



مقاله پژوهشی

ویژگی‌های الاستیک سنگ مخزن‌های کربناته: اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با استفاده از تصاویر میکروسکوپی تی اسکن

شیرین سامانی^۱؛ علی ارومیه‌ای^{۲*}؛ بهزاد مهرگینی^۲؛ حسن اشراقی^۴

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد؛ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۳- پژوهشگر پسا دکتری؛ دانشکده عمران و معدن، دانشگاه تورنتو

۴- رئیس بخش زمین‌شناسی شرکت نفت و گاز پارس

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.393366.1194

واژگان کلیدی	چکیده
مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، حجم نماینده، میکروسکوپی تی اسکن، سازند کنگان	ویژگی‌های الاستیک (مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) به عنوان مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی مخازن و میدان‌های هیدروکربنی در نظر گرفته می‌شوند. به طور معمول این پارامترها با استفاده از داده‌های آزمون‌های ژئومکانیکی در آزمایشگاه محاسبه می‌شوند. اما به دلیل عدم دسترسی به نمونه‌های مناسب، تجهیزات آزمایشگاهی و هزینه‌های بالا، در بسیاری از موارد به منظور تخمین این پارامترها از معادلات تجربی، روش‌های آماری و ریاضی استفاده می‌شود. در این پژوهش ما به کمک روش‌های عددی با استفاده از نمونه دیجیتالی ساخته شده براساس تصاویر میکروسکوپی تی اسکن با وضوح بالا ویژگی‌های الاستیک نمونه‌های کربناته را به روشی غیر مخرب تخمین زده‌ایم. این مدل‌سازی به روش المان محدود و بر روی مدل هندسی و کسلی بازسازی شده از نمونه مکعبی که به عنوان حجم نماینده در نظر گرفته می‌شود انجام شده است. حجم نماینده با توجه به تخریب در نظر گرفته شده است. همچنین این ویژگی‌ها در آزمایشگاه براساس منحنی تنش محوری- کرنش محوری به دست آمده از آزمایش مقاومت تک فشارشی محوری و سه محوری محاسبه شده است و در نهایت نتایج بدست آمده از هر دو روش مقایسه شد. به طور کلی نتایج حاصل از مدل‌سازی در مقایسه با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بین ۴/۳ تا ۱۸/۹ درصد مقادیر بیش‌تر نشان می‌دهند. بیش‌ترین خطا مربوط به نمونه‌های با بالاترین مقادیر تخریب است که عمدتاً دولومیتی هستند. مفروضات درباره ویژگی‌های الاستیک ماده پایه (بخش جامد) با توجه به کانی‌شناسی همچنان چالش برانگیز است.

۱. پیش‌گفتار

می‌آید اما در بسیاری از موارد به دلیل محدودیت در دسترسی به نمونه مناسب، ابزار آزمایشگاهی و هزینه‌های بالا استفاده از این روش‌ها را محدود می‌سازد. به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف غیرمستقیم و مبتنی بر مدل‌های آماری و ریاضیاتی سعی به تخمین این پارامترها شده است [۳، ۴، ۵، ۶، ۷].

در دهه‌های اخیر ساخت و استفاده از مدل‌های دیجیتالی سنگ یا *DRP (Digital Rock Physics)* از سوی پژوهشگران

شناخت ویژگی‌های الاستیک مخازن کربناته به عنوان یکی از مهم‌ترین سنگ مخزن‌های هیدروکربنی جهان در مراحل مختلف اکتشاف و بهره برداری بسیار بااهمیت است [۱، ۲]. این پارامترها به همراه ویژگی‌های مقاومتی در ارزیابی و ساخت مدل‌های ژئومکانیکی بسیار کلیدی محسوب می‌شود. علی‌رغم اینکه استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای محاسبه ویژگی‌های الاستیک روشی مستقیم و قابل اعتماد به حساب

مختلف به ویژه فعالین حوزه مخازن مورد توجه قرار گرفته است.

این روش با تکیه بر تصویربرداری از مغزه‌های حاصل از حفاری توانسته اطلاعات را در مقیاس منافذ توسعه دهد. هدف اصلی این روش توصیف فیزیکی سنگ مخزن و استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی‌ها با اهداف مختلف است. اطلاعات قابل دستیابی از این روش شامل اطلاعات دقیق از منافذ سنگ، نمایش سه بعدی هندسه منافذ و ویژگی‌های همچون تخلخل و نفوذپذیری است که به طور مستقیم با این ویژگی در ارتباطند. علاوه بر این شامل مجموع اطلاعات مرتبط با تعامل سیال-سیال یا سیال-سنگ می‌شوند. [۸، ۹، ۱۰]

آندرا و همکاران در سال ۲۰۱۳ بخش دوم مطالعات خود را در زمینه ساخت *DRP* منتشر کردند. در این مطالعه که روی تصاویر سه بعدی قطعه بندی شده انجام شد نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از این مدل‌های فیزیکی و حلگرهای مختلف (المان محدود، تفاضل و لیپمن-شوینگر مبتنی بر فوریه) پارامترهای مختلفی از جمله نفوذپذیری مطلق، مدول‌های الاستیک و مقاومت الکتریکی را تخمین زد. با اینکه مقادیر منتج شده از روش‌های مختلف با هم اختلاف داشته ولی در محدوده نتایج آزمایشگاهی قرار می‌گرفتند [۱۱].

قاجار و همکاران در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای مقایسه‌ای در مورد بررسی تکامل ساختار منافذ و نفوذپذیری یک سنگ کربناته ریز متخلخل در طول انحلال شیمیایی با استفاده از اطلاعات ارائه شده از توموگرافی کامپیوتری میکرو اشعه ایکس (μ -CT) و تخلخل سنجی نفوذ جیوه (*MIP*) گزارش دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند به طور منطقی تغییرات جزئی در نفوذپذیری را از نظر ساختار منافذ و پارامترهای مقیاس کلان محاسبه شده از روش‌های *MIP* و μ -CT را پیش‌بینی کند [۱۲].

علاوه بر آن از این روش برای تخمین پارامترهایی همچون مدول تخمین مدول الاستیک با استفاده از روشی غیرمخرب در نمونه‌ها با ویژگی‌های سنگ‌شناختی مختلف (تخلخل و کانی‌شناسی) استفاده شده است.

آرن و همکاران در سال ۲۰۰۲ از روش مدل‌سازی المان محدود براساس تصاویر میکروسی‌تی‌اسکن، به منظور تخمین ویژگی‌های الاستیک چهار نمونه ماسه‌سنگ در شرایط خشک، اشباع با آب و اشباع با روغن استفاده کردند. نتایج این مطالعه

تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بیانگر موفقیت این روش در تخمین با کم‌ترین میزان خطا می‌باشد [۱۳].

سنجر و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال منفذی بر ویژگی‌های الاستیک با استفاده از *DRP* پرداخته‌اند. در این پژوهش ریزساختار سنگ توسط میکروسی‌تی‌اسکن تصویربرداری شده و شبیه‌سازی‌های عددی انتقال مؤثر و ویژگی‌های مکانیکی مؤثر برای نمونه‌های سنگی انجام شده است. در این مطالعه مقادیر نفوذپذیری از طریق شبیه‌سازی جریان شبکه - بولتزنم برآورد و مدول الاستیک در حالت خشک و پیچ خوردگی (*Tortuosity*) با شبیه‌سازی انتشار موج دینامیک به دست آمده است [۱۴].

سنجر و همکاران در سال ۲۰۱۶ به کمک ساخت *DRP* با استفاده از دو مجموعه تصاویر میکروسی‌تی‌اسکن با رزولوشن متفاوت و استفاده از روش قطعه‌بندی ویژه سعی داشتند ویژگی‌های وابسته به تخلخل از جمله ویژگی‌های الاستیک را تخمین بزنند. نتایج با داده‌ای تجربی مقایسه و محققین پیشنهاد کردند با توجه به پیچیدگی موجود در سنگ کربناته بهتر است استفاده از این روش به‌عنوان مکملی برای بررسی‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شوند [۱۵].

اسچپ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به منظور شناخت و درک عمیق از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ از جمله مدول الاستیسیته رتیکولیت به عنوان سنگی آذرآوری با تخلخل بالا (بیش از ۸۰ درصد) و همچنین مقاومت و شکنندگی بالا از روش‌های شبیه‌سازی براساس *DRP* استفاده کردند. نتایج حاصل این مطالعه تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد [۱۶].

آکیدا و همکاران در سال ۲۰۲۱ از مدل دیجیتالی فیزیک سنگ به هدف تخمین مدول الاستیسیته در کرنات‌های ساخته شده از چند کانی با تاکید بر تفکیک کانی‌ها و روش‌های مختلف سگمنتیشن و وضعیت اشباع سیال استفاده کرده‌اند [۱۷].

اخیرا در پژوهشی وو و همکاران با کمک تکنیک‌های *DRP*، به بررسی جامعی از اثرات فرآیندهای دیاژنزی و مسیرهای دیاژنز بر ویژگی‌های سنگ پرداختند. در این پژوهش، سنگ دیجیتالی اصلی با ذرات چند جزئی و نامنظم با استفاده از روش المان گسسته (*DEM*) ساخته شده است. این مدل به طور مشابه تحت چهار فرآیند دیاژنز (دو سیمان و دو انحلال) همراه

جدول ۱ تخلخل و کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه	تخلخل (%)	کانی‌شناسی (%)	
		کلسیت	انیدریت
۱	۲۲/۸۵	۰	۵
۲	۲۰/۴	۰	۸
۳	۲۵/۸۵	۰	۲
۴	۱۷/۷۸	۲۰	۱۰
۵	۲۶/۲۴	۰	۱۵
۶	۲۹/۳۴	۰	۸
۷	۱۱/۳	۳۰	۲۶
۸	۱۰/۰۸	۷۱	۲
۹	۱۹/۹۳	۰	۶
۱۰	۲/۴۹	۰	۲۳
۱۱	۳/۸	۰	۳۵
۱۲	۵/۸۹	۰	۳۰
۱۳	۶/۴۷	۰	۳۳
۱۴	۳۴/۷۷	۰	۲
۱۵	۳۲/۴۷	۰	۳
۱۶	۱/۷۲	۹۶	۰
۱۷	۱۸/۰۹	۹۷	۰
۱۸	۸/۲۱	۷۲	۷
۱۹	۳۳	۰	۹

پردازش تصویر و مصورسازی سه بعدی

با استفاده از مجموعه از داده‌های دو بعدی حاصل از فرآیند بازسازی انجام شده به منظور مصورسازی سه بعدی نیازمند نرم‌افزارهای تخصصی می‌باشیم. شکل ۲ مراحل بازسازی تصاویر اولیه را نمایش می‌دهد. در این مطالعه از نسخه‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ نرم‌افزار *Avizo* برای مصورسازی سه بعدی، پردازش و آماده‌سازی نمونه‌ها برای مراحل بعد استفاده شده است. به منظور تمایز منافذ از ماتریس، یک قطعه‌بندی تصویر باید انجام شود. هدف از این عملیات جداسازی فازهای جامد مانند ترکیبات سنگ تک معدنی و هوای مربوط به منافذ است. به این فرآیند تقسیم‌بندی می‌گویند. تجزیه و تحلیل کمی تخلخل نیاز به تعیین و کسل با و کسل فازهای خالی و سنگ دارد. علاوه بر این، الگوریتم‌های تقسیم‌بندی رایج مانند آستانه‌گذاری ساده، تشخیص لبه و خطوط فعال باید ذکر شود. به منظور اعتبارسنجی بعد از باینری کردن تصاویر (تفکیک

با دو مسیر دیاژنزی متفاوت برای تولید مدل‌های جدید قرار گرفتند نتایج نشان داد که سنگ نهایی که سیمان‌شدن و سپس انحلال را تجربه می‌کنند، تخلخل، ابعاد فراکتال، حفرات و نفوذپذیری بیش‌تر و پیچ‌خوردگی، ضریب تشکیل و مدول الاستیک کمتری نسبت به سنگی که تحت انحلال و سپس سیمان‌شدن قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد [۱۸].

در این پژوهش با ساخت یک مدل دیجیتالی از نمونه‌های سنگ مخزن کربناته کنگان ضمن بررسی و مقایسه نتایج تخلخل به دست آمده از روش پردازش تصویر و آزمایشگاهی مدلی فیزیکی برای تحلیل مکانیکی و تخمین ویژگی‌های الاستیک در نمونه‌های کربناته با ویژگی‌های منفذی متفاوت (مقدار تخلخل و پراکندگی) فراهم شده است. غیرمخرب بودن و سرعت را می‌توان از مزیت‌های اصلی این روش دانست. هرچند چالش‌های موجود در تصویربرداری و مدل‌سازی اجتناب ناپذیر است.

۲. نمونه‌های مورد استفاده

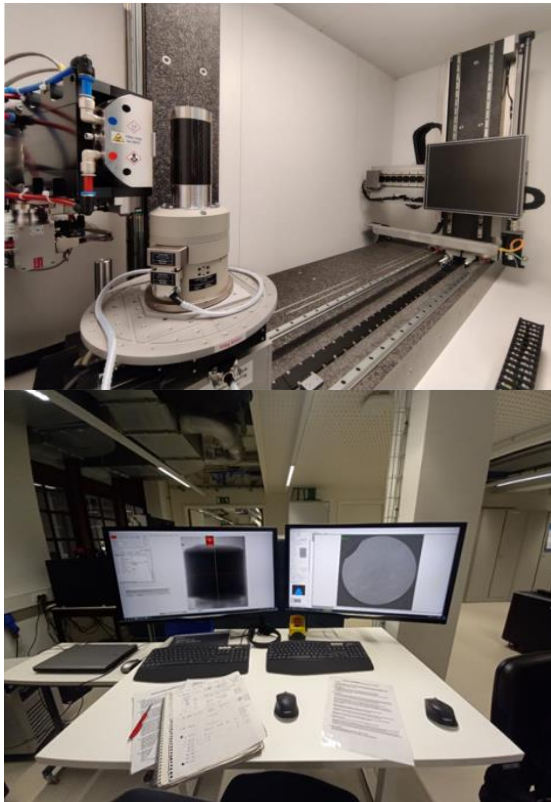
با توجه به هدف مطالعه تعداد ۱۹ نمونه با تفاوت در کانی‌شناسی (تشکیل شده از کلسیت، دولومیت، انیدریت) و میزان تخلخل (بین ۲ تا ۳۴ درصد) برای تصویربرداری با اسکنر میکروسی‌تی انتخاب شده است. مقادیر تخلخل با استفاده از تخلخل سنجی با گاز هلیوم و درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده به کمک روش *XRD* کمی به دست آمده است. جدول ۱ تخلخل و کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۳. میکروسی‌تی اسکن

تجهیزات

این مطالعه از دو دستگاه میکروسی‌تی اسکن *Unitom XL* و *Unitom HR* تولید شرکت *TESCAN* مستقر در مرکز تصویربرداری دانشکده مهندسی مواد دانشگاه *KU Leuven* استفاده شده است (شکل ۱). رزولوشن متفاوت، عدم محدودیت در اندازه و سرعت تصویر برداری متفاوت در دستگاه‌های مذکور برای ما امکان تصویربرداری به صورت منعطف، هدفمند و بهینه را فراهم آورد. با توجه به ابعاد منافذ و چگالی رزولوشن تصاویر بین ۴ تا ۱۳ میکرومتر متفاوت است.

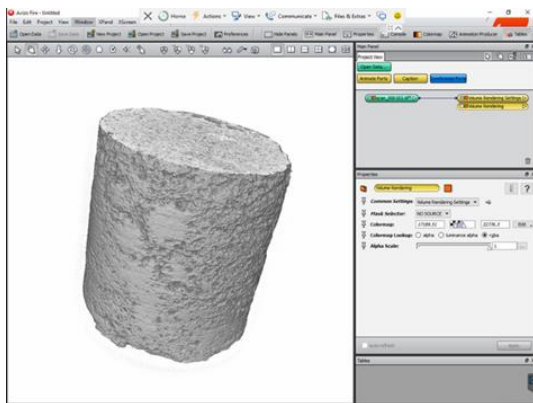
دو فاز) نتایج فاز تخلخل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در تصاویر شکل ۳ تصویری از نمونه مصورشده سه بعدی در نسخه ۲۰۱۹ این نرم‌افزار را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است برای انجام این کار به سیستمی با توان محاسباتی زیاد نیاز است. علاوه بر این، حجم مجموعه تصاویر قابل توجه است و معمولاً از قالب‌های تصویری که بر الگوریتم‌های فشرده‌سازی متکی هستند مانند *jpg* اجتناب می‌شود. در این مطالعه فرمت‌های تصویر *DICOM* و *tiff* مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. فرآیند بازسازی تصاویر اولیه



شکل ۱. دستگاه‌های تصویربرداری میکرو سی‌تی اسکن: تصویر بالا) *Unitom XL* تصویر پایین) *Unitom HR*



شکل ۳. مصورشده سه بعدی

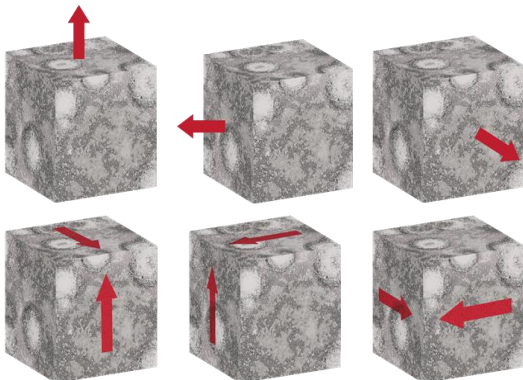
انتخاب حجم نماینده و بازسازی هندسه

ناهمگنی ویژگی اصلی سنگ مخزن‌های کربناته است. از این رو به طور معمول محیط‌های ناهمگن به واحدهای همگن تقسیم و مطالعه می‌شوند. در این واحدهای همگن بخش یا حجمی به عنوان حجم نماینده در نظر گرفته می‌شود. این حجم نشان‌دهنده کوچک‌ترین مقداری است که می‌توان به

است. روش اجزاء محدود ما را قادر می‌سازد که یک مسأله با بینهایت درجه آزادی را به یک مساله با درجه آزادی محدود تبدیل کنیم. بدین وسیله مراحل حل آن ساده‌تر می‌شود. هرچند که کاربرد اصلی این روش در خصوص مسأله مکانیک جامدات است. لیکن از آن می‌توان در سایر زمینه‌هایی که دارای مدل مشابه می‌باشند، استفاده نمود.

پس از آماده‌سازی فایل وکسلی اقدام به محاسبه ویژگی‌های سنگ با استفاده از اسکریپت نوشته شده در نرم‌افزار *ABAQUS* شده است. در قدم اول، مکعبی به ابعاد حجم نماینده ایجاد شده و سپس مشی دقیقاً متناظر با فایل وکسلی استخراج شده ایجاد شده است (المان‌ها از نوع المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته *C3D8R* می‌باشند) و به هر المان، خواص ماده مربوطه اختصاص داده شده است. به بیان دیگر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون هر دو فاز جامد و فضای خالی به وکسل‌ها اطلاق شده است. خواص فاز جامد براساس کانی‌شناسی نمونه و با استفاده از برون‌یابی مجموع داده‌های آزمایشگاهی موجود در نظر گرفته شده است.

برای استخراج ماتریس سختی در فرآیند همگن‌سازی نیاز به اعمال ۶ نوع بارگذاری است. به همین دلیل ۶ استپ یا مرحله استاتیکی ایجاد شده و ۳ بارگذاری کششی و ۳ بارگذاری برشی، مطابق آنچه که در شکل ۵ نمایش داده شده است، در این ۶ استپ به نمونه اعمال شده است.

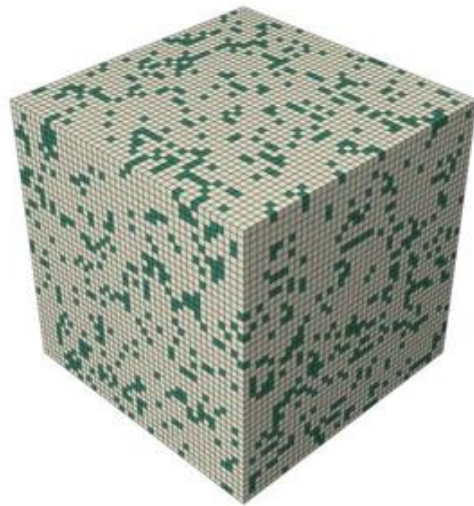


شکل ۵. شرایط مرزی جابجایی اعمال شده در ۶ استپ

پس از ایجاد جاب و حل مسئله در هر ۶ استپ، خروجی آن که شامل میدان‌های تنش و کرنش در پایان هر استپ در نمونه است توسط یک کد ++C پردازش شد. هدف از انجام این پس‌پردازش، همگن‌سازی و بدست‌آوردن خواص مؤثر

عنوان نماینده برای کل نمونه در نظر گرفته می‌شود. این حجم به روش‌های متفاوتی در حوزه‌های مختلف علمی محاسبه می‌شود. در این مطالعه ابتدا مکعبی را از نمونه مورد مطالعه جدا کردیم و سپس براساس روش‌های آماری و توزیع فضایی به کمک ماژولی در نرم‌افزار *MATLAB* از درستی حجم در نظر گرفته به عنوان *REV (Representative Element Volume)* اطمینان حاصل شد.

به منظور حل عددی با استفاده از نرم‌افزار *VoxTex* مدل وکسلی از نمونه مکعبی (حجم نماینده) ساخته شده است. خروجی این نرم‌افزار به صورت فایل متنی که برای هر وکسل نوع فاز (جامد و فضای خالی) مشخص شده است. شکل ۴ مدل ساخته شده به این روش را در ساده‌ترین شکل ممکن نمایش می‌دهد.

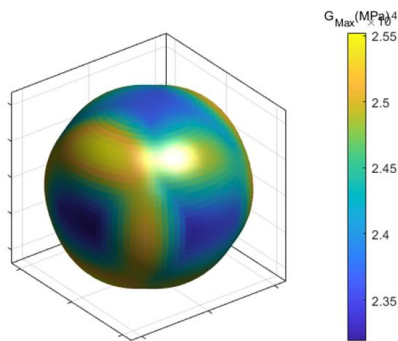


شکل ۴. نمونه‌ای از مدل وکسلی ساخته شده (وکسل‌های سبز رنگ نشان دهنده فضای خالی هستند)

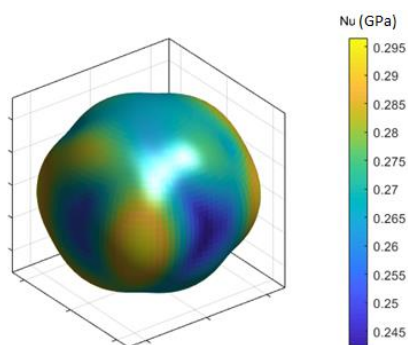
۴. فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزار *ABAQUS*

در این پژوهش با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در *ABAQUS* به عنوان بهترین گزینه برای شبیه‌سازی و محاسبه ویژگی‌های الاستیک در نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

آباکوس نرم‌افزاری مبتنی بر حل عددی اجزاء محدود است. یک جزء محدود، قسمتی از محیط پیوسته جزءبندی شده‌ای است که ابعاد آن محدود (کوچک) است ولی بینهایت کوچک نیست و معمولاً هندسه آن ساده‌تر از هندسه محیط پیوسته



شکل ۷. نمایش سه بعدی تغییرات مدول برشی



شکل ۸. نمایش سه بعدی تغییرات ضریب پواسون

۵. نتیجه‌گیری

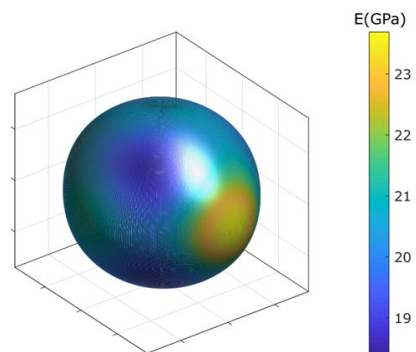
به طور کلی نتایج حاصل از مدل‌سازی در مقایسه با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بین ۴/۳ تا ۱۸/۹ درصد مقادیر بیش تر نشان می‌دهند (شکل ۹). با اینکه داده‌ها در نمودار نمایش داده شده در شکل ۱۰ بسیار پراکنده است اما بیش‌ترین خطا مربوط به نمونه‌ها با بالاترین مقادیر تخلخل است. این نمونه‌ها عمدتاً دولومیتی هستند. از آنجایی که نمونه‌ها براساس کانی‌شناسی به ۴ گروه تقسیم شده بودند جدول ۲ میانگین درصد خطا در هر گروه را نشان می‌دهد. مطابق با داده‌ها کم‌ترین درصد خطا در نمونه‌های کلسیتی (بیش از ۹۰ درصد کلسیت) و بیش‌ترین میزان خطا مربوط به نمونه‌های دولومیتی (بیش از ۹۰ درصد دولومیت) است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان این روش را موفق برای تخمین کلی از ویژگی‌های الاستیک در سنگ‌های کربناته مخزنی دانست هرچند به دلیل تاثیر عوامل مختلف بر این ویژگی‌ها استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی مختلف برای بررسی عوامل به صورت موازی برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

ماده است.

برای ارائه مدل سه بعدی، مدول الاستیک مؤثر ساختارها را در جهت بردار واحد d به شکل زیر می‌توان محاسبه کرد [۱۹، ۲۰]:

$$\frac{1}{E^*(d)} = (d \otimes d) : S^* : (d \otimes d) \quad (1)$$

که در آن d ، $E^*(d)$ ، S^* و \otimes به ترتیب بردار واحد، مدول الاستیک جهتی مؤثر، تانسور نرمی مؤثر سازه و علامت ضرب دایادیک هستند. شکل ۶ تغییرات مدول الاستیسیته را در سه بعد در یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمایش سه بعدی تغییرات مدول الاستیسیته

علاوه بر این، مدول برشی مؤثر و نسبت پواسون در صفحه ای با بردار نرمال d و در جهت بردار n برابر است با:

$$\frac{1}{2G^*(d, n)} = M : S^* : M, \quad M = \frac{\sqrt{2}}{2}(n \otimes d + d \otimes n) \quad (2)$$

$$\frac{-\nu^*(d, n)}{E^*(d)} = (d \otimes d) : S^* : (n \otimes n) \quad (3)$$

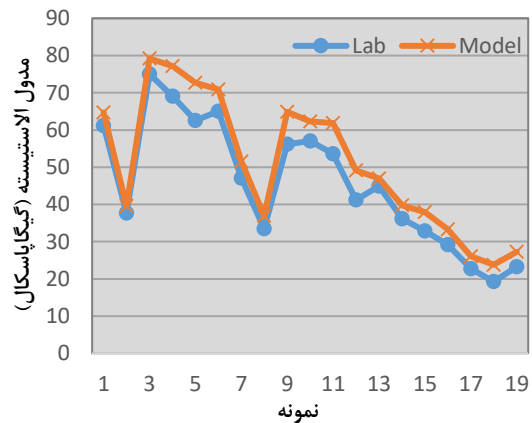
شکل ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات مدول برشی و ضریب پواسون را نشان می‌دهند.

اعتبار سنجی

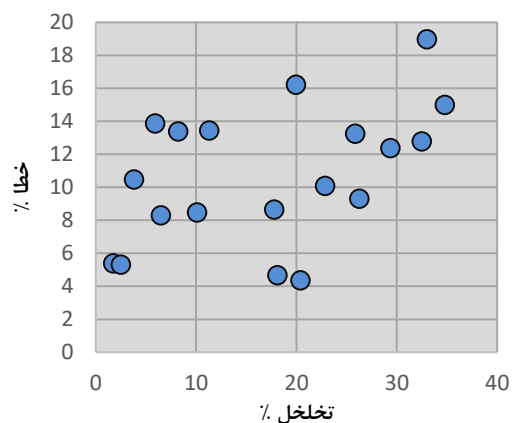
نتایج این شبیه سازی در نهایت با مقادیر محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی انجام مقایسه شده است. شکل ۲-۶ همبستگی بین هر دو مجموعه داده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میانگین درصد خطا به تفکیک براساس کانی‌شناسی

میانگین درصد خطا	تعداد نمونه‌ها	گروه‌ها براساس کانی‌شناسی
۵/۰۲	۳	بیش از ۹۰ درصد کلسیت
۱۰/۹۲	۳	بیش از ۷۰ درصد کلسیت بیش از ۲۰ درصد دولومیت
۹/۳۲	۶	بین ۶۰-۹۰ درصد دولومیت و بین ۱۰-۴۰ درصد انیدریت
۱۲/۸۸	۷	بیش از ۹۰ درصد دولومیت



شکل ۹. مقایسه نتایج به دست آمده از دو روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی



شکل ۱۰. رابطه درصد تخلخل با درصد خطا

۶. سپاس‌گزاری

از شرکت نفت و گاز پارس برای در اختیار قرار دادن نمونه‌های مورد مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد. این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس و کی یو لوون انجام شده است.

۷. فهرست نمادها

جدول ۲. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
$E^*(d)$	GPa	مدول الاستیک جهتی موثر
d	-	بردار واحد
S^*	-	تانسور نرمی موثر سازه
\otimes	-	علامت ضرب دایادیک
ν^*	-	ضریب پواسون
G^*	MPa	مدول برشی

۸. مراجع

[1] Abdideh, M., & Ghasemi, A. (2014). A comparison of various statistical and geostatistical methods in estimating the geomechanical properties of reservoir rocks. *Petroleum science and technology*, 32(9), 1058-1064.

[2] Xu, H., Zhou, W., Xie, R., Da, L., Xiao, C., Shan, Y., & Zhang, H. (2016). Characterization of rock mechanical properties using lab tests and numerical interpretation model of well logs. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.

[3] Aboutaleb, S., Behnia, M., Bagherpour, R., & Bluekian, B. (2018). Using non-destructive tests for estimating uniaxial compressive strength and static Young's modulus of carbonate rocks via some modeling techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 1717-1728.

[4] Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., & Behboud, M. M. (2019). Geomechanical parameter estimation from mechanical specific energy using artificial intelligence. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 407-429.

[5] Beiki, M., Majdi, A., & Givshad, A. D. (2013). Application of genetic programming to predict the uniaxial compressive strength and elastic modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 63, 159-169.

- Digital rock physics and laboratory considerations on a high-porosity volcanic rock. *Scientific Reports*, 10(1), 5840.
- [17] Ikeda, K., Subramaniyan, S., Quintal, B., Goldfarb, E. J., Saenger, E. H., & Tisato, N. (2021). Low-Frequency Elastic Properties of a Polyminerale Carbonate: Laboratory Measurement and Digital Rock Physics. *Frontiers in Earth Science*, 9, 628544.
- [18] Wu, Y., Tahmasebi, P., Lin, C., & Dong, C. (2022). Using digital rock physics to investigate the impacts of diagenesis events and pathways on rock properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 108025.
- [19] Nordmann, J., Aßmus, M., & Altenbach, H. (2018). Visualising elastic anisotropy: theoretical background and computational implementation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 30, 689-708.
- [20] Böhlke, T., & Brüggemann, C. (2001). Graphical representation of the generalized Hooke's law. *Technische Mechanik*, 21(2), 145-158.
- [6] Ghasemi, E., Kalhori, H., Bagherpour, R., & Yagiz, S. (2018). Model tree approach for predicting uniaxial compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 331-343.
- [7] Hadi, F., & Nygaard, R. (2022). Estimating unconfined compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks from petrophysical properties. *Petroleum Science and Technology*, 1-23.
- [8] Dvorkin, J., Tutuncu, A., Tutuncu, M., Nur, A. and Mese, A., (2003 September), *Rock property determination using digital rock physics*. In *Geophysics of the 21st Century-The Leap into the Future* (pp. cp-38). European Association of Geoscientists & Engineers.
- [9] Claes, S., Soete, J., Cnudde, V., & Swennen, R. (2016). A three-dimensional classification for mathematical pore shape description in complex carbonate reservoir rocks. *Mathematical Geosciences*, 48, 619-639.
- [10] Cnudde, V., & Boone, M. N. (2013). High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123, 1-17.
- [11] Andrä, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., ... & Zhan, X. (2013). Digital rock physics benchmarks—Part II: Computing effective properties. *Computers & Geosciences*, 50, 33-43.
- [12] Qajar, J., & Arns, C. H. (2022). A comparative study of micro-CT and mercury intrusion techniques for predicting permeability and surface area evolution during chemical dissolution. *Advances in Water Resources*, 168, 104301.
- [13] Arns, C. H., Knackstedt, M. A., Pinczewski, W. V., & Garboczi, E. J. (2002). Computation of linear elastic properties from microtomographic images: Methodology and agreement between theory and experiment. *Geophysics*, 67(5), 1396-1405.
- [14] Saenger, E. H., Enzmann, F., Keehm, Y., & Steeb, H. (2011). Digital rock physics: Effect of fluid viscosity on effective elastic properties. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4), 236-241.
- [15] Saenger, E. H., Vialle, S., Lebedev, M., Uribe, D., Osorno, M., Duda, M., & Steeb, H. (2016). Digital carbonate rock physics. *Solid Earth*, 7(4), 1185-1197.
- [16] Schepp, L. L., Ahrens, B., Balcewicz, M., Duda, M., Nehler, M., Osorno, M., ... & Saenger, E. H. (2020).