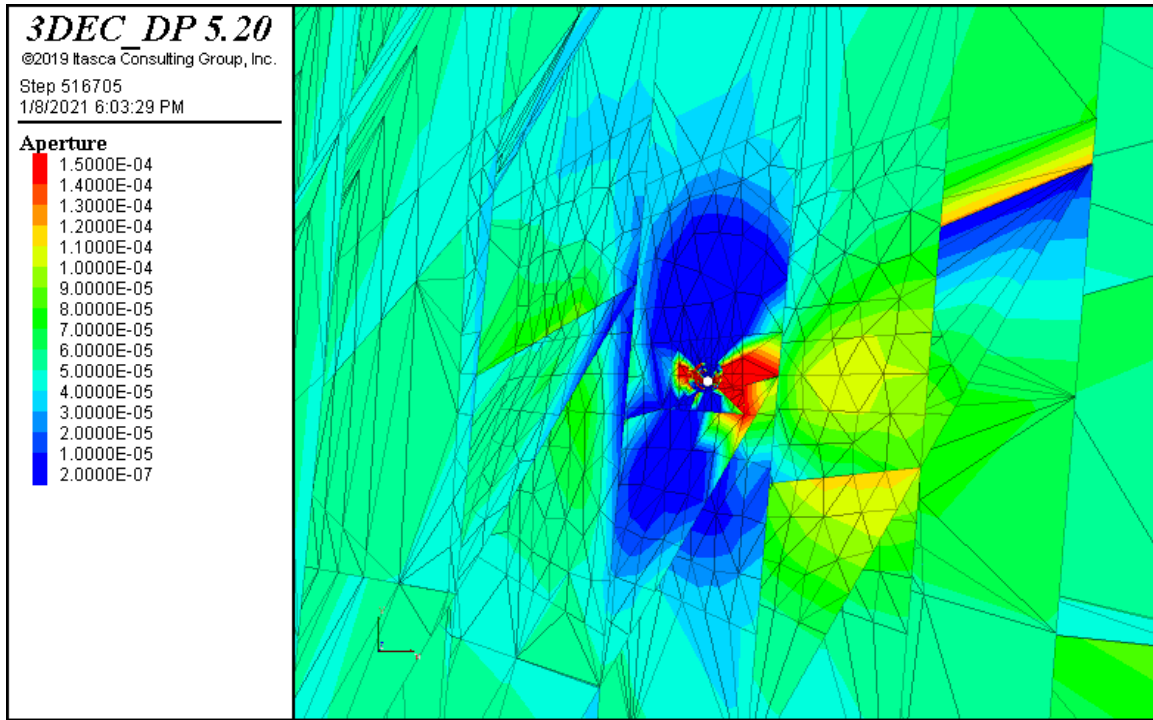
شکل (أ-٨٧) فشارمنفذی در زمان ٥ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۸۸) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.

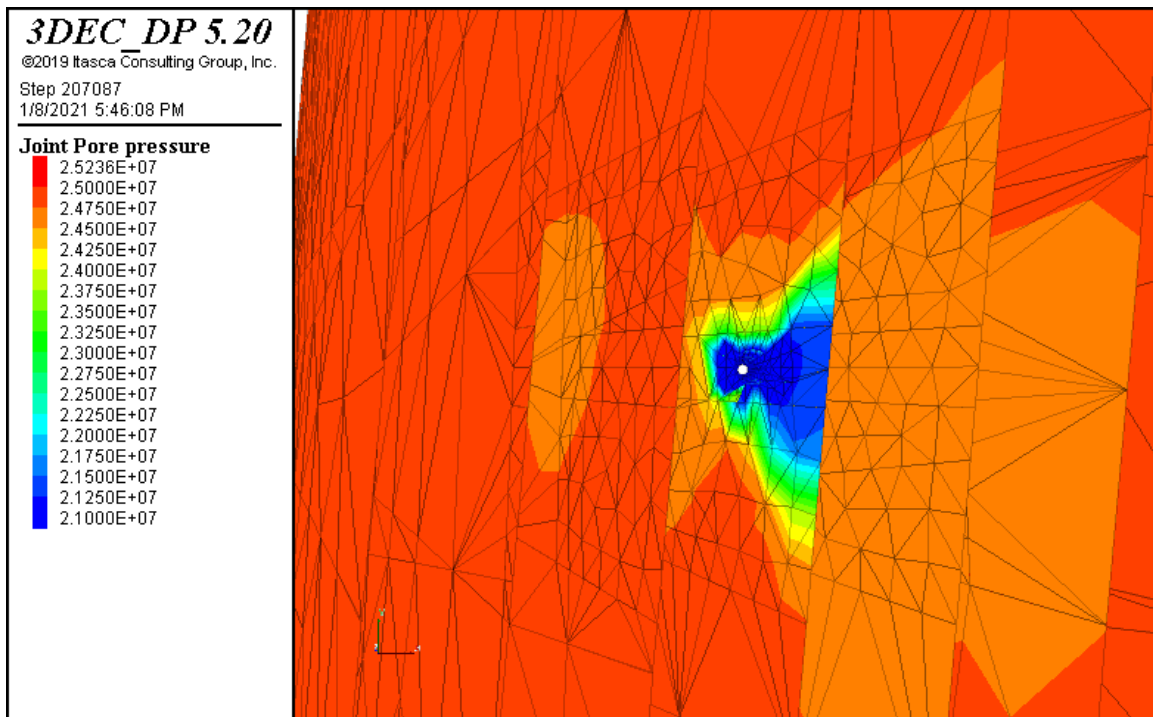


شکل (أ-۸۹) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.

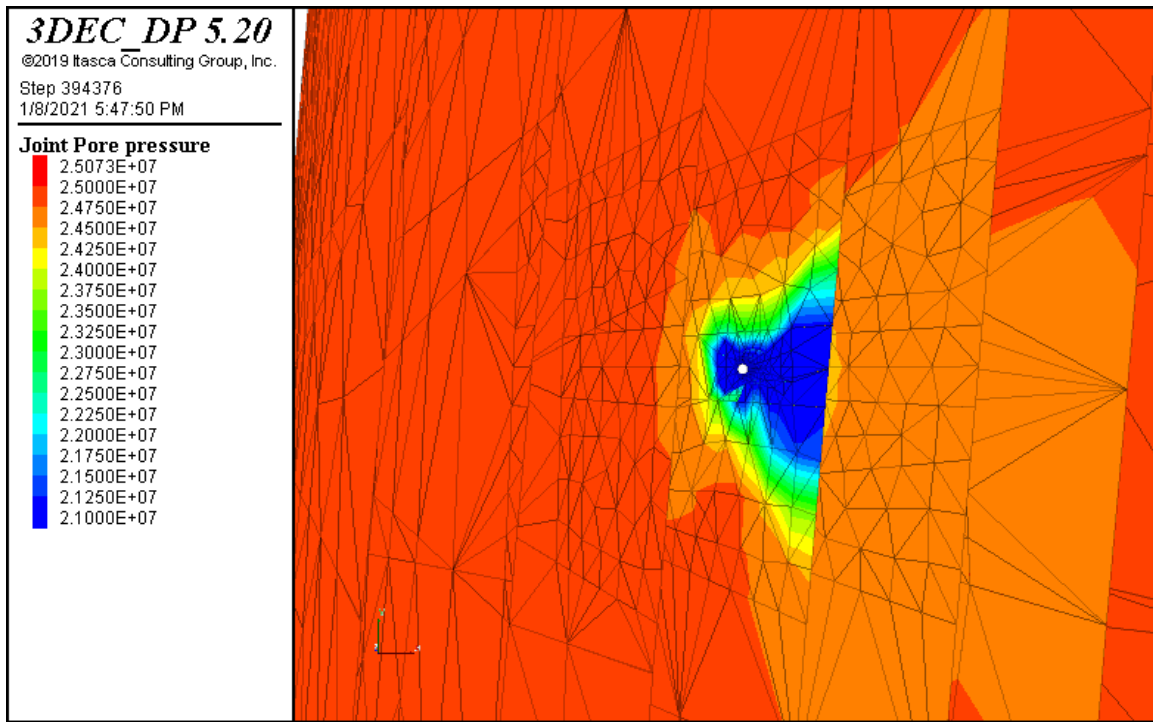


شکل (أ-۹۰) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

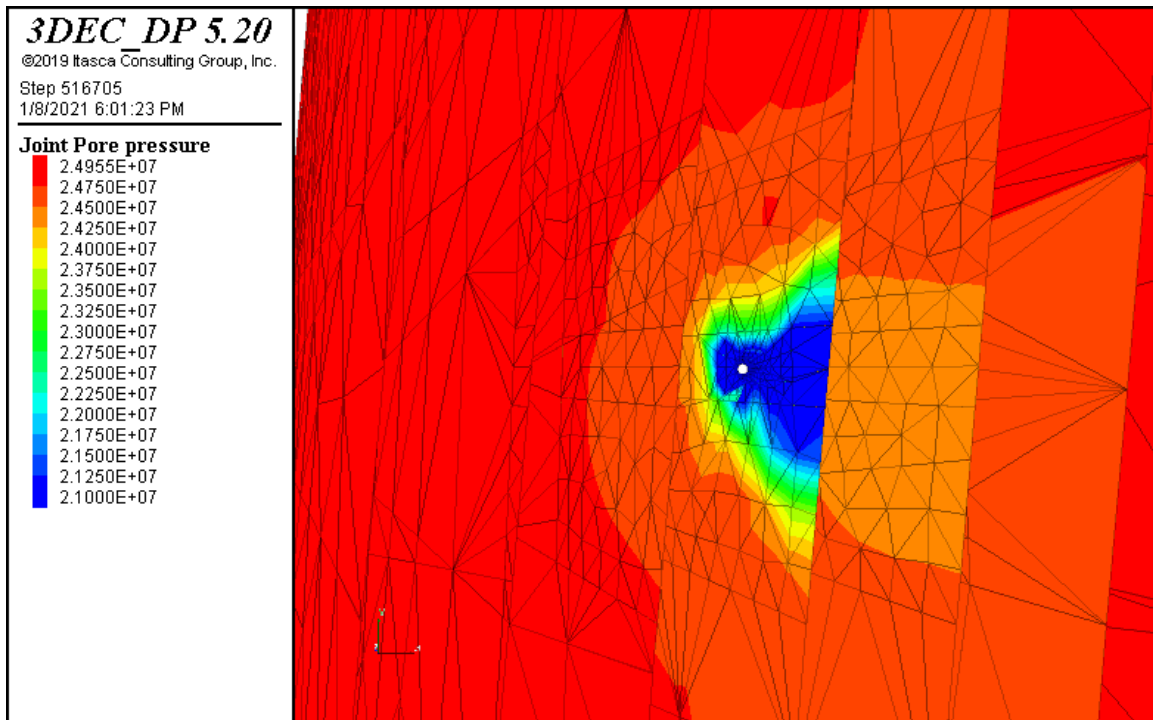
نمودار برای درزه شماره ۱۰



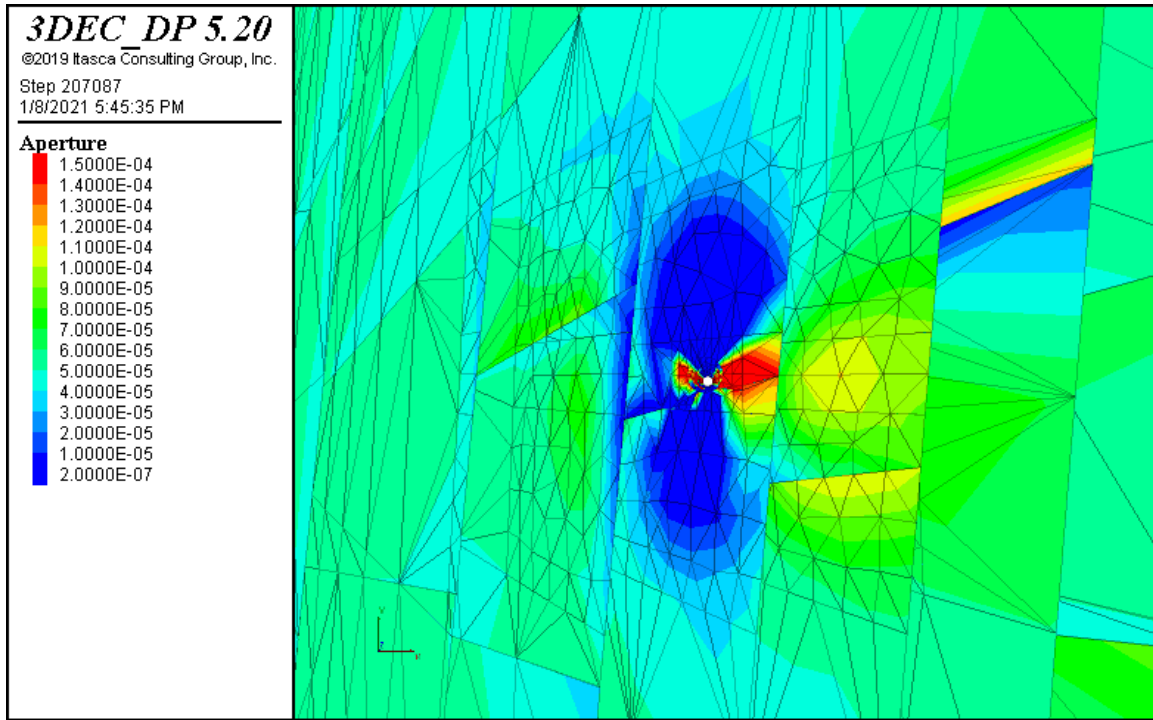
شکل (أ-۹۱) فشارمنفذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



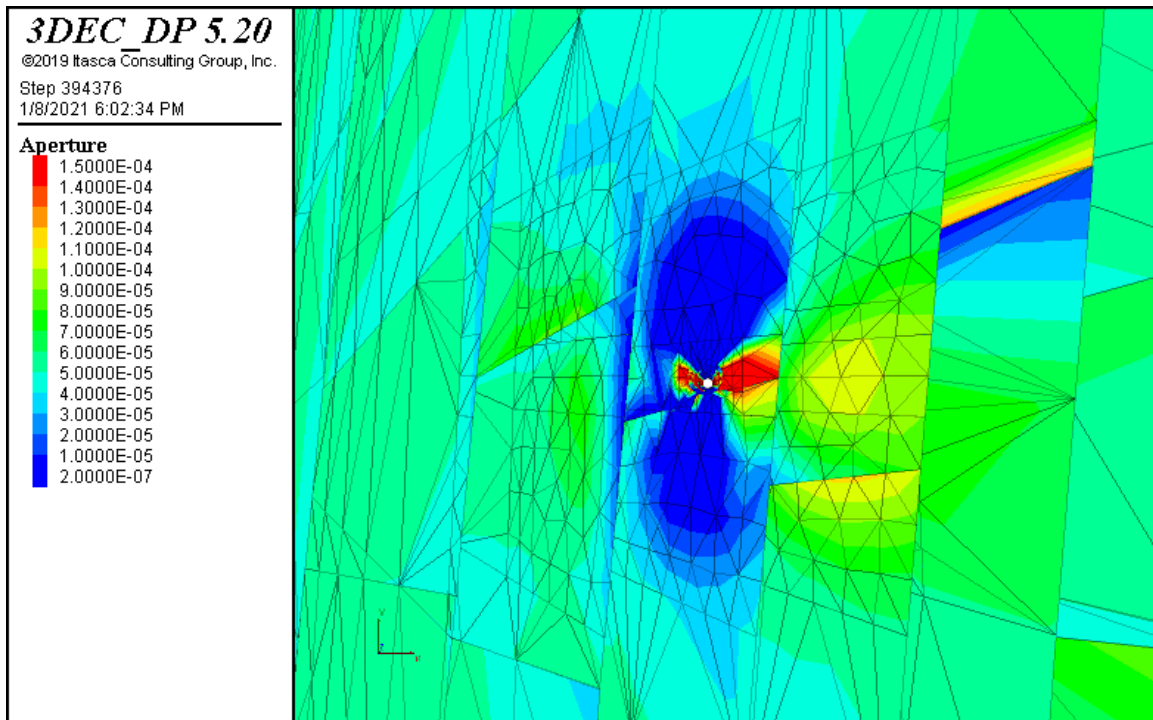
شکل (أ-۹۲) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



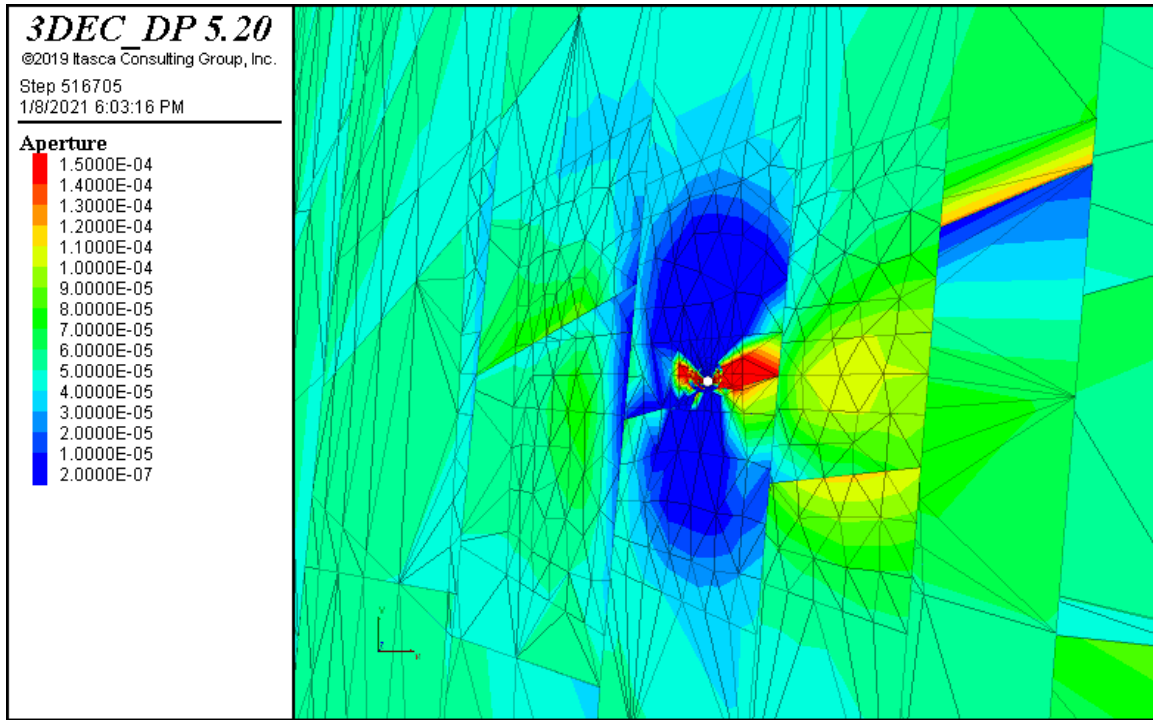
شکل (أ-۹۳) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



شکل (أ-۹۴) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.

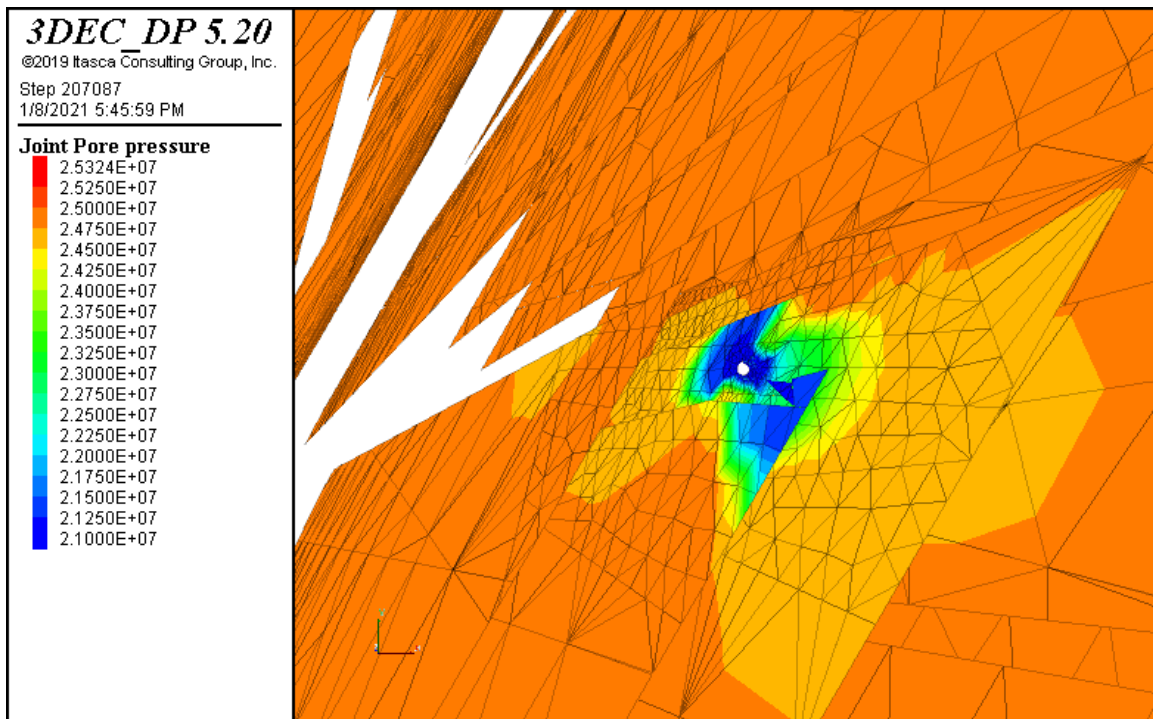


شکل (أ-۹۵) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.

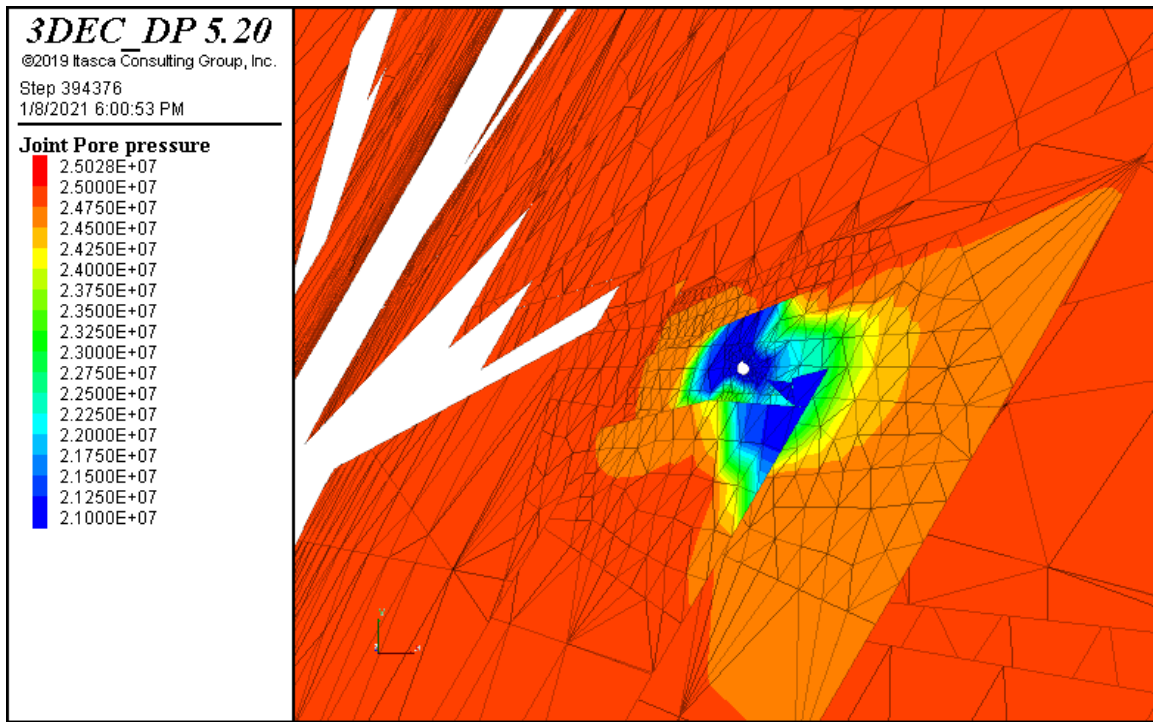


شکل (أ-۹۶) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.

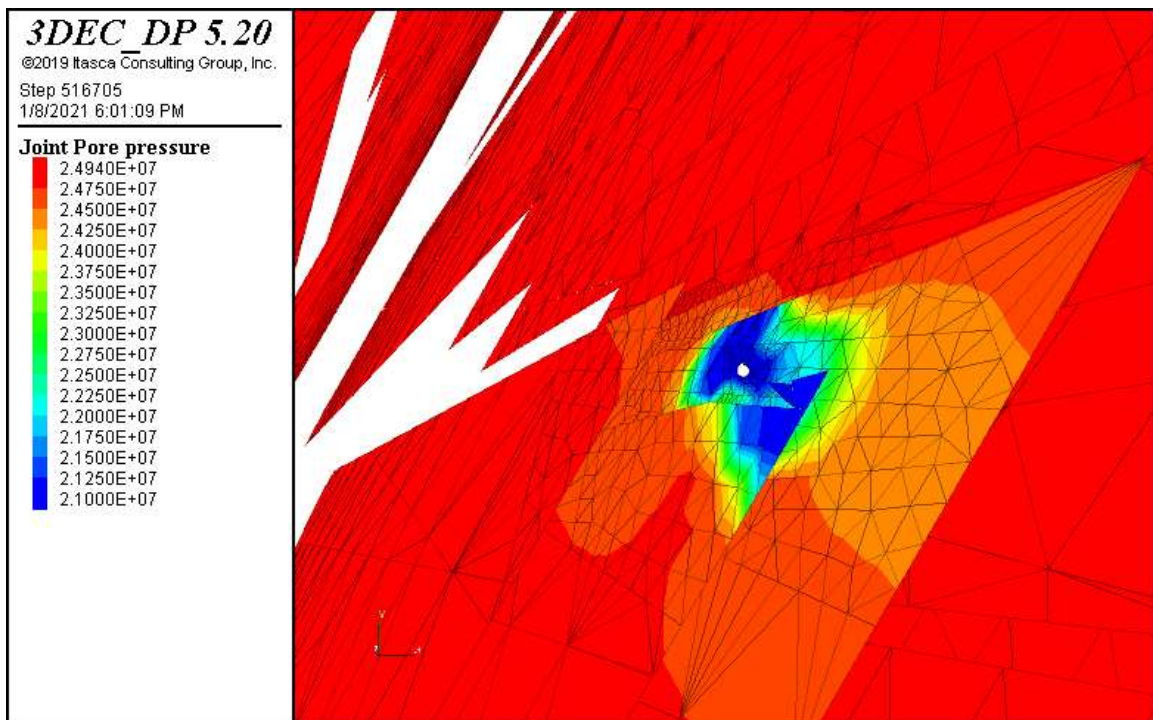
نمودار برای درزه شماره ۱۱



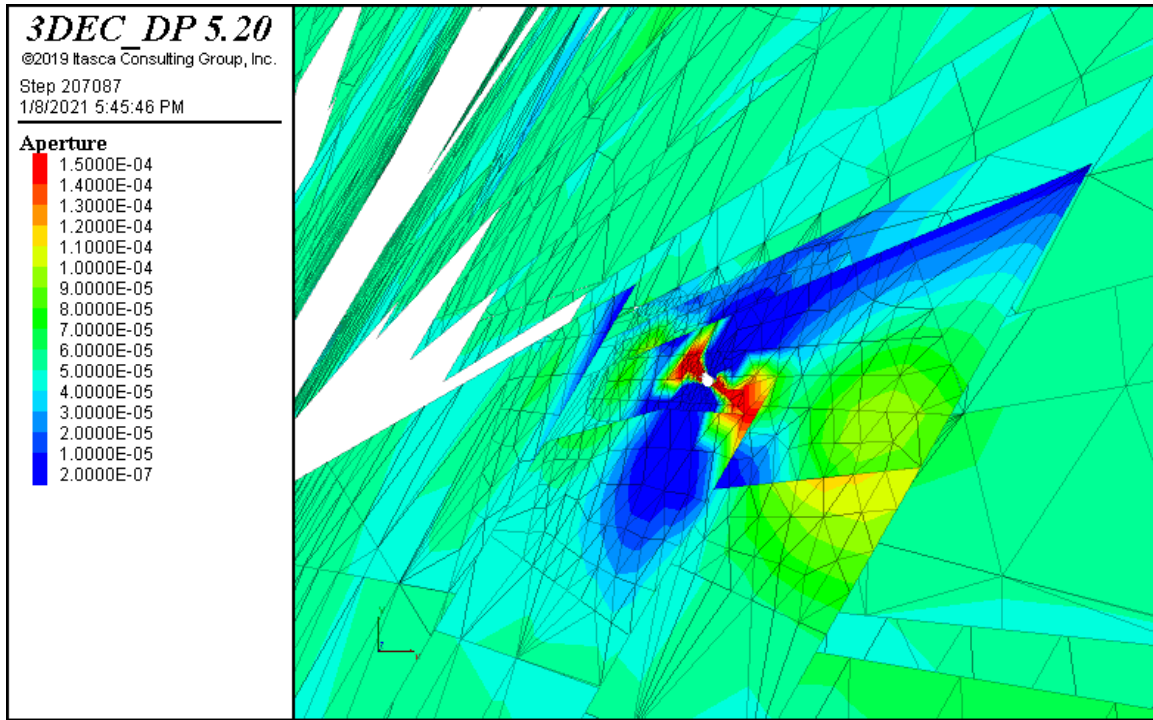
شکل (أ-۹۷) فشارمغذی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



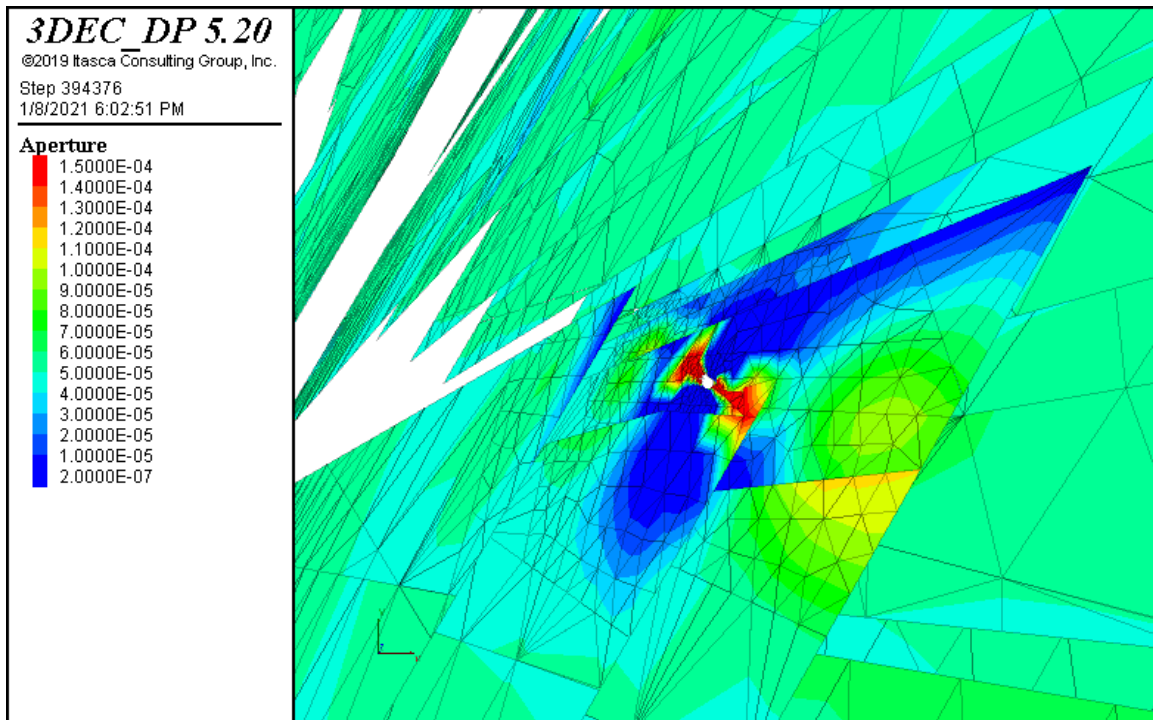
شکل (أ-۹۸) فشارمنفذی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



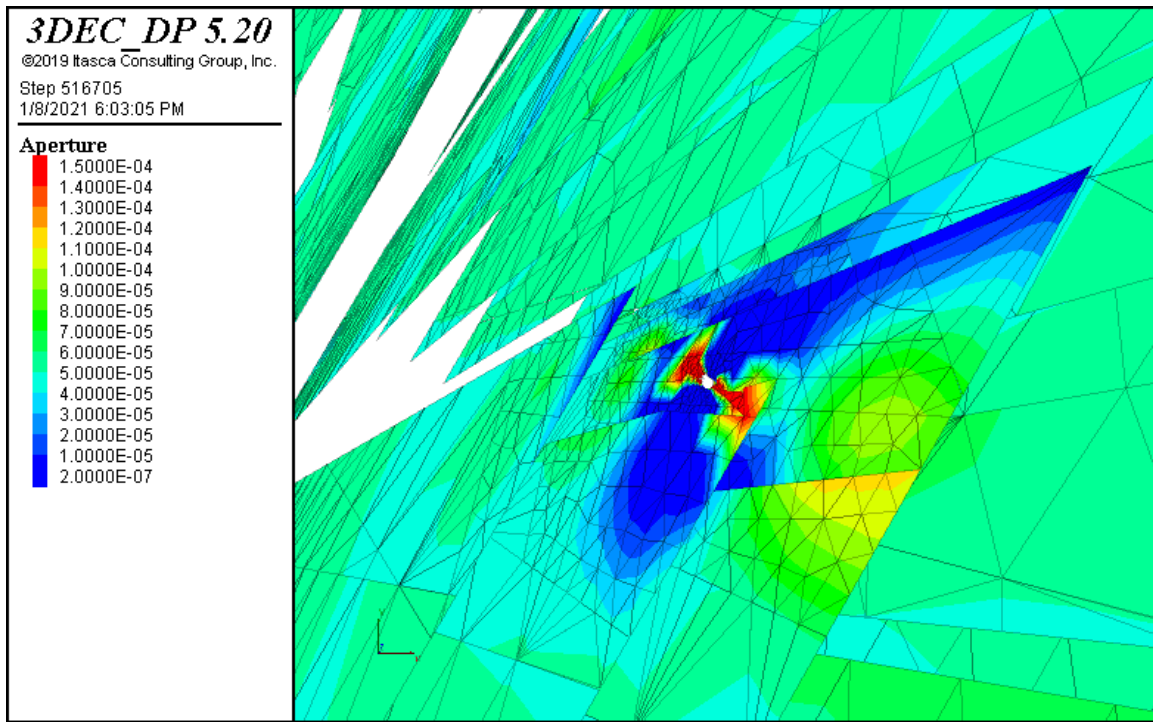
شکل (أ-۹۹) فشارمنفذی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



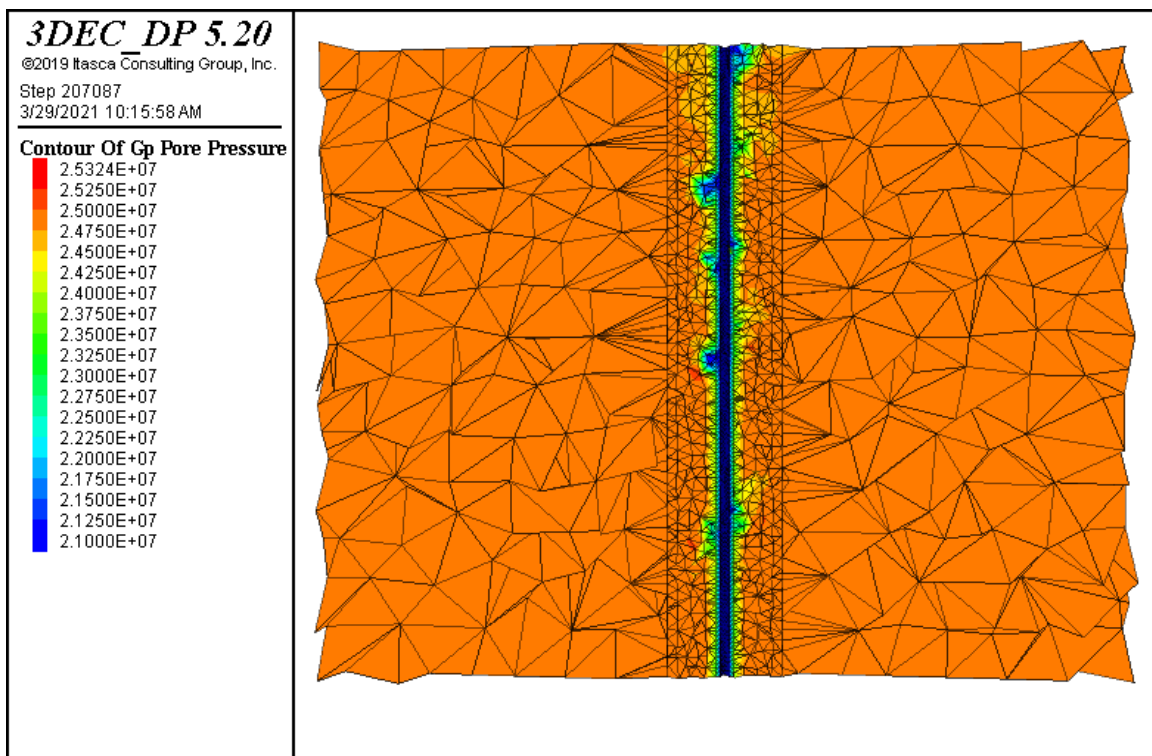
شکل (أ-۱۰۰) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل.



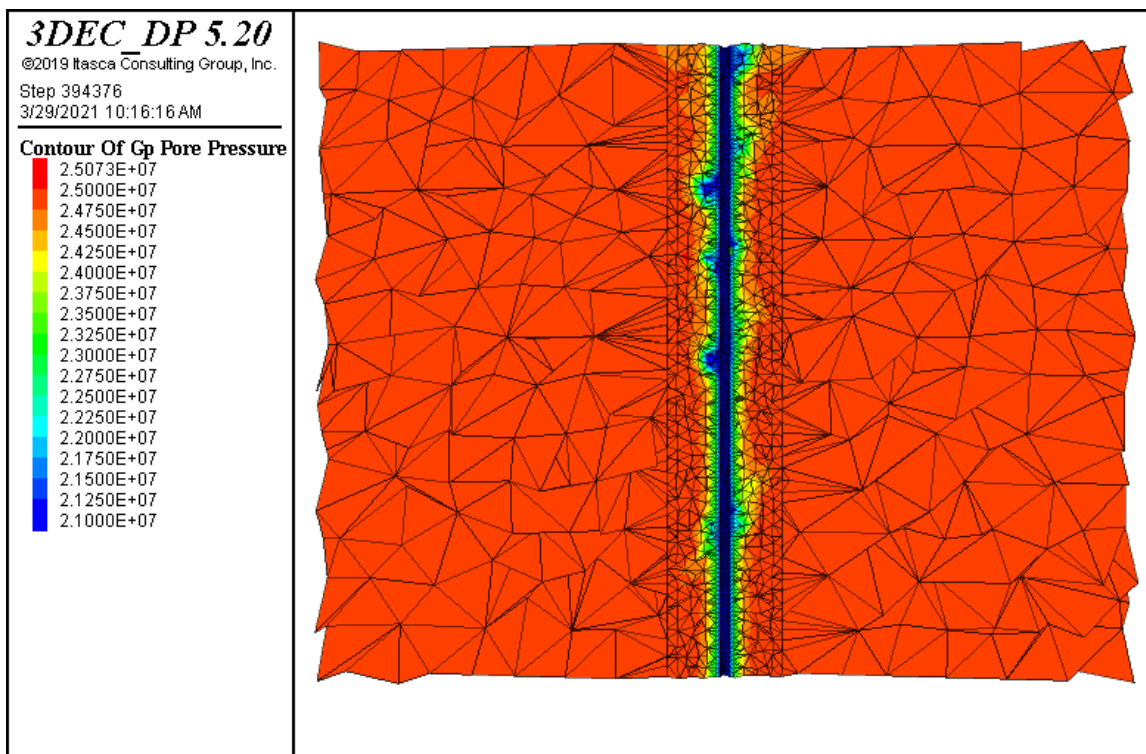
شکل (أ-۱۰۱) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۳ ثانیه پس از حل مدل.



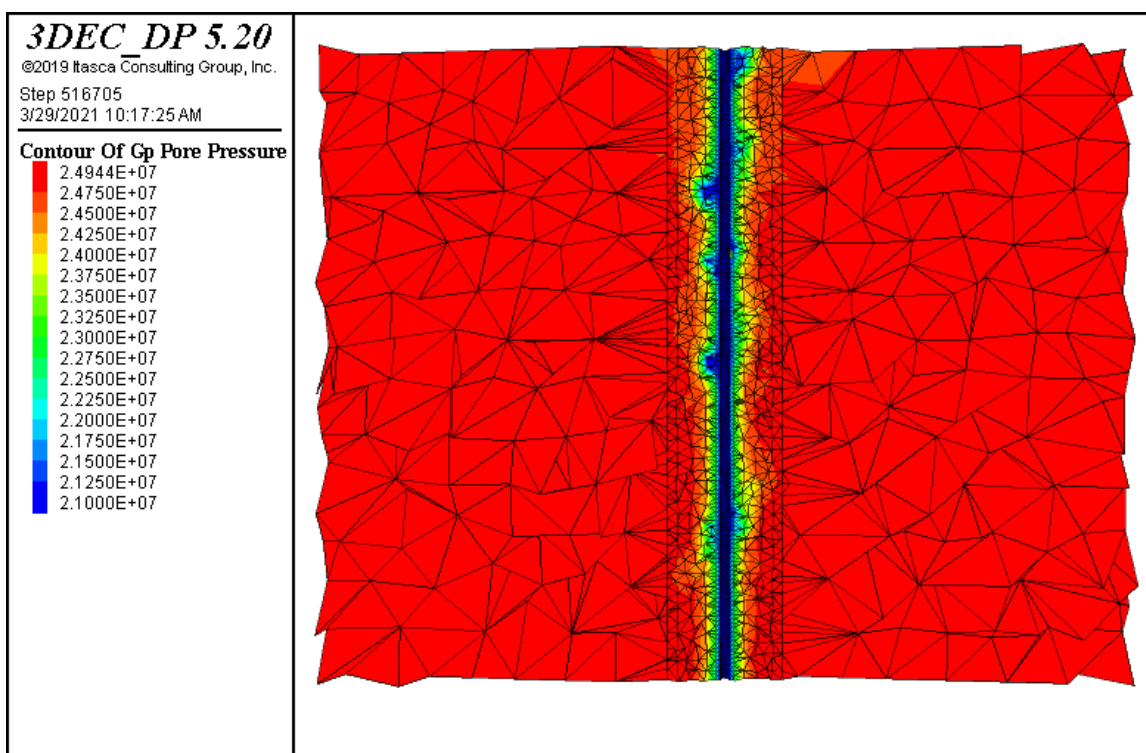
شکل (أ-۱۰۲) بازشدگی هیدرولیکی در زمان ۵ ثانیه پس از حل مدل.



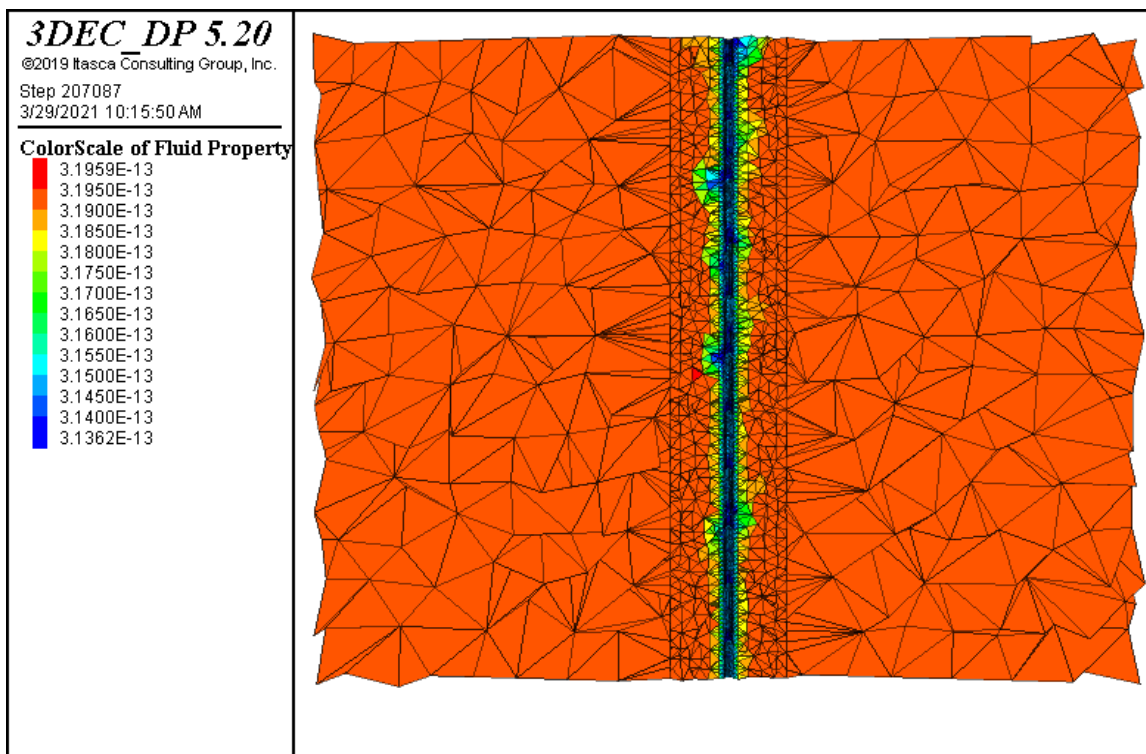
شکل (أ-۱۰۳) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حل مدل در چاه شماره ۲.



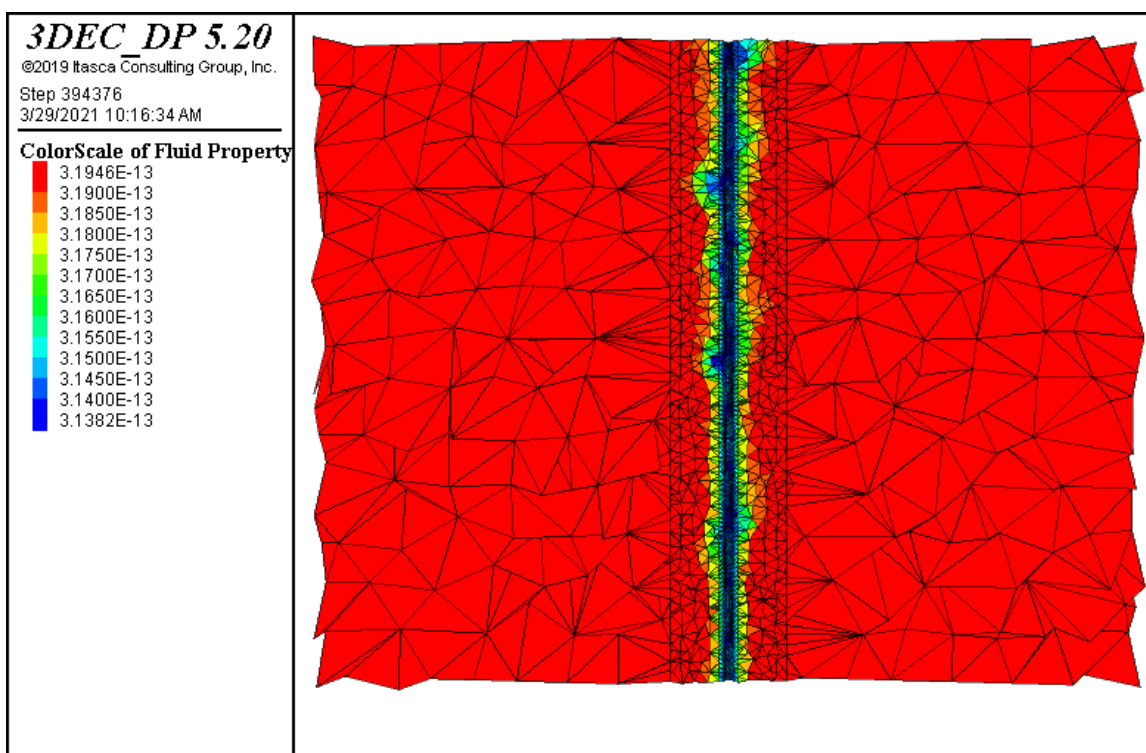
شکل (أ-۱۰۴) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



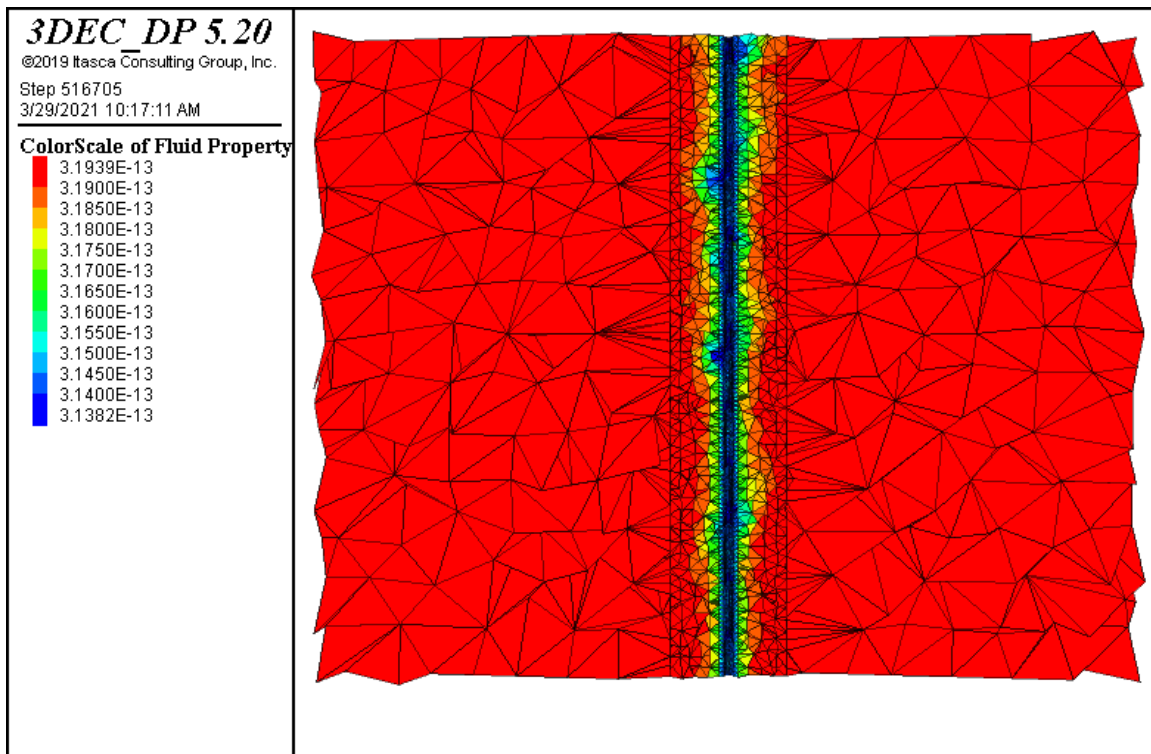
شکل (أ-۱۰۵) تغییرات فشار منفذی درون ماتریکس اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



شکل (أ-۱۰۶) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۱ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



شکل (أ-۱۰۷) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۳ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.



شکل (أ-۱۰۸) تغییرات تراوایی اطراف چاه در زمان ۵ ثانیه پس از حدل مدل در چاه شماره ۲.

Abstract

Fractured carbonate reservoirs are one of the most important sources of hydrocarbons in the world. In fractured carbonate reservoirs, porous media and joints, there are major routes for fluid transfer to the well, while mostly hydrocarbons are placed in the porous media and a small amount of fluid is stored in the joints.

In order to investigate the fluid flow path in fractured reservoir as well as to estimate the permeability of the fluid in the vicinity of the permeable rock, it is necessary to understand exactly how the fluid moves through the rough fractures. Fracture permeability is generally estimated from the cubic law, which is valid under laminar flow conditions and perfectly smooth joint surfaces. But the actual topography of joints and fractures is very complex, and the joint surfaces are irregularly connected to the opposite side. These factors cause the fluid to move through the joint and the fractures to be twisted, resulting in a different permeability value than that obtained from the cubic law.

Numerical modeling of natural fractured reservoirs is one of the important issues in estimating fluid movement in carbonate reservoirs for which several methods have been proposed. One of the common methods in modeling slotted reservoirs is to use the equivalent continuous model for the reservoir. In this modeling, the joint is modeled with elements similar to the rock matrix, with the similarity that their hydraulic properties are selected equivalent to the properties of the joint. One of the weaknesses of this type of modeling is the lack of consideration of joint geometry and its effect on the path of fluid movement. Perhaps the most important drawback of this type of modeling is that it keeps the seam permeability constant over time. By discharging hydrocarbons from the reservoir, the initial stress is disturbed and the stress redistribution occurs. Joints that were previously closed or open are likely to open and close under the new stress distribution conditions. Changing the joint opening is equivalent to changing the permeability of the reservoir joints. Therefore, assuming a constant amount of joint permeability will have problems in reservoir design in terms of determining the location of wells and drilling wells.

In order to address the problems presented in the modeling of fractured reservoirs, in this study, the effect of confinement stress on the permeability of the porous medium is investigated. Then, by creating artificial joints, the effect of roughness and lateral pressure on the behavior of the fluid inside the matted joint has been investigated, which shows the nonlinear behavior (Forchmier equation) of the fluid in the rough joint. Due to laboratory limitations, it is not possible to investigate the behavior of the fluid in the joint with the adjacent porous medium and inevitably this has been investigated numerically.

The results of this study showed that if the media around the rough joint is permeable porous; the behavior of the fluid inside the joint is also nonlinear. The effect of permeable porous medium on the behavior of the fluid inside the joint with the change in permeability is evident as increasing the permeability of the lateral media increases the rate of fluid passage through the joint. This is very effective at low mechanical aperture values, so that at a constant mechanical aperture value, if the permeability of the peripheral increases from 1

millidarcy to 100 millidarcy, only the amount of current passing through the joint will be 50 to 100 times greater. Also, the hydraulic aperture of the joint changes with increasing permeability of the adjacent media and becomes closer to the amount of mechanical aperture.

In the last chapter, the results obtained from laboratory studies are implemented in a three-dimensional model with simultaneous hydromechanical behavior in 3DEC software that has the ability to model leak off behavior. In the numerical model, two wells in a reservoir are modeled separately and the fluid behavior in them is investigated. The results of this modeling confirm the dual permeability behavior. It also shows the effect of joint closure with fluid outflow in relation to the geometric characteristics of the joints, the double permeability behavior of the reservoir and the simultaneous hydromechanical behavior of the media.

Keywords: Fractured carbonate reservoirs, Porous media, Dual porosity, Dual permeability, Joint roughness, Coupled Hydromechanical behavior



A Dissertation Submitted To Department Of
Mining Petroleum And Geophysics Engineering
Shahrood University Of Technology
In Partial Fulfillment Of The Requirements For
The Degree Of Doctor Of Philosophy

Title

**HYDRO-MECHANICAL MODELING OF PERMEABILITY IN
CARBONATE FRACTURED RESERVOIRS, CASE STUDY:
AN OIL WELL IN THE SOUTH OF IRAN**

By
Ali Arianfar

Supervisor
Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Advisor
En. Mohammad Khalili

Feb 2021