



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

(گروه مهندسی اکتشاف معدن)

رساله دکتری

پیش بینی شاخصه های استاتیک و دینامیک پتروفیزیکی سنگ مخزن کربناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و شبیه سازی حرکت سیال در محیط متخلخل

دانشجو

جواد قياسي فريز

اساتيد راهنما

دكتر منصور ضيايي

دکتر علی مرادزاده

شهريور ۱۳۹۷

2-5494544	e.		
تاريخ VI V مر 4V	باسمه تعالى	للاتی «کامتریاس مدیریت تحصیلات تکمیلی	

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود اقای جواد قیاسی فریز دانشجوی دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن به شماره دانشجویی ۹۲۱۷۰۰۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۳۹۷/۱۶/۱۹ از رساله خود با عنوان : بیش بینی شاخصه های استاتیک و دینامیک پتروفیزیکی سنگ مخزن کرمناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و شبیه سازی حرکت سیال در محیط متخلخل دفاع و با اخذ نمره ... ۵ کم ۴۰ ... به درجه ... هالی می نائل گردید.

ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ 🗌	الف) درجه عالى: نمره ۲۰-۱۹ 🗴
د) غير قابل قبول و نياز به دفاع مجدد دارد	ج) درجه خوب: تمره۱۶/۹۹–۱۵ 🗌
	 ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد □

ديف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	reting
1	دکثر منصور ضیایی	استاد راهنما اول	دانشيار	X
۲	دکتر علی مرادزاده	استاد راهنما دوم	استاد	
٣	دکتر مجید نبی بیدهندی	استاد مدعو خارجي	استاد	\bigcirc
۴	دکتر معصومه کردی	استاد مدعو داخلي	استاديار	- 40
۵	دکتر حسین خسروی	استاد مدعو خارجي	استاديار	R
	دکثر امین روشندل کاهو	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	A

مدیر محتوم تحصیلات تکمیلی دانشگاه: ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید. رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران تاریخ و امضاء: ماحصل آموختههایم را تقدیم میکنم به آنان که با پرتو مهر آسمانی شان، آرام بخش آلام زمینیام شدند ...

قدردانی و سپاس

خداوند متعال را سپاس که مرا در تمامی مراحل زندگی یار و یاور بوده و همواره پرتو الطاف بیکران خویش را بر من تابانده است. شاکرم که به من فرصتی عطا نمود تا از رهگذر تحصیل علم، بخشی از زندگیام را در محیطی مقدس و با انسانهای فرهیخته سپری کنم.

از زحمات بیدریغ و حمایتهای ارزنده علمی، فکری و معنوی اساتید عزیزم، آقای دکتر منصور ضیایی و آقای دکتر علی مرادزاده که نه تنها شوق آموختن را در من انگیختند، بلکه درس اخلاق و صبوری را نیز به من آموختند، سپاسگزارم.

از آقای دکتر مجید نبی بیدهندی استاد دانشکده ژئوفیزیک دانشگاه تهران و آقای دکتر حسین خسروی استادیار دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود و خانم دکتر معصومه کردی استادیار دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

- از پدر و مادرم، فرشتگان مهربانی که لحظات ناب بودن، لذت دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربههای یکتا و زیبای زندگیام مدیون حضور سبز آنهاست، سپاسگزارم.
- از همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است و در طول این مسیر با قلبی آکنده از عشق و معرفت، محیطی سرشار از شادی و آرامش برایم فراهم نمود، سپاسگزارم.
- از دوستان عزیز و بزرگوارم آقایان مهندس علی بیات و مهندس رضا قنبرنژاد و سرکار خانم مهندس مهناز عابدینی که در مراحل مختلف انجام این پژوهش یاری ام کردند، از صمیم قلب متشکر و ممنونم.

در پایان بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس و قدردانیام تمامی اساتید بزرگوار، کارشناسان و کارکنان دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که در دوره تحصیل و در طول تحقیق و جمعآوری این رساله، اینجانب را یاری کردند، ابراز دارم.

تعهد نامه

اینجانب **جواد قیاسی فریز** دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی معدن- گرایش اکتشاف- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، **نویسنده رساله پیش بینی شاخصه های استاتیک و دینامیک** پتروفیزیکی سنگ مخزن کربناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و شبیه سازی حرکت سیال در محیط متخلخل تحت راهنمائی دکتر منصور ضیایی و دکتر علی مرادزاده 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 نتایح اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، 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 ۹۷/۰۹/۱۰

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده رساله وجود داشته باشد.

ارائه پیش بینی دقیق از شاخصه های پتروفیزیکی سنگ مخزن دارای اهمیت ویژهای برای شبیه سازی مخزن است. در این تحقیق از اطلاعات در تصاویر مقاطع نازک برای پیش بینی تخلخل و تراوایی سنگ مخازن کربناته استفاده شده است. برای این منظور دو رویکرد متفاوت مد نظر قرار گرفته است. در رویکرد اول مشخصههای استاتیک مانند توزیع فضاهای خالی، فراوانی سیمان، شکل هندسی و پیچیدگی فضاهای خالی و نوع بافت بعد از استخراج از تصاویر مقاطع نازک به عنوان ورودی مدلهای طبقهبندی داده مانند درخت تصمیم گیری، تابع تفکیک کننده، ماشین بردار پشتیبان، مدل نزدیکترین همسایگی و دو الگوریتم ترکیبی به نام های مدل تقویت کننده و بسته بندی استفاده شد و کلاس تراوایی سنگ پیش بینی گردید. نتایج نشان می دهد الگوریتم های ترکیبی طبقه بندی داده در مقایسه با الگوریتم های ساده عملکرد دقیقتری داشتهاند و دقت مدل های ساده را تا ۷/۷ ٪ بهبود دادهاند. در رویکرد دوم تصاویر مقاطع نازک به عنوان تصویر آموزشی دو الگوریتم بازسازی کننده فضای خالی به نام های الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو و الگوریتم تابع همبستگی عرضی استفاده شدند. خروجی این الگوریتم ها یک مدل دیجیتالی سه بعدی از سنگ است که با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی حرکت سیال در آن انجام گرفت و مقدار تراوایی محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد الگوریتم تابع همبستگی علی رغم عملکرد قابل قبول که در نمونه های ماسه سنگی داشته ولی نمی تواند بازسازی دقیقی از فضای متخلخل سنگهای کربناته ارائه دهد. عدم حفظ ارتباط فضاهای خالی در بعد سوم یکی از ضعف های این الگوریتم است. در مقابل الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو توانست پیش بینی دقیقی از ساختار فضای متخلخل سنگ بازسازی نماید. نتایج بدست آمده از شبیه سازی حرکت سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن در پنج نمونه بازسازی شده از سازندهای کنگان و دالان موید این مهم است. همچنین با اعمال استراتژی تفکیک فضاهای خالی در تصاویر آموزشی برای هر نمونه سنگ، سه زیر مدل به نامهای میکرومدل، مزومدل و ماکرومدل ایجاد شد که به کمک آنها می توان علاوه بر مطالعه سهم هریک از فضاهای خالی در تراوایی کل سنگ، دقت تخمین تراوایی کل را نیز افزایش داد. مقایسه تراوایی بدست آمده بعد از شبیه سازی حرکت سیال در زیرمدل های سه بعدی نشان می دهد که ماکروتخلخل ها بیشترین سهم در تراوایی کل سنگ را دارند و بالا بودن مقدار میکروتخلخل در سنگ تضمینی برای تراوایی بالا نیست. با تلفیق زیرمدلهای ایجاد شده برای هر نمونه به کمک یک عملگر انطباقی، یک مدل سه بعدی جامع به نام مدل انطباقی ایجاد شده برای هر نمونه به کمک یک عملگر انطباقی، یک مدل سه بعدی جامع به نام مدل انطباقی ایجاد شد که شبیه سازی حرکت سیال در آن نشان میداد میکروتخلخل ها که به تنهایی تاثیر زیادی در تراوایی ندارند، وقتی در کنار ماکروتخلخل ها قرار بگیرند باعث ارتباط بیشتر آنها با یکدیگر و بهبود تراوایی ندارند، وقتی در کنار ماکروتخلخل ها قرار بگیرند باعث ارتباط بیشتر مقایسه با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه، برای مدل جامع انطباقی و مدل جامع غیر انطباقی بترتیب برابر ۱۲/۷۷ و ۱۸/۸ میلی دارسی است. همچنین میانگین خطای مطلق برای مدل جامع انطباقی و مدل جامع در تراوایی عمودی بترتیب ۶/۶۹ و ۲۹/۶ میلی دارسی بوده است.

کلمات کلیدی: ارزیابی سنگ مخزن، الگوریتمهای داده کاوی، الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو، الگوریتم تابع همبستگی عرضی، شبکه بولتزمن، سازندهای کنگان و دالان.

مقالات مستخرج از رساله

۱۳۹۶، بیرجند).

از رساله حاضر چهار مقاله مستخرج شده است که دو مورد کنفرانسی و دو مورد ژورنالی می باشند که در ادامه لیست شده اند:

- "اتوماسیون سازی مطالعات زمین شناسی با استفاده از آنالیز تصویر و تشخیص الگو". جواد قیاسی فریز، منصور ضیایی، علی مرادزاده. ارائه شده در هشتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی (۲۷ و ۲۸ شهریور ۱۳۹۵، زنجان)
 "پیاده سازی و بکارگیری یک روش نوین برای شبیه سازی سه بعدی روند تغییرات ویژگی های زمین شناسی با استفاده از تابع همبستگی عرضی". جواد قیاسی فریز، علی مرادزاده، منصور ضیایی. ارائه شده در نهمین همایش انجمن زمین شیاسی مرادزاده، مناسی انجمن زمین میناسی اقتصادی (۱۳ و ۲۸ شهریور ۱۳۹۵، زنجان)
- Javad Ghiasi-Freez, Mansour Ziaii and Ali Moradzadeh, 2018. Improving reservoir rock classification in heterogeneous carbonates using boosting and bagging strategies: A case study of early Triassic carbonates of coastal Fars, south Iran. Journal of Mining & Environment, Vol. 9 (4), 839-855.
- Javad Ghiasi-Freez, Mansour Ziaii and Ali Moradzadeh, 2018. Investigating the contribution of different sizes of pore spaces to the permeability of heterogeneous carbonate rocks using Markov Chain Monte Carlo and lattice-Boltzmann simulation. Geosystem Engineering. https://doi.org/10.1080/12269328.2018.1486738.

1	فصل اول: کلیات و مبانی
۲	۱–۱– مقدمه
اضر۳	۱-۲- سازماندهی گزارش ح
۴	-۳-۱ بیان مسئله
۵	۱–۴– اهداف تحقیق
تحقيق٧	۱–۵– فرضیهها و پرسشهای
λ	-۶- ۲- ضرورت تحقیق
ېدگاه مېندىپ نفت	ررو یی ۱-۶-۱- ضرورت تحقیق از د
ید ۲۰ مهدسی ۲۰۰ یدگاه توسعه و بومی سازی نرم افزاری	۲-۶-۲-ضرورت تحقیق از د
جرای آن	۱–۷– روش تحقیق و نحوه ا
۱۵	فصل دوم: پیشینه تحقیق
١۶	۔ ۱–۲– مقدمه
حقيقات مرتبط	۲–۲– نگاهی به مطالعات و ت
ی داده کاوی و روشهای بازسازی فضای متخلخل۲۹	فصل سوم: مباني الگوريتمها
۳۰	-۱-۳ مقدم <u>ه</u>
۳.	
۳۱ ۱۰۰۰	۲۰۲۰ مبانی اندورینم های ک
۳۲	۲-۲-۳ - تابع آثالیر تفکیک ک ۲-۳-۲-۲ در خت تصمیم گیری
ے بگی	ر ۳-۲-۳-نزدیک ترین همسای
ار پشتیبان	۳-۳-۴-الگوريتم ماشين برد
ی۳۷	۳-۲-۵- الگوریتم های تر کیب
بندی	۳-۲-۵-۱- استراتژی بسته
کننده۳۸	۳-۲-۵-۲- استراتژی تقویتک
ضای خالی۴۰	۳-۳- روش های بازسازی فغ
کو مونته کارلو۴۱	۳–۳–۱–الگوريتم زنجيره مار
ی همبستگی عرضی۴۵	٣-٣-٢-الگوريتم شبيه ساز

فهرست مطالب

۴٩	۳-۳-۲-۱ - شبیه سازی غیر شرطی
۵۲	۳-۳-۳ رویکردهای متفاوت در شبیه سازی یک مدل سه بعدی
وش	فصل چهارم: پیش بینی تراوایی سنگ مخزن کربناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و ر
۵۵	های داده کاوی هوشمند
۵۶	۴–۱– مقدمه
۵۷	۴–۲– آماده سازی داده ها
۵۸	۴-۲-۲ معرفی سازندهای کنگان و دالان
۵۹	۴-۳- تهیه مقاطع نازک اشباع شده با اپوکسی آبی
۵۹	۴-۴- تهیه تصاویراز مقاطع نازک
۶۱	۴-۵- آماده سازی و پیش پردازش تصاویر
۶۴	۴-۶- زون بندی مخزنی
۶۸	۴-۷- آنالیز تصاویر و مطالعه پتروگرافی مقاطع
۶۸	۴–۷–۱ مشخصه های هندسی فضاهای خالی
۷۲	۴–۷–۲ پیچیدگی هندسی فضاهای خالی
۷۴	۴-۷-۳ توزیع سیمان
٧۶	۴-۷-۴ بافت کربناته
۸۳	۴–۸– طراحی، آموزش و ارزیابی عملکرد الگوریتم های داده کاوی
٨۴	۴-۸-۲ معیارهای ارزیابی عملکرد مدلهای طبقه بندی داده
٨۴	۲-۸-۴- دقت
٨۵	۴-۸-۳ صحت و بازخوانی
٨۵	۴–۸–۳ میانگین همساز
٨۶	۴–۹– ارزیابی عملکرد کلی مدل های طبقه بندی داده
٨۶	۴–۱–۹–الگوریتم درخت تصمیم گیری
٨٨	۴–۹–۲–ارزیابی دقت مدلها در زون های مختلف
٩٠	۴–۱۰- نتیجه گیری و جمع بندی
۹۳	فصل پنجم: طراحی الگوریتم تشخیص الگو برای تفکیک انواع فضاهای خالی در مقاطع کربناته
۹۴	۵–۱– مقدمه

۹۴	۵-۲- مشخصه های هندسی قابل استخراج از فضاهای خالی
٩٧	۵-۳- استخراج مشخصه های هندسی از تصویر
٩٩	۵-۴- تحلیل آماری اطلاعات استخراج شده از فضاهای خالی
۱۰۴	۵-۵- طراحی و آموزش سیستم هوشمند
۱۰۴	۵–۵–۱–انتخاب بهینه داده های آموزش
۱۰۸	۵-۷- ارزیابی و دقت سنجی عملکرد الگوریتم
۱۱۰	۵-۷-۱- محاسبه خطا الگوریتم بر اساس مساحت محاسبه شده
114	۵-۷-۲- محاسبه دقت الگوریتم بر اساس پارامترهای هندسی
۱۱۵	۵-۷- تحلیل و بررسی عملکرد الگوریتم از دیدگاه زمین شناسی نفت
۱۱۷	فصل ششم: بازسازی سه بعدی فضای متخلخل و شبیه سازی حرکت سیال
۱۱۸	۶–۱– مقدمه
۱۱۹	۶-۲- شبیه سازی حرکت سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن
177	۶–۲–۱ – شبیه سازی حرکت سیال در لوله
۱۲۵	۶–۲–۲ شبیه سازی حرکت سیال در فضای متخلخل نیمه پیچیده
۱۲۹	۶-۳- الگوريتم هاي بازسازي مدل سه بعدي سنگ
188	۶-۴- بازسازی فضای متخلخل با استفاده از الگوریتم CCSIM
188	۶-۴-۴ تاثیر اندازه شابلون اسکن کننده
۱۴۳	۶–۴–۲ تاثیر اندازه ناحیه همپوشانی
۱۴۸	۶-۴-۴ به دام افتادن الگوریتم در الگوهای تکراری
۱۵۱	۶-۴-۴ ارزیابی عملکرد الگوریتم CCSIM در بازسازی فضای متخلخل نمونه ماسه سنگ بریا
۱۵۵	۶-۴-۶ عملکرد الگوریتم CCSIM در بازسازی فضای متخلخل نمونه کربناته C1
۱۵۸	۶–۵– تفکیک فضاهای خالی با اندازه های مختلف
187	۶-۶- بازسازی فضای متخلخل با استفاده از الگوریتم MCMC
187	۶-۶-۱-۶ عملکرد الگوریتم MCMC در بازسازی فضای متخلخل نمونه کربناته C1
194	۶–۶–۲–انتخاب مدل سه بعدی با ابعاد بهینه
180	۶-۶-۳- ارزیابی عملکرد الگوریتم MCMC در حفظ پیوستگی فضاهای خالی
189	۶-۷- تخمین تخلخل و تراوایی در نمونه های سازندهای کنگان و دالان

189	۶-۷-۲ - بازسازی فضای متخلخل در تصاویر سازندهای کنگان و دالان
١٧٨	۶-۲-۲- شبیه سازی حرکت سیال در زیرمدلها و مدلهای جامع
۱۸۳	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
١٨۴	۲–۱– مقدمه
١٨۴	۲-۲- نتایج بخش الگوریتمهای داده کاوی
۱۸۵	۷-۳- نتایج بخش بازسازی فضای خالی و شبیه سازی حرکت سیال
۱۸۶	۷-۴- نوآوری تحقیق
١٨٨	۷-۵- پیشنهادات برای مطالعات آینده
۱۹۰	۷-۶- محدودیتها و ضعف های مطالعه حاضر
ِ شبکهای فضاهای خالی و ۱۹۳۰	فصل هشتم: پیوست الف: الگوریتم استخراج کننده پارامترهای ساختار گلوگاه های متصل کننده آنها
194	۸–۱–۸ مقدمه
19۴	۸-۲- بخش بندی تصویر با استفاده از الگوریتم بخش بندی آب پخشان
۱۹۵	۸–۳– مساحت فضاهای خالی
۱۹۵	۸-۴- محاسبه متوسط قطر فضاهای خالی
۱۹۵	۸-۵- محاسبه قطر و طول گلوگاه ها و عدد تناسب
۲۰۱	منابع

فهرست شكلها

۱۲	شکل ۱-۱- نمایی از تصویر گرفته شده از مقطع نازک (چپ) و تصویر بخش بندی شده (راست)
۳۳	شکل ۳-۱- نمایش شماتیک از ساختار یک الگوریتم درخت تصمیم گیری
۳۴	شکل ۳-۲- نمایش شماتیک از روش نزدیکترین همسایگی در دو بعد
۳۶	شکل ۳-۳- نماش شماتیک از چگونگی جدایش داده های آموزشی و ایجاد بردارهای پشتیبان
44	شکل۳-۴- نمایش شماتیک یازده و دوازده همسایگی برای دو وکسل مجاور
۴۷	شکل ۳–۵- نمایش شماتیک از یک شابلون به ابعاد ۹×.۹
۴۷.	شکل ۳-۶- نمایش شماتیک از فرآیند اسکن شدن تصویر آموزشی در یک مسیر شطرنجی
۴۸	شکل ۳-۷- نمایش شماتیک یک رویداد داده در شابلون با ابعاد ۹×۹
۴٩	شکل ۳–۸- نمایش شماتیک از انواع مختلف همپوشانی (الف) افقی، (ب) عمودی و (ج) متقاطع
۵۰	شکل ۳-۹- نمایش شماتیک از مسیر حرکتی طی فرآیند بازسازی
۶۰	شکل ۴-۱- تجهیزات تصویربرداری از مقاطع نازک شامل
۶۴	شکل ۴-۲- مراحل استخراج فضاهای خالی در یک تصویر باینری از تصویر رنگی
۶۵	شکل ۴-۳- ارتباط بین تخلخل و تراوایی در نمونه های سازندهای کنگان و دالان
<i>99</i>	شکل ۴-۴- تفکیک مقدار (الف) تخلخل و (ب) تروایی بر اساس حد آستانه تعریف شده
۶۷	شکل ۴-۵- کراس پلات تخلخل و تراوایی در زون های تعریف شده
۷۲ .	شکل ۴-۶- رابطه بین تراوایی و حاصلضرب تخلخل کل و درصد هر نوع از فضاهای خالی
۷۳	شکل ۴-۷- تفاوت در پیچیدگی هندسی فضاهای خالی
۷۵	شکل ۴-۸- هیستوگرام شدت نور پیکسلها در مرز جدایش سیمان و بافت
٧۶	شکل ۴-۹- تصاویر مقاطع نازک سه نمونه از سازندهای کنگان و دالان با رشد گسترده سیمان
٧٧	شکل ۴–۱۰- توزیع اندازه بافت دانهام در زون های تعریف شده برای سازندهای کنگان و دالان
۷٩	شكل ۴–۱۱- چهار نمونه با بافت گرينستونی
٨٠	شکل ۴–۱۲– تقسیم بندی نمونه ها بر اساس توزیع بافت در هریک از کلاس های مخزنی
۸۳	شكل ۴-۱۳- فراواني نوع بافت سنگ و انواع مختلف تخلخل
۹۲	شکل ۴-۱۴- زون بندی مخزنی در یک بازه ۳۵ متری از سازندهای کنگان و دالان
٩٧	شکل ۵-۱- نمایش گرافیکی مشخصه های استخراج شده از هر خلل و فرج
۹۸.	شکل ۵-۲- در این تصویر فضاهای خالی بررسی شده به ترتیب اندازه شماره گذاری شده اند
۱۰۲	شکل ۵-۳- تغییرات پارامترهای هندسی در مقابل انواع فضاهای خالی

شکل ۵-۴- پراکندگی سه پارامتر نسبت تصویر، فراخی و گردشدگی برای پنج نوع فضای خالی ۱۰۳
شکل ۵-۵- تصاویر انتخاب شده برای تست الگوریتم تفکیک کننده
شکل ۵-۶- مقایسه دقت سه الگوریتم در شناخت فضای خالی منفرد
شکل ۶–۱– نمایش مقیاس ماکروسکوپیک، مزوسکوپیک و میکروسکوپیک در سیالات
شکل ۶-۲- مدل شبکه بولتزمن در سه بعد و ۱۹جهت حرکت ذرات
شکل ۶-۳- نمایش شماتیک از (الف) لوله و (ب) توزیع شار سیال در مقطع عرضی لوله
شکل ۶-۴- روند حرکت سیال در لوله در بازه های زمانی مختلف
شکل ۶-۵- خروجی نهایی روش شبکه بولتزمن برای حرکت سیال در لوله
شکل ۶-۶- نمایش شماتیک از فضای متخلخل نیمه پیچیده
شکل ۶-۷- نمایش شماتیک توزیع بردارهای سرعت، مقدار سرعت و خطوط جریان
شکل ۶–۸- نمایش شماتیک از مدل سه بعدی ماسه سنگ بریا
شکل ۶-۹- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای ماسه سنگ بریا
شکل ۶-۱۰- نمایش شماتیک از مدل سه بعدی کربناته C1
شکل ۶–۱۱- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه کربناته C1 در استان ۱۳۵
شکل ۶-۱۲- بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۱۶
شکل ۶-۱۳- بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۳۶
شکل ۶-۱۴- بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۶۴
شکل ۶-۱۵- لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۱۶۱۴
شکل ۶-۱۶- لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۳۶۱۴۲
شکل ۶-۱۷- لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۶۴۱۴۳
شکل ۶–۱۸– بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۱۲
شکل ۶–۱۹- بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۱۶
شکل ۶-۲۰- بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۲۴۲۴
شکل ۶–۲۱- تکرار یک الگو از لایه چهارم در فرآیند بازسازی متوالی
شکل ۶-۲۲- نمایش مکعب دیجیتالی بازسازی شده بر اساس لایه اول ماسه سنگ بریا
شکل ۶-۲۳- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه بازسازی شده ماسه سنگ بریا ۱۵۴
شکل ۶-۲۴- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه بازسازی شده کربناته C1 ۱۵۶
شکل ۶–۲۵- چهار نمونه از تصاویری بازسازی شده با خطای بالا

شکل ۶-۲۶- نمایش (الف) یک تصویر باینری از مدل دیجیتالی C1......C1 نمایش (الف) یک تصویر باینری از مدل دیجیتالی شکل ۶–۲۷- نمایش شماتیک از نمای بیرونی زیرمدلهای بازسازی شده با الگوریتم CCSIM..... شکل ۶–۲۸– نمای بیرونی مدل بازسازی شده از نمونه کربناته C1......C1 نمای بیرونی مدل بازسازی شده از نمونه کربناته شكل ۶-۲۹- چهار لايه متوالى، (الف) لايه اول، (ب) لايه دوم، (ج) لايه سوم و (د) لايه چهارم۱۶۶ شكل ۶-۳۰- چهار لايه متوالى، (الف) لايه اول، (ب) لايه دوم، (ج) لايه سوم و (د) لايه چهارم..... ۱۶۷ شكل ۶-۳۱- چهار لايه متوالى، (الف) لايه اول، (ب) لايه دوم، (ج) لايه سوم و (د) لايه چهارم ... ۱۶۸ شکل ۶-۳۲- نمایش شماتیک از پلاگ مغزه و تهیه مقاطع نازک در سه راستای عمود بر هم ۱۷۱ شکل ۶–۳۳– تصاویر مقاطع نازک که برای بازسازی سه بعدی فضای متخلخل استفاده شده اند .. ۱۷۲ شکل ۶–۳۴– نمای بیرونی و داخلی از زیرمدلهای بازسازی شده شکل ۶–۳۵– مدل های سه بعدی بازسازی شده با استفاده از الگوریتم MCMC ۱۷۶ شکل ۶-۳۶- توزیع مقدار تخلخل در اسلایس های دو بعدی مدل های بازسازی شده ۱۷۸ شکل ۶–۳۷-: نمودارهای دایره ای میزان سهم هریک از فضاهای خالی شکل ۶–۳۸– مقایسه روند تغییرتراوایی در نمونه های بررسی شده شکل ۶–۳۸ شکل ۸-۱- نمایش تصویر مقطع نازک که باینری شده، حذف فضاهای مرزی، پردازش با فیلتر مدیان با همسایگی ۳ پیکسل و الگوریتم بخش بندی آب پخشان بر روی آن اعمال شده است........ ۱۹۷ شکل ۸-۲- نمایش شماتیک از دوایر معادل و شبکه دو بعدی فضای خالی شکل ۸–۳- نمایش شماتیک از قطر گلوگاه های متصل کننده فضاهای خالی ۱۹۸ شکل ۸-۴- نمایش شماتیک از (الف) جدایش لبه فضاهای خالی و (ب) مراکز فضاهای خالی ۱۹۹ شکل ۸–۵- فراوانی قطر و طول گلوگاهها و عدد تناسب و شعاع فضاهای خالی تصویر نمونه ۲۰۰

فهرست جدولها

۶۷	ل ۴-۱- مقادیر تخلخل و تراوایی و زون های متناظر با هر نمونه مغزه	جدول
۷۴	ل ۴-۲- مقدار میانگین پیچیدگی هندسی در تصاویر مقاطع نازک بررسی شده	جدول
٨٨.	ل۴-۳- دقت و میانگین همساز در تمامی مدل های آموزش دیده برای زون بندی مخزنی	جدول
٨٩	ل ۴-۴- ماتریس کارایی برای مدلهایی که بهترین عملکرد را در رسته خود داشته اند	جدول
٩٠	ل ۴-۵- مقدار صحت و بازخوانی در پنج روش داده کاوی که بهترین عملکرد را داشته اند	جدول
۱۰۰	ل ۵-۱- مقدار ماکزیمم، مینیمم و میانگین مشخصه های هندسی	جدول
۱۰۳	ل ۵-۲- دقت شبکه های عصبی برای پیش بینی انواع فضاهای خالی	جدول
۱۰۵	ل ۵–۳- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره یک	جدول
1.8	ل ۵-۴- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره دو	جدول
۱۰۷	ل ۵–۵- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره سه	جدول
۱۰۷	ل ۵-۶- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره چهار	جدول
۱۱۱	ل ۵-۷- مقدار تخلخل نوری در نمونه های بررسی شده	جدول
۱۱۱	ل ۵–۸- مقدار هریک از انواع تخلخل در تصاویر انتخاب	جدول
١١٢	ل ۵-۹- مقدار هر نوع فضای خالی بر اساس مدل تفکیک کننده	جدول
۱۱۳	ل ۵-۱۰- مقدار خطای الگوریتم بر حسب نوع مدل تفکیک کننده	جدول
118	ل ۵–۱۱– توصیف کیفی نمونه های استفاده شده برای تست عملکرد الگوریتم	جدول
118	ل ۵-۱۲- مقدار تخلخل مفید، غیرمفید و نسبت تخلخل مفید و غیرمفید	جدول
143	ل ۶-۱- نتایج حاصل از ساختار شبکه ای لایه های بازسازی شده با استفاده از CCSIM	جدول
141	ل ۶-۲- نتایج حاصل از ساختار شبکه ای لایه های بازسازی شده با استفاده از CCSIM	جدول
۱۵۹	ل ۶-۳- اندازه شابلون اسکن کننده و ناحیه همپوشانی برای بازسازی زیرمدل های C1	جدول
180	ل ۶-۴- مقادیر تخمینی تراوایی در سه راستا و زمان بازسازی در مدل های با ابعاد مختلف	جدول
۱۷۵	ل ۶-۵- مقدار تخلخل کل در مدل های سه بعدی بازسازی شده و نتایج آزمایشگاه	جدول
۱۸۲	ل ۶-۶- نتایج حاصل از شبیه سازی حرکت سیال با شبکه بولتزمن در مدلهای دیجیتالی	جدول
198	ل ۸-۱- مقدار پارامترهای ساختار شبکهای فضای متخلخل	جدول

فصل اول

کلیات و مبانی

فصل اول: کلیات و مبانی

۱–۱– مقدمه

پیش از آنکه بهرهبرداری و تولید از یک ذخیره هیدروکربنی شروع شود، بایستی در مرحله اکتشاف مطالعات گستردهای برای شناخت سنگ مخزن انجام شود. این مطالعات منجر به شناخت محل مناسب چاه ها، عمق و بازه دقیق مخزنی که بیشترین بازدهی تولید را دارد و ارزیابی فرآیند تولید هیدروکربن از سنگ مخزن میشود و نهایتاً باعث ایجاد مدلی از مخزن هیدروکربنی میشود که در برنامه تولید، مدیریت مخزن و تغییرات فشار و اشباع سیال در لایههای حاوی هیدروکربن به کمک مهندس نفت میآید. بطور کلی دو نوع مدل استاتیک و دینامیک از مخزن ایجاد میشود. یک مدل مجموعهای از قطعات فرضی بهم پیوسته است که در قطعات جداگانه مشخصههای زمین شناسی و پتروفیزیکی را در خود ذخیره میکند. یک مدل استاتیک در برگیرنده ساختار، هندسه، تخلخل و توزیع اشباع سیالات در لایههای تحت الارضی است و از آن برای محاسبه حجم نفت و گاز برجا استفاده می شود. یک مدل استاتیک مناسب بایستی جزئیات زمین شناسی و پتروفیزیکی را شامل باشد. در طرف مقابل مدل دینامیک برای پیشبینی چگونگی حرکت سیالات استفاده می شود. شبکه های فرضی مدل دینامیک در برگیرنده اطلاعات پتروفیزیکی نظیر تراوایی هستند. از این مدل برای تخمین ذخیره قابل برداشت در برنامههای تولیدی مختلف استفاده می شود. برای رسیدن به بهترین برنامه تولیدی سناریوهای متفاوتی در مدل دینامیک بررسی میشوند و با تغییرات پارامترهای مختلفی مانند تعداد، چگونگی قرارگیری و تکمیل چاهها و مکانیسم تولید، رفتار مخزن و میزان افت فشار در آن در بازههای زمانی مختلف ارزیابی میشود. با توجه به مطالب بیان شده میتوان گفت برای ارزیابی و شناخت دقیق مخزن، دسترسی به مشخصههای پتروفیزیکی سنگ نظیر تخلخل، هندسه فضاهای خالی و تراوایی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در ادامه معرفی اجمالی از ساختار این گزارش، بیان مسئله، اهداف و ضرورت آن آمده است.

¹ Oil and gas in place

۲-۱- سازماندهی گزارش حاضر

در ادامه، سازماندهی پایان نامه حاضر به این نحو است که در فصل اول کلیاتی در بیان مسئله، هدف از انجام این مطالعه، سؤالها، فرضیات، ضرورتها، دادههای مورد نیاز، روش انجام کار و نواوری طرح مطرح می شود. فصل دوم به بررسی و مرور کارهای قبلی انجام شده در ارتباط با موضوع رساله اختصاص داده شد و در انتهای این فصل نیز نقاط قوت و ضعف مطالعات گذشته بیان شده و توضیح داده خواهد شد که مطالعه حاضر چگونه کمبودهای گذشته را پوشش داده و برتری ان نسبت به کارهای قبلی چه خواهد بود. در فصل سوم کلیاتی در مورد روشها و ابزارهای استفاده شده برای انجام مطالعه گنجانده شده است. این مطالب شامل مبانی پردازش تصویر، معرفی اجمالی از انواع مختلف روش های داده کاوی و الگوریتم های بازسازی فضای متخلخل است. در فصل چهارم نحوه پیش بینی تراوایی با استفاده از پردازش و آنالیز تصاویر مقاطع نازک، داده های پتروگرافی و روش داده کاوی به تفصیل امده است و نتایج بدست امده از این روش بحث شده است. فصل پنجم در برگیرنده مراحل و چگونگی طراحی الگوریتمی برای تفکیک انواع مختلف فضاهای خالی موجود در يك مقطع است. اين الكوريتم بر اساس مباني تشخيص الكو طراحي شده است. فصل ششم به تفصيل در مورد بازسازی فضای متخلخل سنگ با استفاده از روش زنجیره مارکو مونته کارلو و الگوریتم تابع همبستگی عرضی^۲ بحث میکند و بعد از بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت بازسازی، بر روی نمونه های سازندهای کنگان و دالان بازسازی انجام گرفته است. در ادامه این فصل با اتخاذ استراتژی تفکیک فضاهای خالی با اندازه مختلف و ایجاد زیرتصویر و زیرمدل، تاثیر اندازه فضاهای خالی و توزیع انها بر تراوایی با شبیه سازی حرکت سیال در مدل های بازسازی شده بررسی شده اند. نهایتا در فصل هفتم نتایج حاصل از این تحقیق، نواوری ها و پیشنهادات برای مطالعات اینده به اختصار اورده شده است. همچنین یک پیوست نیز برای معرفی الگوریتم استخراج کننده پارامترهای ساختار شبکهای فضای خالی در دو بعد در انتهای پایان نامه آمده است.

¹ Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

² Cross Correlation Simulation (CCSIM)

محاسبه خصوصیات مخزنی و پیش بینی وضعیت تولید در بخشهای مختلف مخزن و چاه، وظیفهی مهم مهندس نفت است. با شناخت هر چه بهتر فاکتورهای موثر در تولید، میتوان ارزیابی دقیقتری برای توسعه میدان انجام داد. از آنجایی که سنگ مخازن کربناته ناهمگنی بالایی دارند، از روشهای مختلفی برای محاسبه مقدار کمی این ویژگیها استفاده می شود. در این مطالعه منظور از ناهمگنی تفاوتهای موجود در اندازه و نوع فضاهای خالی در سنگ کربناته است. به دلیل فرآیندهای دیاژنزی گاهی در یک مقطع نازک می توان طیف وسیعی از فضاهای خالی در اندازه و نوع متفاوت مشاهده کرد. در سالهای اخیر مطالعات گستردهای در زمینه آنالیز تصاویر تهیه شده از مقاطع نازک و تاثیر پارامترهای بافتی و هندسی منافذ بر خواص فیزیکی سنگ انجام شده است و نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بکار گرفتن روشهای آنالیز تصویر و تشخیص الگو میتواند کارگشا و حلال مسائلی باشد که تا به امروز راه حل مناسبی نداشتهاند. تخلخل به عنوان مهمترین پارامتر پتروفیزیکی استاتیک و تراوایی به عنوان مهمترین پارامتر پتروفیزیکی دینامیک در سنگ مخازن کربناته مطرح است. آنالیز تصاویر مقاطع نازک سنگ یکی از روشهای جدید، در این زمینه است که بر اساس آن مىتوان الگوريتم هاى جداگانه اى براى پيشبينى تخلخل و تراوايى ارائه كرد. با توجه به تازگى موضوع و کمبودهای متعددی که در مطالعات پیشین وجود دارد، مطالعه حاضر برنامه ریزی شده است تا شاید راه گشایی برای برخی از مشکلات موجود و رفع کمبودهای گذشته باشد. آنالیز تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک از سه جهت قابل استفاده است که هریک مزیتهای ویژهای دارد. اول آنکه می توان با استخراج ویژگیهای پتروگرافی از مقاطع نازک و تطابق آنها با مشخصههای پتروفیزیکی سنگ، مدلی برای تخمین مقدار تخلخل و تراوایی سنگ ایجاد کرد که این مدلها در مناطقی که امکان دسترسی به نمونههای مغزه سنگ و یا آزمایشگاه های خواص سنگ وجود ندارد، پاسخگوی نیاز متخصصین خواهد بود. در واقع می توان از آنالیز تصویر و ویژگیهای پتروگرافی به عنوان ابزاری برای پیشبینی پارامترهای پتروفیزیکی استفاده کرد. در نگاهی دیگر میتوان با تکیه بر روشهای پردازش تصویر و تشخیص الگو، بخشهای مختلف سنگ را بررسی و از هم تفکیک کرد که ارزش این مدلها در مطالعات سنگ شناسی و کیفیت مخزنی سنگ مشخص می شود. مطالعه ساختار شبکهای فضای متخلخل یکی دیگر از کارهایی است که با پردازش و آنالیز تصویر می توان انجام داد. بالاخره می توان از نتایج بدست آمده از آنالیز تصاویر نازک برای بازسازی مدلهای سه بعدی از سنگ استفاده کرد که برای این منظور الگوریتم های مختلفی ارائه شده است (ادهیکاری و فریسول^۱، ۲۰۱۰، حاجی زاده^۲ و همکاران، ۲۰۱۱، ژیانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۳).

۱–۴– اهداف تحقيق

با پیشرفت کامپیوترها و دوربینها امکان مطالعه دقیقتر سنگ بدون صرف نظر کردن از جزییات آنها و یا ساده سازی مسئله فراهم آمده است. مطالعه دقیق مشخصههای میکروسکوپی سنگ کمک می-کند که تفسیر مشخصه های ماکروسکوپی، که در صورت وجود در سطح زمین غالباً با چشم قابل مشاهده و در صورت وجود در زیر زمین با روشهای متدوال ژئوفیزیکی قابل شناسایی هستند، نیز با دقت بهتری انجام شود. به عنوان مثال امروزه مشخص شده که در احتمال بدام افتادن سیالات هیدروکربوری در مخازن چینه ای در مجاورت مخازن ساختمانی که معمولا از نظر اندازه بزرگتر مستند، وجود دارد که صرفا با تکیه به روشهای لرزهنگاری قابل شناسایی نیستند. مطالعه مغزههای حفاری در چاههای اکتشافی با استفاده از روشهای مدرن آنالیز داده و تصویر میتواند به عنوان ابزاری کمکی و تکمیلی در کنار سایر روش های اکتشافی، منجر به ارایه شناخت بهتری از این مخازن شود. البته همواره بدست آوردن اطلاعات اینچنینی مستلزم صرف هزینه، زمان و نیروی انسانی متخصص است که گاهی بدلیل محدودیتهای موجود، امکان آن فراهم نیست. در بیان کلی، هدف این مطالعه،

¹ Adhikari and Friswell

² Hajizadeh

³ Jiang

منظور روش های جدید در حوزه تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپی و پردازش اطلاعات بکار گرفته خواهد شد. در ادامه اهداف مطالعه با جزئیات و تفکیک مراحل انجام کار بیان شدهاند.

هدف اول تحقیق، ارائه مدلی (الگوریتمی) خودکار برای ردهبندی و تفکیک انواع مختلف فضاهای خالی و تفکیک تخلخل مفید و غیرمفید و اندازه گیری مقدار هریک از انواع تخلخل در سنگ مخزن است. برای رسیدن به این هدف، توزیع اندازه و هندسه فضاهای خالی با استفاده از تصاویر گرفته شده از مقاطع نازک مطالعه خواهد شد. اطلاعات بدست آمده در این مرحله می تواند برای تعیین فراوانی و پراکندگی انواع مختلف فضاهای خالی استفاده شود. هرچه تفاوت فضاهای خالی از نظر اندازه و نوع بیشتر باشد سنگ ناهمگنی بالاتری خواهد داشت. همچنین از این اطلاعات برای تفکیک یک تصویر به چند زیرتصویر نیز می توان استفاده نمود؛ بطوریکه هر تصویر یک طیف ویژه و مشخص از فضاهای خالی را نمایش دهد.

هدف دوم ایجاد یک یا چند مدل سه بعدی از سنگ با استفاده از تصاویر مقاطع نازک، اطلاعات بدست آمده از توزیع فضاهای خالی و روشهای بازسازی محیط متخلخل^۱ است. خروجیهای این مرحله یک یا چند مدل سه بعدی از سنگ است که برای شبیهسازی حرکت سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن^۲ استفاده می شود که این منجر به اندازه گیری تراوایی می شود.

برای نیل به اهداف فوق نیاز به انجام موارد ذیل است:

- تهیه بانک اطلاعاتی از تصاویر مقاطع نازک و نتایج آنالیز مغزه از سنگ مخزن میدان پارس جنوبی (سازندهای کنگان و دالان).
- بررسی و ارزیابی روشهای مختلف طبقهبندی داده و معرفی موثر ترین روش با توجه به نیازها
 و خروجی های مطلوب در مطالعه.

¹ Porous media

² Lattice Boltzmann

- طراحی یک الگوریتم تشخیص الگو برای مطالعه انواع مختلف فضاهای خالی سنگ کربناته و پیشبینی مقدار تخلخل مفید و غیر مفید با استفاده از آنالیز تصاویر میکروسکوپی.
 - تهیه و گردآوری اطلاعات مربوط به تصاویر سه بعدی CT اسکن سنگ.
- بازسازی مدل سه بعدی سنگ بر اساس تصاویر مقاطع نازک و مقایسه مدل بازسازی شده با واقعیت با استفاده از روش زنجیره مارکو مونته کارلو و روش شبیه سازی تابع همبستگی عرضی.
- پیاده سازی الگوریتم شبکه بولتزمن و ارزیابی عملکرد آن در لوله و یک فضای متخلخل نیمه پیچیده.
- شبیهسازی حرکت سیال در مدل سه بعدی با استفاده از روش شبکه بولتزمن و تخمین مقدار تراوایی.

۱-۵- فرضیهها و پرسشهای تحقیق

فرضیههایی که انجام این تحقیق به آنها وابسته است به شرح زیر است:

- بانک اطلاعاتی از تصاویر مقاطع نازک از سازندهای کربناته ای که امکان دسترسی به نمونه-های مغزه آنها ممکن باشد، تهیه خواهد شد.
- تصویربرداری از مقاطع در بزرگنمایی بهینه بایستی انجام شود. به نظر میرسد بزرگنمایی ۱۲/۵ برابر مقدار بهینه برای مطالعه فضاهای خالی سنگ باشد.
- مقدار و پراکندگی انواع مختلف فضاهای خالی می تواند باز تاب خوبی از فضای متخلخل سنگ ارائه دهد.
- در صورتیکه تخمین مقدار دقیق تراوایی با استفاده از اطلاعات پترو گرفی ممکن نباشد از روش های داده کاوی و طبقه بندی داده استفاده خواهد شد.
 - می توان شبیه سازی حرکت سیال در فضای متخلخل را با روش شبکه بولتزمن انجام داد.

همچنین مهم ترین پرسشهایی که در شروع راه انجام این تحقیق به ذهن میرسد و بایستی در پایان کار به پاسخ آنها رسیده باشیم به شرح زیر است:

- در طراحی الگوریتم تشخیص فضاهای خالی چه روش قطعه بندی انتخاب شود تا فضاهای
 خالی با دقت بالا از سایر بخشهای سنگ تفکیک شوند؟
- چه پارامترهایی باید از فضاهای خالی استخراج شود تا تفکیک بین انواع مختلف فضاها امکانیذیر باشد؟
- در میان روش های متعدد داده کاوی، کدامیک در شناخت یک رابطه بین ورودی ها و خروجی (که همان نوع فضای خالی است) بهتر عمل می کند؟
- در صورتیکه سنگ ناهمگنی بالایی داشته باشد و چند مدل سه بعدی از سنگ ایجاد شود،
 چگونه نتایج از مطالعه مدلها با هم ترکیب شود تا جواب به واقعیت نزدیک باشد ؟
- از میان روش های مختلفی که برای بازسازی سه بعدی وجود دارد، کدامیک عملکرد بهتری برای مسئله دارد؟
 - چگونه می توان صحت روش بازسازی را کنترل کرد؟
- شبیه سازی حرکت سیال در محیط سه بعدی چه محدودیتها و مزایایی در مقایسه با محیط دو بعدی دارد؟

۱-۶- ضرورت تحقيق

ضرورت انجام مطالعه حاضر از دو منظر قابل بررسی است. در دیدگاه اول ضرورت تحقیق از نگاه یک مهندس نفت مورد بررسی قرار می گیرد و بیان خواهد شد که این تحقیق چگونه گره از مشکلات مطالعات مخزنی باز می کند.

از آنجاییکه مطالعه حاضر می تواند منجر به الگوریتمی خودکار برای مطالعه فضاهای خالی سنگ مخزن شود، از دیدگاه توسعه نرم افزارهای تخصصی قابل بررسی است. در این مطالعه تمرکز ویژهای به پیادهسازی و مطالعه پارامترهای موثر در عملکرد الگوریتمهای بازسازی کننده فضای متخلخل شده است. بررسی مطالعات داخل کشور نشان میدهد توجه ناچیزی به این قبیل مطالعات شده است. توجه بیش از پیش به این روشها با در نظر گرفتن کارایی و دقت نسبی آنها و امکان صرفه جویی در زمان و هزینه مطالعات ضروری به نظر میرسد.

۱-۶-۱ ضرورت تحقیق از دیدگاه مهندسی نفت

مطالعه فضاهای خالی موجود در سنگ وقتی اهمیت پیدا می کند که مقدار تخلخل مفید در سنگ پایین باشد. اگرچه احتمال ایجاد سنگ هایی با تخلخل کم در محیط رسوبی اولیه وجود دارد تغییرات دیاژنزی ثانویه مانند فشردگی و رشد سیمان در فضاهای خالی سنگ باعث تقلیل بیشتر تخلخل می شوند. تقریباً تمام مخازن کربناته و مخازن ماسه سنگی با تخلخل کمتر از ۱۵٪ از این قبیل هستند. در این مخازن عملکرد مخزن تحت تاثیر نوع فضاهای خالی سنگ و ارتباط آنها با یکدیگر است. آنالیز تصاویر یکی از روشهای موثر برای تعیین نوع خلل و فرج ها با دقت بالا در یک محیط متخلخل است (پوسکاس و همکارن، ۲۰۰۱). تعیین نوع خلل و فرج کمک شایانی به محاسبه تخلخل و نوع آن و نهایتاً مطالعه کیفیت مخزنی در هر بخش و پیش بینی نرخ برداشت از چاه میکند. از طرف دیگر محاسبه تخلخل و تراوایی با روشهای آزمایشگاهی معمولا زمانبر، پرهزینه و در صورت کالیبره نبودن دستگاهها کم دقت است. لذا ارائه یک روش کمی و خودکار که توانایی شناسایی و تخمین ویژگیهای پتروفیزیکی سنگ را داشته باشد، کمک شایانی به افزایش دقت و سرعت در محاسبات و مطالعات مخزنی خواهد داشت. علاوه بر این در روشهای آزمایشگاهی سنتی، اطلاعات دقیقی در مورد پراکندگی و شکل هندسی فضاهای خالی موجود در سنگ ارائه نمیشود. لذا لازم است تا با استفاده از روشهای جدید این ضعف نیز بر طرف شود. همچنین نمونه سنگی که در آزمایشگاه استفاده می شود در پایان آزمایش از بین میرود و در مطالعات آتی نمیتوان از آن استفاده کرد که استفاده از روشهای

[\] Puscas

آنالیز تصویر، مدل سازی سه بعدی و تصویر برداری با اشعه ایکس و یا تهیه اسکن سه بعدی از سنگ می تواند منجر به ارائه راهکارهای جایگزین شود.

۱-۶-۲ ضرورت تحقیق از دیدگاه توسعه و بومی سازی نرم افزاری

پیدایش علوم و فنون جدید، جوامع بشری را با مشکلهای مختلفی روبرو نموده است. سطح توسعه یک جامعه را میتوان با مقدار اطلاعات و دانش تولید شده در آن ارزیابی کرد. تولید فزاینده دادهها و اطلاعات به شکلهای مختلف صورت می گیرد و با درجات متفاوتی از پیچیدگی همراه است. در نتیجه نیاز به سیستمهای پردازش اطلاعات بصورت روزافزون افزایش مییابد. برای بیان اهمیت تحقیق حاضر از دیدگاه توسعه و بومیسازی نرمافزاری میتوان به سه نکته اصلی اشاره کرد. نکته اول مربوط به صرفهجویی در هزینه و زمان مطالعات است. چراکه برای تسریع حل مسائل و مشکلات، ناگزیر از بکار گرفتن روشهای نوین هستیم. انتظار میرود مطالعه حاضر بتواند به عنوان مغز و کنترل کننده یک نرمافزار مبتنی بر داده باشد که توانایی ارائه شناخت کاملی از ارزش پتروفیزیکی سنگ مخزن را دارد. با در نظر گرفتن این نکته که رباتهای هوشمند بر اساس یک مدل و برنامه نرمافزاری کار می-کنند میتوان ادعا کرد (در صورت به نتیجه رسیدن این تحقیق) قدمی بنیادی در طراحی رباتهای هوشمند برای استفاده در صنعت نفت نیز برداشته شده است.

نکته دوم را میتوان تلاش برای رقابت و عقب نیفتادن در زمینههای نرمافزاری و کاربردی دانست. تاکنون مطالعات متعددی در کاربرد آنالیز تصویر، شناسایی الگو و مدلسازی سه بعدی سنگ انجام شده است و شرکتهای نفتی دنیا با بکار گرفتن قابلیتهای این علوم، نرمافزارهای متعددی در زمینه بررسی تصاویر میکروسکوپی ارائه دادهاند. در توجیه این موضوع میتوان به نرمافزار پترل^۱ اشاره کرد که به عنوان یکی از کاملترین نرمافزارهای مهندسی نفت در تمام مطالعات مخزنی مورد استفاده می-گیرد ولی تاکنون قابلیتی برای تحلیل و بررسی مقاطع نازک و استخراج اطلاعات از آنها و تخمین مشخصه های دینامیک سنگ مانند تراوایی، برای پترل تعریف نشده است. نکته سوم نشات گرفته از مشکلات و پیچیدگیهایی است که در صنعت نفت با آن مواجه هستیم. با گسترده و پیچیده شدن مطالعات نفتی، نیاز به نرمافزارهای تحلیل گر بیشتر از گذشته احساس می-شود. مطالعه حاضر میتواند قدمی در حل مشکلات جدید در حوزه مطالعات سنگ مخزن باشد. همچنین میتواند به عنوان ابزاری برای تست نتایج آزمایشگاهی و اطمینان از صحت عملکرد آنها استفاده شود.

۱-۷- روش تحقیق و نحوه اجرای آن

به طور کلی مراحل انجام این تحقیق در شش فاز اصلی طبقهبندی شدهاند:

در فاز نخست از روشهای پردازش تصویر برای آمادهسازی تصاویر میکروسکوپی جهت مطالعه و آنالیز استفاده میشود. این مرحله از چند بخش فرعی تشکیل میشود. بخش اول پیش پردازش است که شامل اعمال فیلترهای لازم برای افزایش کیفیت تصویر و به حداقل رسانیدن نوفههای تصویر است؛ چراکه به دلایل گوناگون تصویر گرفته شده از سنگ ممکن است کیفیت پایین یا به عبارت دیگر نوفه داشته باشد. در واقع این فیلترها موجب تسهیل و افزایش دقت مراحل بعدی میشوند. در بخش بعد، تصویر به صورت سیاه و سفید تبدیل خواهد شد. به این کار دو سطحیسازی^۱ گفته میشود. شکل ۱-۱ نمونه ای از یک تصویر بخشبندی شده و تصویر اصلی میکروسکوپی را نمایش میدهد. در مرحلله آخر از تصویر سیاه و سفید (فضاهای خالی به رنگ سیاه و سایر بخش های تصویر سفید است) برای انتخاب و استخراج ویژگیهای مورد نظر استفاده میشود. همچنین مساحت فضاهای خالی بر حسب تعداد پیکسل مشخص میشود و توزیع فضاهای خالی بر اساس اندازه آنها بدست میآید. در این

¹ Binarization



شکل ۱-۱- نمایی از تصویر گرفته شده از مقطع نازک (چپ) و تصویر بخش بندی شده (راست)

لازم به ذکر است که هریک از مراحل فاز اول دارای زیرمجموعههایی هستند که بایستی در زمان انجام کار مدنظر قرار گیرد. مثلا انتخاب بزرگنمایی میکروسکوپ، انواع فیلترهای لازم برای بهبود کیفیت تصویر و شناخت ویژگیهای لازم که از تصویر باینری استخراج میشود، از جمله این زیرمجموعهها خواهد بود. جزئیات مربوط به این شاخصه ها در فصل ۴-۴ آورده شده است. دقت در انجام این فاز بسیار مهم است چراکه خروجی این فاز، ورودی فاز دوم خواهند بود و هرنوع خطا در آن باعث تعمیم آن به نتیجه نهایی خواهد شد. مشخصههای پتروگرافی و سنگشناسی تصویر در زیر میکروسکوپ و با استفاده از نرم افزار Image Pro Plus مطالعه و استخراج خواهند شد و با استفاده از روش های داده کاوی و طبقه بندی داده، مدلی برای ارزیابی و زونبندی مخزن ایجاد خواهد شد.

فاز دوم شامل انتخاب و طراحی روشی برای متناظر ساختن هر یک از الگوهای بدست آمده از مرحله استخراج ویژگی ها، با یکی از کلاس های فضاهای خالی است که از طریق کمینه ساختن فاصلهی بردار ویژگی های هر الگوی ورودی نسبت به یکی از بردارهای مرجع، انجام میگیرد. بردارهای مرجع، بردارهایی هستند که قبلاً از نمونه های آموزشی اخذ شدهاند. در این مطالعه از روش های آماری برای طبقه بندی مشخصه های استخراج شده از تصاویر استفاده میشود. در این روش، مجموعه ای از توابع تحت عنوان توابع تفکیک کننده وظیفه جدا کردن مشخصه های استخراج شده بر اساس کلاس متناظر آنها را بر عهده دارند. هریک از این توابع متشکل از مجموعه ای از وزنها و ضرایب است که بر اساس آنها مقدار عددی هریک از توابع بر اساس مشخصه های استخراج شده محاسبه میشود و سپس تابعی که بیشترین احتمال را به خود اختصاص داده باشد، مشخص کننده کلاس متناظز با بردار ورودی است. برای ایجاد توابع تفکیک کننده و پیادهسازی الگوریتم لازم است از نرم افزارهای برنامه نویسی مانند متلب استفاده شود. تا به اینجا تمامی مشخصههای پتروفیزیکی استاتیک^۱ به جز قطر و طول گلوگاه های ارتباطی اندازه گیری خواهند شد. برای اندازه گیری قطر و طول گلوگاه ها نیز یک الگوریتم طراحی خواهد شد تا بتواند شناخت کمی از توزیع راههای ارتباطی فضاهای خالی ایجاد نماید.

در فاز سوم اطلاعات بدست آمده مربوط به اندازه فضاهای خالی و تصاویر پردازش شده، برای بازسازی مدل سه بعدی سنگ استفاده خواهد شد. از آنجاییکه مطالعه حاضر بر روی سنگهای کربناته انجام می شود و این سنگ ها از نظر زمین شناسی دارای ناهمگنی بالاتری در مقایسه با ماسه سنگها هستند لذا در مرحله بازسازی مدل سه بعدی بایستی این نکته مد نظر قرار گیرد. در صورت وجود ناهمگنی در سنگ، مدل سه بعدی ایستی این نکته مد نظر قرار گیرد. در صورت وجود ناهمگنی در سنگ، مدل هد بازسازی مدل سه بعدی بایستی این نکته مد نظر قرار گیرد. در صورت وجود ناهمگنی در سنگ، مدل سه بعدی ایستی این نکته مد نظر قرار گیرد. در صورت وجود مشخصه هایی که با استفاده از آن پیش بینی شوند، تفاوت زیادی با واقعیت سنگ نخواهد بود و نهایت ازم است تا قبل از مدلسازی سه بعدی، تصویر مقطع نازک همگن شود. برای این کار راهکار ایجاد چند تصویر از یک تصویر مد نظر است. بطوریکه در هر تصویر فضاهای خالی که از نظر اندازه در یک کلاس هستند، قرار می گیرد. در این حالت هر تصویر همگن است و مدل سه بعدی که از آن ساخته چند تصویر از یک تصویر مد نظر است. بطوریکه در هر تصویر فضاهای خالی که از نظر اندازه در یک کلاس هستند، قرار می گیرد. در این حالت هر تصویر همگن است و مدل سه بعدی که از آن ساخته شود نیز به واقعیت نزدیک خواهد بود. در واقع این روش نوعی الگو برداری از روش ماشین کمیته است که شارکی⁷ در توضیح آن می گوید "برای حل یک مسئله سخت و پیچیده لزوما نباید آنرا ساخته مستو مارکی⁷ در توضیح آن می گوید "برای حل یک مسئله سخت و پیچیده لزوما نباید آنرا است که شارکی⁷ در توضیح آن می گوید "برای حل یک مسئله سخت و پیچیده لزوما نباید آنرا است مستقیماً حل کنید، بلکه می توان با شکستن آن به چند مسئله ساده و سپس ترکیب جوابهای آنها.

¹ Static petrophysical properties

² Sharkey

خالی از دو روش زنجیره مارکو مونته کارلو و الگوریتم شبیه سازی همبستگی عرضی استفاده خواهد شد.

در فاز چهارم حرکت سیال در مدل متخلخل سه بعدی با استفاده از الگوریتم شبکه بولتزمن شبیه سازی می شود. در صورتیکه از یک تصویر مقطع نازک چند مدل سه بعدی بازسازی شده باشد، شبیه سازی حرکت سیال در تمامی مدل ها انجام خواهد شد. انتظار می رود برای هر سنگ چندین مدل سه بعدی بازسازی شود و متعاقباً در مرحله شبیه سازی حرکت سیال بایستی چندین شبیه سازی انجام گیرد. در صورتیکه از یک تصویر چند مدل ایجاد شود، در فاز پنجم این مدل ها با هم ترکیب و شبیه سازی حرکت سیال در مدل جامع بدست آمده نیز انجام خواهد شد. نهایتا در فاز ششم مقادیر تراوایی که در مراحل قبلی به دست آمده با مقدار واقعی که در آزمایشگاه اندازه گیری شده، مقایسه و صحت عملکرد هریک از روش ها ارزیابی خواهد شد.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

فصل دوم: پیشینه تحقیق

۲–۱– مقدمه

شناسایی الگو در واقع استخراج ضوابط و قوانین موجود در مجموعهای از دادهها است که بوسیله الگوریتمهای کامپیوتری انجام می شود و می تواند ابزاری برای طبقه بندی داده در ردههای جداگانه باشد. شاید در نگاه اول احساس شود تشخیص چهره افراد مختلف از یکدیگر، فهمیدن کلمات در گفتار، خواندن دستخطهای مختلف، تشخیص شکل اشیا حتی با چشمان بسته، تشخیص سالم بودن یک میوه حتی با بوییدن آنها موضوع ساده است که هر انسانی می تواند انجام دهد. واقعیت اینست که هر یک از این فرآیندها یک پروسه پیچیده تشخیص الگو است که مغز انسان بواسطه آموزشهای گستردهای که در زندگی دیده، آنرا در کسری از ثانیه انجام میدهد. پیچیده بودن این فرآیند تا آنجاییست که گاهی برای شبیهسازی سادهترین توانایی مغز در الگوریتمها و برنامههای کامپیوتری، لازم است سالها متخصصان تلاش کنند تا شاید مدلی طراحی شود که تنها یک توانایی مغز را در واقعيت انجام دهد. شناسايي الكو، روشي علمي است كه هدف آن دستهبندي اشيا به چند كلاس است. بسته به نوع کاربرد، این اشیاء می توانند عکس، سیگنال، یا هر نوع اندازه گیری باشند که به دستهبندی نیاز دارند. با اینکه شناسایی الگو دارای تاریخچهای طولانی است ولی تا قبل از سال ۱۹۶۰، بیشتر در حد پژوهشهای تئوری در علم آمار مطرح بود و مانند بسیاری از علوم دیگر با پیشرفت کامپیوترها این علم نیز پیشرفتهایی داشته است و امروزه از حالت تئوری خارج شده و تلاشها برای کاربردی کردن قابلیتهای این علم است (هولمستروم و کویستینن ، ۲۰۱۰). تشخیص دستخط و اثر انگشت افراد یکی از اولین کاربردهای این علم و طراحی رباتهای فوق پیشرفته از آخرین و جدیدترین دستاوردها است. در هر شاخه از علم متخصصان تلاش کردهاند تا با بهرهگیری از تواناییهای کامپیوترها و الگوریتمهای تشخص الگو، گرهای از مشکلات در ارتباط با آن شاخه علمی را

¹ Holmstrom

² Koistinen

باز کنند. در ادامه تاریخچهای از مطالعات تشخیص الگو، پردازش و آنالیز تصویر مقاطع نازک، روش-های بازسازی فضای متخلخل و الگوریتم شبکه بولتزمن به عنوان ابزاری کارآمد در شبیه سازی حرکت سیال آورده شده است.

۲-۲- نگاهی به مطالعات و تحقیقات مرتبط

اگرچه مدت زمان زیادی از استفاده از روشهای پردازش تصویر، مدلهای هوشمند و تشخیص الگو در علوم مختلف از جمله زمین شناسی نمی گذرد ولی در همین مدت کوتاه نیز کارهای زیادی صورت گرفته است. مطالعات گسترده و وسیعی در زمینه آنالیز تصویر و تفکیک بخشهای مختلف سنگ از هم انجام شده است. اهرلیچ^۱ از جمله پیشگامان در زمینه آنالیز تصویر و ارائه الگوریتمی برای شناخت فضاهای خالی است که تلاشهای گستردهای برای ردهبندی انواع مختلف تخلخل با استفاده از مقاطع نازک انجام داده است. وی و همکارانش (۱۹۹۱) الگوریتمی برای تشخیص فضاهای خالی سنگ ارائه دادند. این الگوریتم بر پایه سیکلهای گسترش و فرسایش فضاهای خالی موجود، تصویر را مورد رشد و سایش قرار میداد. از جمله معایب آن می توان به عدم توانایی در مطالعه یکپارچه فضاهای خالی و جمعبندی آماری اطلاعات اشاره کرد. همچنین این الگوریتم فضاهای خالی را در یک تصویر که حاوی چندین نوع فضای خالی باشد از هم تفکیک نمی کند. نمونههای استفاده شده در مطالعه اهرلیچ بیشتر از ماسهسنگها تهیه شده که پیچیدگی های محاسباتی را تا حدود زیادی کم میکند. یکی دیگر از افرادی که مطالعات ارزشمندی در زمینه آنالیز تصاویر مقاطع نازک انجام داده انسلماتی ٔ است. ایشان و همکارانش در سال ۱۹۹۸ از اولین افرادی بودند که با آنالیز تصاویر مقاطع نازک یک مخزن ماسه سنگی اطلاعات آماری از اندازه و توزیع فضاهای خالی سنگ ارائه دادند.

¹ Ehrlich

² Dilate

³ Erosion

⁴ Anselmetti

ون دنبرگ^۱ و همکارانش (۲۰۰۲)، با آنالیز تصاویر مقاطع نازک، الگوریتمی برای تشخیص دانههای تشکیل دهنده سنگ از سایر بخش های تصویر ارائه کردند و نتایج بدست آمده از این الگوریتم را با نتایج الگوریتم آب پخشان مقایسه نمودند. الگوریتم ارائه شده توسط آنها عملکرد دقیق تری در شناخت دانه های سنگ داشت.

مارمو^۲ و همکارانش (۲۰۰۵) با تکیه بر روشهای پردازش تصویر و شبکه عصبی الگوریتمی بر تشخیص انواع مختلف بافت در سنگهای کربناته ارائه کردند. در این الگوریتم ابتدا تعدادی از ویژگی-های بافتی از هر تصویر استخراج میشود و سپس به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده میشود. این شبکه عصبی توانایی تفکیک چهار نوع بافت، شامل مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون را فراهم میآورد. این مدلها در تسهیل مطالعه محیطهای رسوبی و افزایش سرعت مطالعات کمک می کنند. اسمیت و بیرمن^۳ (۲۰۰۷) مطالعه ای در زمینه تفکیک بلورهای پلاژیوکلاست از سایر بخشهای سنگ

کونچوا^۴ و همکارانش (۲۰۰۸) به ارائه مدلی کاربردی برای طبقه بندی خودکار انواع کروژن از تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح نمونه های کروژنی پرداختند. استفاده از روشهای آنالیز و پردازش تصویر و همچنین مدلهای هوشمند مانند روشهای ماشینبردار پشتیبان و شبکههای عصبی چند لایه از مشخصههای این تحقیق است.

پترنل و کرول^۵ (۲۰۰۹) در مقالهای با عنوان تشخیص الگو خودکار و کمیسازی مبتنی بر هندسه فرکتال با هدف مطالعه توزیع فازهای کانیشناسی در سنگهای آذرین، به بررسی و مطالعه کانیهایی مانند کوارتز، بیوتیت، فلدسپار، پلاژیوکلاز و کانی های اپک^۶ پرداختند و نتایج آنها نشان داد که می-

¹ Van den Berg

² Marmo

³ Smith and Beermann

⁴ Kuncheva

⁵ Peternell and Kruhl

⁶ Opaque
توان با تکیه بر روشهای تشخیص الگو، نرمافزارهای پردازش تصویر و روشهای آنالیز تصویر تفسیر دقیقی از توزیع فازهای مختلف کانیها در مقیاس میکرو تا ماکرو ارائه کرد.

جرام^۱ و همکارانش (۲۰۰۹) را میتوان از توانمندترین افراد در ارائه مدلهای کاربردی برای بازسازی بافت سنگ به صورت سه بعدی دانست. آنها از روش های آنالیز تصویر و توموگرافی اشعه X برای طراحی مدلهای خود استفاده کردند.

بایکان و ایلماز^۲ (۲۰۱۰) با ترکیب روشهای آنالیز تصویر و شبکه عصبی مدلی برای شناخت خودکار پنج نوع کانی در تصاویر مقاطع نازک ارائه دادند. در الگوریتم ارائه شده از ویژگیهای رنگی پیکسلها به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده شده است و با دقت ۹۰ درصد کانیهای کوارتز، مسکویت، بیوتیت، کلریت و اپک از هم تفکیک شدهاند.

اسماعیل زاده^۳ و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از پردازش تصویر و روش مگنتوتلوریک^۴ مدلی برای تفکیک و شناخت دقیق زونهای نمکی در طاقدیس دهنو ارائه دادند و مقایسه نتایج بدست آمده با روشهای ژئوفیزیکی نشان داد که پاسخهای حاصل از آنالیز تصویر قابل قبول بوده است.

دی^۵ و همکارنش (۲۰۱۱) با استفاده از آنالیز تصویر، مشخصههای در اندازه میکرومتر را از سطح مقاطع ضخیم تهیه شده از رسوبات استخراج کردند.

دی بل⁶ و همکارانش (۲۰۱۲) با تکیه بر روشهای آنالیز تصویر پتروگرافیک و روشهای آماری چند متغیره به مطالعه بافتی نمونه های نفتی استخراج شده از ماسهسنگها پرداختند. اساس مطالعه آنها نیز بر مطالعه تصویر گرفته شده از مقاطع نازک است که از سنگهای مخزن تهیه شده است.

قیاسی فریز^۱ و همکاران (۲۰۱۲) در مقالهای نتایج تحقیق خود درباره تفکیک انواع مختلف فضاهای خالی از تصاویر مقاطع نازک با استفاده از آنالیز تصویر و روشهای طبقهبندی داده پرداختهاند.

¹ Jerram

² Baykan and Yilmaz

³ Esmaeil Zadeh

⁴ Magneto telluric

⁵ Dey

⁶ Dee Bell

قیاسی فریز و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله دیگری به پیش بینی تراوایی از آنالیز تصاویر مقاطع نازک با استفاده از ماشین کمیته مبتنی بر سیستمهای هوشمند پرداختند. در این مطالعه یک مدل بهبود یافته براساس مجموعهای از دادههای پتروگرافی، نگارهای متداول چاه و سیستمهای هوشمند برای پیشبینی تراوایی ارائه شد.

ایشیکاوا و گولیک^۲ (۲۰۱۳) مدل تشخیص الگوی هوشمندی ارائه دادند که به کمک آن می توان کانیهای فلزی سنگهای آذرین را بصورت خودکار تشخیص و مقدار آن را در مقاطع تهیه شده از سنگ تشخیص داد.

لای و کروور^۳ (۲۰۱۴) از تصاویر مقاطع نازک و میکرو CT اسکن استفاده کردند تا تاثیر ناهمگنی فضاهای خالی را بر جابجایی سیالات در سنگ مطالعه نمایند.

قیاسی فریز و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل خودکار برای شناخت بافت سنگهای کربناته بر اساس طبقهبندی دانهام ارائه دادند. مدل پیشنهادی با تکیه بر قابلیتهای پردازش و آنالیز تصویر یک سری مشخصههای تصویر که غالباً مربوط به رنگ و شدت روشنایی پیکسلها بوده و چگونگی همسایگی آنها را استخراج میکند و سپس با استفاده از شبکه عصبی ارتباط بین مشخصههای استخراج شده و چهار نوع بافت شامل مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون را شناسایی میکند. تصاویر مقاطع نازک، تهیه شده با دوربین دیجیتال و متصل به میکروسکوپ پتروگرافی نوری، به عنوان ورودیهای مدل به کاربرده شدهاند، درحالی که خروجیها، چهار کلاس طبقهبندی دانهام بوده است. مهمترین بخش هر مدل خودکار، مرحله استخراج ویژگیهاست که تفاوت تصاویر را برای شبکه عصبی بیان میکند. برای آموزش دادن شبکه عصبی، تصاویر ۱۳۸ مقطع نازک استفاده شده است و برای بررسی دقت مدل، تصاویر ۴۴ مقطع نازک به کاربرده شده است. دقت ۱۹/۶ درصد برای نمونههای مشاهده نشده در

^{&#}x27; Ghiasi-Freez

² Ishikawa and Gulick

³ Lai and Krevor

مرحله آموزش شبکه عصبی، اعتبار مدل پیشنهادی برای طبقهبندی بافت سنگهای کربناته را تایید میکند.

بررزیوتا^۱ و همکارانش (۲۰۱۵) از روش آنالیز تصاویر برای مطالعه تغییرات شبکه فضاهای خالی سنگ در سنگ های رسوبی آواری قبل و بعد از تزریق CO₂ استفاده کردند. همچنین سایر اطلاعات پتروگرافی شامل ساختار بافتی و کانی شناسی مقاطع نازک نیز به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی قبل و بعد از تزریق دی اکسیدکربن مورد ارزیابی قرار گرفت. آنها در نتایج تحقیق بیان داشتند که به کمک آنالیز تصویر به خوبی تغییرات فضاهای خالی، اندازه و شکل دانه های تشکیل دهنده سنگ به صورت کمی محاسبه شده و رده بندی کانی ها بخوبی انجام شده است.

هاینس^۲ و نیلسون (۲۰۱۵) از روش آنالیز تصویر برای مطالعه تاثیر بافت سنگهای کربناته بر تخلخل استفاده کردند. آنها در مطالعه شان از تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که تخلخل در نمونه های بررسی شده تحت تاثیر نوع رخساره و ساختار فضای خالی است. همچنین در نمونه هایی که فراوانی بالای ریزتخلخل داشته اند مقدار تخلخل نوری کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است.

ساوزت^۳ و همکارانش (۲۰۱۷) از قابلیتهای آنالیز تصویر برای ارائه الگوریتمی جدید که قابلیت مطالعه کمی فضاهای متخلخل بیولوژیکی و مقدار خاکهای رسی در مقاطع نازک تهیه شده از نمونه های خاک را داشت، استفاده نمودند. در این الگوریتم از ترکیب شاخصه های بافتی و رنگی برای تشخیص خاک های رسی استفاده شده است. آلگوریتم طراحی شده با دقت ۹۶ درصد تخلخل و ۹۲ درصد کانی های رسی را شناسایی نموده است.

¹ Berrezueta

² Haines and Neilson

³ Sauzet

سرکار ^۱ و همکارانش (۲۰۱۸) از الگوریتم آب پخشان^۲ که در قطعه بندی فضاهای خالی کاربرد دارد برای مطالعه سیستم فضاهای خالی، میکرو ساختارها و ارزیابی تخلخل در سنگهای شیلی گندوانا در شرق هند استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که نتایج بدست آمده از روش آنالیز تصاویر اشعه ایکس همخوانی بالایی با نتایج بدست آمده از تزریق جیوه در آزمایشگاه داشته است.

علاوه بر مطالب گفته شده در تعداد زیادی از مطالعات از آنالیز تصویر به عنوان ابزاری برای پیشبینی خواص فیزیکی سنگ استفاده میشود. در این دسته مطالعات دادههای پتروگرافی حاصل از آنالیز تصویر با روشهایی مثل آنالیز رگرسیونی یا هوش مصنوعی (نظیر شبکههای عصبی و منطق فازی) ترکیب میشود.

آنسلمتی^۳ و همکارانش (۱۹۹۸) با آموزش شبکه عصبی با چهار پارامتر پتروگرافی (تخلخل ماکرو، تخلخل میکرو، میانگین ضریب شکل هندسی و میانگین اندازه فضاهای خالی) تاثیر آنها را بر تراوایی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میانگین اندازه فضاهای خالی کمترین تاثیر را بر تراوایی دارد.

علی و چاوس^۴ (۱۹۹۹) با استخراج نوزده ویژگی پتروگرافی و شبکه عصبی مدلی برای پیشبینی تراوایی در سنگ مخزن ارائه کردند و توانستند تراوایی را با دقت ۷۰ درصد پیش بینی کنند. این مطالعه قابلیت دادههای پتروگرافی در پیش بینی تراوایی را نشان دادند.

علاوه بر شناسایی بافتی کربناتها در زمینه شناسایی کانیهای مختلف نیز کارهایی صورت گرفته است. سوسیلواتی⁴ و همکارانش (۲۰۰۲) از روشهای پردازش تصویر برای شناسایی کوارتز، گارنت و بیوتیت در تصاویر میکروسکوپی استفاده کردند. نتایج مطالعه ایشان و همکارانشان روشی مفید را برای جداسازی کانیها بر روی تصاویر دیجیتالی نشان داد.

- ¹ Sarkar
- ² watershed
- ³ Anselmetti
- ⁴ Ali and Chawathe

⁵ Susilowati

شمس نیا (۱۳۸۵) تلاش کرد تا تاثیر هندسه منافذ بر کیفیت مخزنی را در سازندهای کنگان و دالان مورد بررسی قرار دهد. وی با تکیه بر آنالیز تصاویر و آنالیز رگرسیونی رابطهای بین تخلخل مقطع نازک و تخلخل مغزه ایجاد کرد، که ضریب همبستگی بین این دو مقدار پایین تر از حد انتظار بوده است.

نگاهی به مطالعات نشان میدهد که محققین در دو دهه گذشته نگاه ویژهای به استفاده کاربردی از قابلیتهای روشهای پردازش و آنالیز تصویر و سامانههای هوشمند^۱ و روش جمع آوری داده و تشکیل بانکهای اطلاعاتی در بخش های مختلف علوم زمین داشتهاند و در غالب موارد نتایج مطلوبی حاصل شده است. لذا به نظر میرسد آنالیز تصویر جایگاه و ارزش خود در علوم زمین را به اثبات رسانیده و پرداختن و تحقیق بیشتر در این مسیر میتواند منجر به باز شدن پنجرههای جدیدی از ارزشهای این روشها در مطالعات زمین شناسی و بطور ویژه مهندسی نفت و شناخت مخازن نفت شود. همان طور که در بخشهای پیشین اشاره شد در غالب مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده بیشتر تمرکز بر مطالعات زمین شناسی و بطور ویژه مهندسی نفت و شناخت مخازن نفت شود. همان طور سنگ بوده است و بجز در موارد معدود، کمتر به مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده بیشتر سنگ بوده است و بجز در موارد معدود، کمتر به مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده بیشتر سنگ بوده است و بجز در موارد معدود، کمتر به مطالعه مشخصههای پتروفیزیکی سنگ پرداخته شد. است. افزون بر این در مواردی هم که هندسه منافد سنگ مطالعه شده نتیجه گیری مفیدی از نتایج مورت نگرفته است و یافتههای مطالعات به مشخصههای استاتیک مناد تخلخل پرداخته شده است. افزون بر این در مواردی هم که هندسه منافذ سنگ مطالعه شده نتیجه گیری مفیدی از نتایج مورت نگرفته است و یافتههای مطالعات به مشخصههای دینامیک مخزن مانند تراوایی تعمیم داده

مطالعات قبلی فقط تواناییهای آنالیز تصویر برای مطالعه دو بعدی تصاویر مقاطع نازک را بکار گرفته که به نظر میرسد می توان با تلفیق روشهای آنالیز تصویر و الگوریتم های مدلسازی فضای متخلخل از تصاویر مقاطع نازک برای ایجاد مدلهای سه بعدی سنگ نیز استفاده کرد. بازسازی سه بعدی

¹ Intelligent systems

فضای متخلخل سنگ با استفاده از روش های میکرو CT^۱ اسکن در مطالعات متعددی در علوم زمین استفاده شده است (ریورز^۲ و همکاران، ۲۰۰۴؛ ربیرو^۳ و همکاران، ۲۰۰۷؛ رمیسن^۴ و سونن^۵، ۲۰۰۸؛ لشر^۶ و همکاران، ۲۰۰۹؛ جرام^۷ و همکارانش، ۲۰۰۹؛ کنود^۸ و همکاران، ۲۰۱۱).

رمیسن و سونن (۲۰۰۸) به بررسی قابلیتها و محدودیتهای روش CT اسکن در مطالعه سنگهای کربناته پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با کمک این روش میتوان مدلهای کاربردی از سنگ به صورت مجازی ایجاد کرد.

لشر و همکارانش (۲۰۰۹) از روش CT اسکن برای مطالعه شیشههای تهیه شده از سیلیکات منیزیم و همچنین مایعات بسیار سرد استفاده نموده اند. این روش مخاطرات ناشی از بررسی مایعات بسیار سرد را کاهش میدهد و همچنین نمایش دقیقی از ساختار سه بعدی نمونههای تهیه شده از سیلیکات منیزیم ارائه مینماید.

جرام و همکارانش (۲۰۰۹) توزیع اندازه کریستالهای اولیوین را با استفاده از روش CT اسکن بصورت سه بعدی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند.

کنود و همکارانش (۲۰۱۱) از قابلیتهای روش CT اسکن برای ارزیابی سه بعدی ماسه سنگها استفاده نمودند.

کیم^۹ و همکارنش (۲۰۱۷) از آنالیز تصاویر سه بعدی و CT اسکن نمونه های کرومیت – کوبالت برای ارزیابی ساختار فضای متخلخل استفاده کردند.

^a Swennen

¹ Computed microtomography scanning

² Rivers

³ Ribeiro

⁴ Remeysen

⁶ Lesher

⁷ Jerram

⁸ Cnudde

⁹ Kim

ژیانگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۸) با استفاده از روش های پردازش تصاویر CT اسکن برای تفکیک کانی های تشکیل دهنده ذغالسنگ با هدف تخمین تخلخل و تراوایی استفاده نمودند.

استفاده از روش میکرو CT اسکن اگرچه دقت بالایی دارد ولی نیازمند دستگاههای با تکنولوژی بالایی است و هزینههای اولیه تامین و نگهداری دستگاههای اشعه X همواره و در همه جا ممکن نیست. با توجه به محدودیتهای ذکر شده، اساس کار مطالعه حاضر بر تصاویر مقاطع نازک و بازسازی مدل سه بعدی سنگ با استفاده از این تصاویر است که دسترسی به آنها در مقایسه با روش میکرو CT اسکن بسیار آسان تر و ارزانتر است. تاکنون روشهای مختلفی برای بازسازی محیط سه بعدی با استفاده از تصاویر دو بعدی ارائه شده است که می توان به روش جوشی – کوئیبلر – ادلر^۲ (کوئیبلر، ۱۹۸۴)، روش مبتنی بر شبیه سازی تبریدی^۳ (یئونگ و تورکواتو^۴، ۱۹۹۸) روش تک برش گوسی در میدان تصادفی^۵ (روبرت و گاربوزی^۴، ۱۹۹۹)، روش کارهونن – لاو مبتنی بر توزیع (ادهیکاری و فریسول^۲ ممادان (۲۰۱۰)، و روش آنالیز آماری چند نقطه ای^۸ (حاجی زاده^۹ و همکاران، ۲۰۱۱) نام برد. ژیانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۳) روشی ترکیبی برای بازسازی مدل سه بعدی ارائه کردند که از مزایای دو روش گوسی در میدان تصادفی و بهینهسازی ترکیبی استفاده میکند. بعد از بررسی مزایا و محدودیتهای روش های فوق یکی از آنها برای بازسازی سه بعدی سنگ مخزن کربناته انتخاب خواهد شد.

بعد از آنکه مدل سه بعدی سنگ بازسازی شود میتوان مشخصهها و ویژگیهای متعدد استاتیک و دینامیک مربوط به آن را مطالعه نمود. مشخصههای استاتیک مانند بافت، پراکندگی فضاهای خالی، گلوگاههای متصل کننده فضاهای خالی، کرویت و گردشدگی دانههای تشکیل دهنده سنگ با استفاده

⁹ Hajizadeh

¹ Zhiang

² Joshi-Quiblier-Adler (JQA)

³ Simulated annealing based approach

⁴ Yeong and Torquato

⁵ Single cut Gaussian random field

⁶ Roberts and Garboczi

⁷ Adhikari and Friswell

⁸ Multi point statistical analysis

¹⁰ Jiang

از آنالیزهای آماری که بر روی مدل سه بعدی انجام میشود، قابل بررسی هستند. برای مطالعه مشخصههای دینامیک لازم است تا شبیه سازی حرکت سیال در مدل سه بعدی انجام شود. تاکنون روشهای مختلفی برای این منظور معرفی و در مطالعات مختلف استفاده شده است. شبیهسازی دینامیک ملکولی و انتگرالگیری از معادله ناویر – استوکس از جمله اولین روشها میباشند که بترتیب توسط ما^۲ و همکاران (۱۹۹۲) و کوارتاپله^۳ (۱۹۹۳) استفاده شدهاند. این روشها دارای پیچیدگیهای محاسباتی زیادی هستند و استفاده از آنها در محیطهایی که پیچیدگی بالایی دارند، بسیار مشکل خواهد بود و منجر به پاسخ دقیق و درست نمی شود. روش های دیگری در این زمینه مانند شبکه فضای خالی، هیدرودینامیک ذره یکنواخت و شبکه – بولتزمن معرفی شدهاند. روش شبکه فضای متخلخل معمولاً از نظر محاسباتی پیچیدگی بالایی ندارد ولی از آنجاییکه از انالیز اماری فضای خالی استفاده میکند، در حل مسائل نیاز به سادهسازی دارد که باعث می شود جواب های بدست امده با واقعیت فاصله داشته باشد. همچنین پیادهسازی و استفاده از روش هیدرودینامیک ذره یکنواخت نیز در مسائل دارای شرایط مرزی مشکل است و نیازمند محاسبات پیچیده است (تارتاکووسکی^۷ و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از روشهایی که بطور گسترده توسط محققین برای شبیه سازی حرکت سیال در محیط متخلخل استفاده شده، روش شبکه – بولتزمن است (سولیوان^ و همکاران، ۲۰۰۶ ؛ کنگ و همکاران ۲۰۱۰؛ بوئک و ونتورولی^۹ ۲۰۱۰؛ یحیی^{۱۰} و همکاران ۲۰۱۵؛ بودینسکی (و همکاران ۲۰۱۵؛ هوسا^{۲۲} و همکاران ۲۰۱۶؛ لکلایر^{۱۳} و همکاران ۲۰۱۶؛ گنگ^{۱۴} و

- ¹ Navier-Stokes
- ² Ma
- ³ Quartapelle
- ⁴ Pore network
- ⁵ Smooth particle hydrodynamics
- ⁶ Lattice-Boltzmann
- ⁷ Tartakovsky
- ⁸ Sullivan
- 9 Boek and Venturoli
- ¹⁰ Yehya
- ¹¹ Budinski
- ¹² Hosa
- ¹³ Leclaire
- 14 Gong

همکاران، ۲۰۱۷). این روش اولین بار توسط مک نامارا و زانتی^۱ (۱۹۸۸) و با ایده حل معادله بولتزمن با جاگزینی متغیرهای بولین^۲ معرفی شد.

یحیی^۳ و همکارن (۲۰۱۵) شبیه سازی حرکت سیال در محیط متخلخل چند لایه را با استفاده از روش شبکه-بولتزمن انجام دادند. آنها بیان کردند که این روش قابلیت بالایی در شبیه سازی سرعت جریان سیال در فضای ماکروسکوپ سنگ را دارد و در مقایسه با روش های المان محدود عملکرد بهتری داشته است.

بودینسکی^۴ و همکاران (۲۰۱۵) از روش شبکه – بولتزمن برای مدلسازی حرکت آب زیرزمینی استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند این روش در مقایسه با سایر روشهای شبیه سازی که تاکنون معرفی شده برتری دارد چرا که میتوان پیچیدگیهای موجود در روشهای قبلی را ساده سازی و به واقعیت نزدیک کند.

هوسا^ه و همکارانش (۲۰۱۶) از روش شبکه بولتزمن برای شبیهسازی زمان آرامش و سرعت حرکت سیال در محیط متخلخل استفاده کردند و دو مدل برای پیش بینی تخلخل و تراوایی با استفاده از نتایج بدست آمده از زمان آرامش ارائه نمودند.

لکلایر⁹ و همکارانش (۲۰۱۶) برای شبیه سازی رفتار دو سیال غیرامتزاجی در زمان تماس با هم در یک محیط متخلخل از روش شبکه – بولتزمن استفاده کردند و نتایج حاصل از این شبیهسازی را با نتایج روش المان محدود مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج دو روش بهم نزدیک است و لذا می توان از روش شبکه – بولتزمن به عنوان جایگزینی برای روشهای المان محدود استفاده کرد. کنگ⁹ و همکارانش (۲۰۱۷) از روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی انتقال حرارت در یک محیط چندفازی غیرامتزاجی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که IBM می تواند در شبیه سازی

⁴ Budinski

⁶ Leclaire

¹ McNamara and Zanetti

² Boolean

³ Yehya

⁵ Hosa

⁷ Kang

حرکت سیالاتی که به دلیل حرارت دچار تغییر فاز می شوند، نیز کاربرد داشته باشد و پاسخ قابل قبولی ارایه دهد.

مطالعات گذشته نشان میدهد روش شبکه بولتزمن عملکرد دقیقی در حل مسائل شبیه سازی دارد و از نظر محاسباتی نیز پیچیدگیهای روشهای گذشته مانند روش محاسبات محدود را نداشته و در حل مسائل با شرایط مرزی و همچنین فضاهای متخلخل که از نظر خلل و فرج و شکل هندسی پیچیده هستند، نیز عملکرد مناسبی دارد و پیادهسازی آن مشکل نیست؛ لذا در این مطالعه برای شبیهسازی حرکت سیال از روش شبکه بولتزمن استفاده خواهد شد. فصل سوم

مبانی الگوریتمهای داده کاوی و روشهای بازسازی فضای متخلخل

فصل سوم: مبانی الگوریتمهای داده کاوی و روشهای بازسازی فضای متخلخل

۳–۱– مقدمه

در مطالعه حاضر ابزارها و روش های مختلفی برای بررسی، ارزیابی، طبقه بندی بازه های مخزنی و پیش بینی تراوایی بکار گرفته شده است. به طور کلی می توان از دو دیدگاه کلی به این روش ها نگاه کرد و آنها را طبقهبندی نمود. در دیدگاه اول روشهای داده کاوی نقش اصلی را در طبقهبندی بازه مخزنی و تعیین کیفیت مخزنی سنگهای کربناته بازی میکنند و در نگاه دوم روشهای بازسازی سه بعدی سنگ و شبیه سازی حرکت سیال در فضای متخلخل به عنوان پایه و اساس تخمین تراوایی نقش آفرینی داشتهاند. لذا این فصل به دو بخش اصلی تقسیم شده است. در بخش اول معرفی اجمالی از روشها و الگوریتمهای داده کاوی آمده و سپس در بخش دوم به بررسی مبانی و جزییات دو روش بازسازی فضای خالی، به نامهای روش زنجیره مارکو مونته کارلو^۱ و روش شبیه سازی تابع همبستگی^۲ پرداخته شده است.

۲-۳- مبانی الگوریتم های داده کاوی

فرآیند داده کاوی عبارت است از پیادهسازی الگوریتمهای هوشمند و مبتنی بر اصول ریاضیاتی با هدف استخراج الگوها و روابط پنهان در یک مجموعه از دادههایی که شناسایی نظم و ارتباط مشخص در آنها به سادگی ممکن نیست. کاهش تعداد دادههای آموزشی باعث ایجاد عدم قطعیت و خطا در تحلیلها و تصمیمهای الگوریتمها میشود. در مطالعه حاضر از توانایی طیف وسیعی از روشهای طبقهبندی داده، شامل نزدیکترین همسایگی^۳، ماشین بردار پشتیبان^۴، درخت تصمیم گیری^۵، تابع آنالیز تفکیک کننده^۶ و دو الگوریتم ترکیبی به نام های تقویت کننده^۷ و بسته بندی^۸ برای تحلیل

¹ Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

² Cross correlation Simulation (CCSIM)

³ K nearest neighborhoods (KNN)

⁴ Support vector machine (SVM)

⁵ Decision tree (DT)

⁶ Discriminant analysis function (DAF)

⁷ Boosting

⁸ Bagging

اطلاعات مستخرج از تصاویر مقاطع نازک و طبقه بندی کیفی بازه مخزنی کمک گرفته شده است. دو فاکتور اساسی برای انتخاب این تکنیکها مد نظر قرار گرفته است: اول میزان محبوبیت و شهرت آنها در میان محققین و دوم تفاوت در مبانی ریاضیاتی و آماری آنها است. این نگاه کمک می کند تا داده-های موجود از دیدگاههای متفاوت مورد بررسی قرار بگیرد.

۳-۲-۱ تابع آنالیز تفکیک کننده

آنالیز تفکیک کننده یک روش آماری برای استخراج مشخصه، کاهش بعد و کلاسهبندی دادهها است. این روش یک فرآیند تحت نظارت است که با تکیه بر داده های آموزشی یک بردار از داده های ورودی را با یک کلاس خاص از داده های خروجی متناظر می کند و تابعی تحت عنوان تابع تفکیک کننده را آموزش میدهد. هریک از این توابع متشکل از مجموعهای از وزنها و ضرایب است که بر اساس آنها مقدار عددی هریک از توابع را بر اساس مقدار عددی مشخصه های استخراج شده محاسبه میکند و سپس بر اساس تئوری بیز تابعی که بیشترین احتمال را به خود اختصاص داده باشد، مشخص کننده كلاس متناظر با بردار ورودی است. برای ایجاد توابع تفكیككننده و پیاده سازی الگوریتم از نرم افزار متلب استفاده شده است. در این نرم افزار الگوریتمهای مربوط به سه نوع تابع تفکیک کننده خطی، درجه دوم و شبکه عصبی برای استفاده کاربران طراحی شده است. با توجه به پیش فرضهایی که برای مسئله در نظر گرفته شده، توابع خطی و درجه دوم دقت سنجی شده اند. برای این منظور از تابع classify استفاده شده است. در این تابع ابتدا ماتریس آموزش تحت عنوان دو ماتریس sample و training به تابع معرفی میشوند. در ماتریس اول مشخصه های هندسی استخراج شده برای فضاهای خالی در سطر های جداگانه و نوع فضای خالی متناظر با آن در ماتریس training قرار داده می شود. همچنین در بخش دیگری از این تابع می توان نوع تابع (خطی، درجه دوم یا شبکه عصبی) را انتخاب کرد. تابع classify از ماتریس آموزش برای تعیین وزنهای تابع تفکیک کننده استفاده می کند.

۲-۲-۳ درخت تصمیم گیری

درخت تصمیم گیری الگوریتم طبقه کننده داده است که نام آن برگرفته از ساختار درخت مانند آن است. در الگوریتم درخت تصمیم گیری سه نوع گره به نام های گره تصمیم گیری، گره عدم قطعیت و گره برگ تعریف شده است که در ساختار گرافیکی درخت تصمیم گیری به ترتیب با دایره، مربع و مثلث نمایش داده می شوند (شکل۳–۱). فرآیند طبقه بندی داده در یک درخت تصمیم گیری از ریشه شروع می شود و به سمت شاخهها ادامه مییابد و نهایتاً در برگ ها با مشخص شدن کلاس و طبقه مربوط به داده به انتها می رسد. در این الگوریتم شاخه ها نقش ارتباطات بین ورودی و خروجی را ایفا می کنند و قوانین تصمیم گیری در شرایط مختلف بصورت شرطی "اگر آنگاه" تعریف می شوند. در یک درخت تصمیم گیری تمام سناریوهای ممکن از یک مسئله با در نظر گرفتن شرایط شفاف و قابل رویت برای کاربر انجام می شود. جامعیت و شفافیت موجود در یک درخت تصمیم گیری، سادگی محاسباتی و پیاده سازی آسان، این روش را تبدیل به یکی از تکنیک های محبوب داده کاوی کرده است. در مطالعه حاضر سه نوع درخت تصمیم گیری منفرد به نام های ساده، متوسط و پیچیده و دو نوع درخت تصمیم گیری تقویت شده با الگوریتم های می فرد به یکی از تکنیک های محبوب داده به دی کرده است. در مطالعه حاضر سه نوع درخت تصمیم گیری منفرد به نام های ساده، متوسط و بیدی بازه محزنی استاده شده اند.



۳–۲–۳– نزدیک ترین همسایگی

این روش ساده و غیر پارامتریک توسط کاور و هارت^۱ (۱۹۶۷) معرفی شد و با توجه به توانایی هایی که دارد در مطالعه گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. فرمت فعلی الگوریتم نزدیکترین همسایگی ورژن تغییر یافته ای است که توسط آلتمان^۲ (۱۹۹۲) معرفی شده است. در این الگوریتم داده های اولیه بر اساس تعداد کلاس مشخصی و تعداد K تا از نزدیک ترین داده های آموزشی به یک نقطه مبدا، طبقه بندی می شوند. تعداد کلاس ها بوسیله کاربر تعریف می شود. در این روش K تعیین کننده تعداد همسایه های تاثیرگذار بر روی طبقه بندی است. میزان مشابهت بین داده های آموزشی (_ix) و یک نقطه ثابت (x) در فضای داده ها بر اساس یک معیار اندازه گیری مشخص می شود. برای متغیرهای پیوسته از معیار اقلیدوسی^۳ و برای متغیرهای ناپیوسته از معیار همینگ[†] استفاده می شود. داده ها بر اساس میزان نزدیکی به نقطه ثابت رده بندی می شوند. شکل ۳–۲

³ Euclidean

¹ Cover and Hart

² Altman

⁴ Hamming

دایره کوچک پیرامون نقطه ثابت (x) در نظر بگیرید که به تدریج این دایره وسیع تر میشود تا اینکه به نقطه اول (x1) میرسد که در واقع نزدیک ترین نقطه به نقطه x است. با بزرگتر شدن دایره نقطه دوم و سوم نیز وارد دایره میشوند و میزان قرابت نقاط به نقطه ثابت مشخص میشود. نقاطی که در همسایگی نزدیکتری به نقطه X قرار دارند در تصمیمگیری نهایی وزن بیشتری برای حضور در یک کلاس خاص را دریافت خواهند کرد. از روش طبقه بندی KNN به عنوان یک الگوریتم یادگیری تنبل یاد میشود چرا که این روش تمام محاسبات ضروری را در مرحله طبقه بندی انجام میدهد. در این و وزندار² برای طبقه بندی بازه مخزنی مورد استفاده قرار گرفتهاند. تفاوت این الگوریتم ها در تعداد همسایگی ها و معیار محاسبه مسافت است که در فصل چهارم به آن پرداختهایم.



ھمسایگی

- ¹ Fine
- ² Medium
- ³ Coarse
- ⁴ Cosine
- ⁵ Cubic
- ⁶ Weighted

۳-۳-۴- الگوريتم ماشين بردار پشتيبان

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به عنوان یک روش آماری تحت نظارت هوشمند اولین بار توسط کورتس و وپنیک^۱ (۱۹۹۵) برای تشخیص متن ارایه شد. این الگوریتم طی سه مرحله اصلی دادهها را طبقهبندی می کند. در مرحله اول الگوریتم تمام داده های آموزشی را به عنوان نقاطی مستقل در فضا در نظر می گیرد. سپس با استفاده از یک روش انتقال غیرخطی به فضایی با بعدهای بیشتر برده می-شود و در مرحله پایانی کلاسهای مختلف داده با استفاده از صفحات فرضی خطی به نحوی از هم جدا می شوند که مرز مشخص و واضحی بین دادههای مربوط به کلاسهای مختلف وجود داشته باشد. به این صفحات فرضی بردارهای پشتیبان هم گفته می شود. یک بردار پشتیبان با استفاده از رابطه (۳– ۱) قابل تعریف است:

$$H(x) = W^T x_i + b \tag{1-4}$$

در این رابطه W و b بترتیب بردار وزن و بایاس و X_i نزدیک ترین داده های آموزشی به بردار پشتیبان را مشخص می کنند. یک بردار پشتیبان با تغییر در وزن و بایاسها به فرمهای مختلفی قابل تعریف است که از این بین رابطه (۲–۲) انتخاب شده است:

$$\left|W^{T}x_{i}+b\right|=1\tag{(Y-Y)}$$

فاصله (D) بین نقطه X و صفحه فرضی (W, b) با استفاده از رابطه (۳-۳) بدست می آید:

$$D = \frac{|W^{T}x_{i} + b|}{\|W\|} = \frac{1}{\|W\|}$$
(٣-٣)

¹ Cortes and Vapnik

فاصله مرزی^۱ داده های آموزشی بایستی در بیشینه مقدار ممکن باشد و برابر خواهد بود با دو برابر فاصله نزدیکترین دادههای آموزشی که با استفاده از رابطه (۳-۴) بدست میآید:





شکل ۳-۳- نمایش شماتیک از چگونگی جدایش داده های آموزشی و ایجاد بردارهای پشتیبان و فاصله مرزی.

هر کدام از دادههای مرزی در این فضا نمایانگر یک بردار پشتیبان هستند. در ماشین بردار پشتیبان فقط دادههای قرار گرفته در بردار پشتیبان مبنای یادگیری ماشین و ساخت مدل هستند و این الگوریتم به سایر نقاط داده حساس نیست و هدف آن هم یافتن بهترین مرز بین دادههاست به گونه ای که بیشترین فاصله ممکن را از تمام دسته ها (بردار پشتیبان آنها) داشته باشد. همانطور که در شکل ۳-۳ مشخص است، می توان برای جداسازی داده ها از سه خط H₁، 2H و H₁ استفاده کرد. در این بین خط H₃ به هیچ وجه نمی تواند جداکننده مناسبی باشد و در الگوریتم ماشین بردار جایگاهی

¹ Marginal distance

ندارد. خط H₂ شرایط بهتری در مقایسه با خط H₁ برای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان دارد و میزان فاصله مرزی آن در جدایش دادهها بیشتر و نهایتاً خطای آن کمتر است. به طور کلی الگوریتم ماشین بردار یک روش داده کاوی خطی و باینری بوده و با توسعه آن و استفاده از توابع کرنل، به عنوان یک الگوریتم دسته بندی غیرخطی بکار میرود.

۳-۲-۵- الگوریتم های ترکیبی

هریک از روش های ساده طبقه بندی داده دارای نقاط قوت خاص خود است. در عین حال این روش-ها در تعمیم الگوهای استخراج شده از مجموعه محدود داده های آموزش دچار خطاهای محاسباتی می شوند که باعث افت دقت و عملکرد آنها می شود. به طور کلی می توان گفت هیچ روش طبقه بندی ایده آلی بصورت منفرد وجود ندارد و این نوع مسئله و چگونگی توزیع و پراکندگی دادههاست که باعث برتری روشی بر دیگر روشها میشود. به طور مثال اگر توزیع دادهها بصورت نرمال باشد تابع آنالیز تفکیک کننده عملکرد بهتری دارد و در غیر این صورت روشهای ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر کرنل و یا نزدیکترین همسایگی عملکرد بهتری خواهند داشت. ترکیب چند الگوریتم طبقهبندی یکی از راهکارهایی که است که برای بهبود نتایج طبقهبندی دادهها پیشنهاد میشود. به نظر میرسد استفاده از روشهای ترکیبی باعث بهبود تعمیم پذیری الگوهای استخراج شده از دادهها میشود و این مهم در دادههای با پیچیدگی بالا و تعداد کم نمود بهتری دارد. در این مطالعه از دو استراتژی ترکیبی به نام های تقویت کننده و بستهبندی برای بهبود نتایج طبقهبندی بازه مخزنی کربناته استفاده شده است. در هر دو استراتژی مدلهای منفرد طبقهبندی با یکدیگر به منظور ایجاد یک مدل دقیقتر ترکیب می شوند. در یک مدل ترکیبی تعدادی مدل منفرد با یک الگوریتم آموزشی یکسان آموزش داده میشوند و سپس نتایج برای بدست آوردن خروجی دقیقتر ترکیب میشوند. در ادامه جزییات و مبانی مربوط به دو الگوریتم تقویت کننده و بستهبندی توضیح داده شده است.

۳-۲-۵-۱-۱/ستراتژی بسته بندی

روش بسته بندی که با نام اجماع خودکار^۱ نیز از یاد میشود توسط بریمن^۲ (۱۹۹۶) معرفی شد. در این روش یک الگوریتم آموزشی بر روی چندین مجموعه از داده های آموزشی که از نظر آماری خصوصیات مشابهی دارند, اعمال می شود. به طور کلی سه مرحله اصلی برای ایجاد یک الگوریتم بسته بندی طی میشود. در مرحله اول چندین مجموعه داده آموزشی با نمونه برداری تصادفی از داده-های آموزشی اولیه ایجاد میشود. سپس فرآیند یادگیری برای چندین مدل الگوریتم منفرد با استفاده از مجموعه دادههای آموزشی جدید انجام میگیرد. مرحله سوم با میانگینگیری وزنی در مدلهای منفرد انجام میشود. در این مطالعه از استراتژی دستهبندی برای ترکیب عملکرد مجموعهای از مدل-های درخت تصمیم گیری استفاده شده است چراکه با تغییر جزئی در دادههای آموزشی، الگوریتم مرضرد این عدم پایداری میتواند با ایجاد زیرمجموعههای مختلفی از داده های آموزشی اولیه که میرسد این عدم پایداری میتواند با ایجاد زیرمجموعههای مختلفی از داده های آموزشی اولیه که توزیع آماری یکسانی دارند، پوشش داده شود.

۲-۲-۵-۲- استراتژی تقویت کننده

این روش توسط فروند و شپیر^۳ (۱۹۹۷) برای بهبود عملکرد الگوریتمهای داده کاوی منفرد ارائه شد. بر خلاف روش دستهبندی، احتمال حضور مولفههای مختلف در زیرمجموعه دادههای آموزشی ایجاد شده یکسان نیست و به طور مشابه با روش بستهبندی سه مرحله اصلی عنوان شده برای ایجاد این مدل ترکیبی ضروری است. بردارهای ورودی وزندهی میشوند و بر این اساس بعضی از آنها شانس بالاتری برای ایجاد زیرمجموعه های جدید خواهند داشت. دو نوع وزن در استراتژی تقویتکننده تعریف میشوند: اولی برای تنظیم میزان مشارکت داده های ورودی (اB) و دیگری برای ترکیب مدل-

¹ bootstrap aggregation

^r Breiman

^r Freund and Schapire

$$[X_i, Y_i | i=1, 2... n] \qquad (\text{a-r})$$

در این رابطه X_i و X_i بترتیب بیانگربردار ورودی و بردار خروجیهای متناظر با آن است. همچنین n تعداد ردیف های این ماتریس است. احتمال انتخاب تمامی بردار های آموزشی در ابتدای شروع الگوریتم $\frac{1}{n}$ خواهد بود. با شروع الگوریتم تعداد مشخصی از روش های داده کاوی منفرد با زیرمجموعه های از داده های آموزشی اولیه آموزش داده می شوند. سپس دقت هریک از روش ها و شاخص وزنی هریک از آنها با استفاده از روابط (۳–۶) و (۳–۷) محاسبه می شود:

Accuracy_i =
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} B_i I(Y_i = C_j(x_i))}{\sum_{i=1}^{n} B_i}$$
 So that

$$W_{j} = \log(\frac{Accuracy_{i}}{1 - Accuracy_{i}}) \begin{cases} I(false) = 0\\ I(true) = 1 \end{cases}$$
(9-7)

(۷-۳)

$$B_{i} = B_{i}e^{(w_{j}I(Y_{i}\neq C_{j}(x_{i})))} \qquad \text{degree} \qquad \begin{cases} I\left(false\right) = 0 \\ I\left(true\right) = 1 \end{cases} \qquad \begin{cases} i = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, m \end{cases}$$
(A-T)

این کار باعث می شود تا تفاوت کلاس های مختلف موجود در داده های آموزشی وضوح بیشتری برای روش های داده کاوی پیدا کند. به عبارت دیگر بردارهایی که در تکرار نخست به اشتباه طبقه بندی شدهاند نقاط مشکل ساز برای الگوریتم داده کاوی بودهاند که با افزایش احتمال انتخاب آنها در فرآیند آموزش، شرایط برای الگوریتم تسهیل شده است. تعداد تکرار این فرآیند توسط کاربر مشخص می شود و سپس با میانگین گیری وزنی (رابطه ۳–۹) از روش های داده کاوی منفرد، مدل ترکیبی نهایی حاصل می شود.

$$EnsembleM\alpha del = \sum_{i=1}^{m} (w_i \times C_i(x))$$
(9-7)

میزان وزن هریک از روش های داده کاوی منفرد با عملکرد و دقت آن رابطه مستقیم دارد؛ هرچه میزان خطای یک الگوریتم کمتر باشد سهم و تاثیر بیشتری در خروجی نهایی خواهد داشت.

در ادامه به بررسی جزییات و مبانی دو الگوریتم بازسازی کننده فضای خالی شامل الگوریتم همبستگی عرضی و زنجیره مارکو مونته کارلو می پردازیم.

۳-۳- روش های بازسازی فضای خالی

دسترسی به ساختمان سه بعدی سنگ به اندازه گیری مشخصه های استاتیک و دینامیک پتروفیزیکی و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی کمک زیادی می کند. تصویربرداری سه بعدی مانند ریخت شناسی با اشعه ایکس و اسکن لیزری از جمله دقیق ترین روشها برای رسیدن به مدل دیجیتالی از ساختمان سه بعدی سنگ هستند. این روش ها قابلیت ارائه تصاویری در مقیاس میکرو (۱ تا ۵ میکرون) و حتی نانو (ده تا بیست نانومتر) دارند. البته دسترسی به این روشها به دلیل محدودیت های سخت افزاری و هزینه های بالا، همیشه امکانپذیر نیست و در بسیاری از موارد محققین ترجیح دادهاند تا از روشهای با بازسازی فضای خالی برای مطالعه مشخصه های پتروفیزیکی سنگ استفاده کنند. در این روشها با استفاده از مجموعهای اطلاعات و داده های موجود میتوان مدل سه بعدی سنگ را شبیه سازی نمود. در این مطالعه از دو الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو و تابع همبستگی عرضی برای بازسازی مدل دیجیتالی سه بعدی سنگ بر اساس تصاویر مقاطع نازک کمک گرفته شده است که در ادامه مبانی این دو روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

٣-٣-١ الگوريتم زنجيره ماركو مونته كارلو

اولین بار این روش برای بازسازی فضای متخلخل نمونه های خاک با استفاده از تصاویر مقاطع نازک توسط وو^۱ و همکارانش (۲۰۰۶) معرفی شد. در این روش قابلیت های زنجیره مارکو و روش مونته کارلو با یکدیگر به نحوی ترکیب شده اند که یک ماتریس انتقال بصورت زنجیروار شرایط هر مرحله از شبیه سازی را بر مبنای اطلاعات و داده های بدست آمده از مرحله قبل مشخص می کند. در مرحله اول بازسازی سه بعدی، حجم مورد نظر (V_{LMN}) بصورت رابطه ۳-۱۰ تعریف می شود:

$$V_{LMN} = \{ (L, M, N) : 0 < l \le L, 0 < m \le M, 0 < n \le N \}$$
(1 • - \mathfrak{V})

در این رابطه L ه ای M و M بترتیب عبارتند از طول، عرض و ارتفاع مدل سه بعدی که در ادامه مراحل بازسازی آن توضیح داده می شود. مقدار تمامی وکسل های این مکعب نامشخص هستند و مقدار آنها با استفاده از تابع احتمال مشترک^۲ و بر مبنای الگوی واقع در همسایگی هر وکسل که وابسته به موقعیت آن وکسل است، مشخص می شود. تابع احتمال مشترک برای هر وکسل (V_{ijk}) بصورت رابطه -11 تعریف می شود:

$$P(x(V_{ijk})) = \prod_{l=2}^{i} \prod_{m=2}^{j} \prod_{n=2}^{k} cp(x_{lmn} | x_{l-1,m,n}, x_{l,m-1,n}, x_{l,m,n-1})$$
(11-7)

در این رابطه cp مشخص کننده احتمال شرطی برای هر وکسل است که با استفاده از رابطه ۳-۱۲ محاسبه می شود (وو و همکاران، ۲۰۰۶):

(17-37)

¹ Wu

² Joint Probability Function (JPF)

$$cp(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l,m,n) \neq (i,j,k)\}) = cp(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l,m,n) \in N(ijk)\})$$

در این رابطه (N(ijk مشخص کننده الگوی واقع در همسایگی و کسل Vijk است. این پارامتر شعاع تاثیرپذیری هر و کسل از و کسل های واقع در همسایگی خود را مشخص مینماید. برای شروع شبیه سازی یک مدل سه بعدی ابتدا احتمال شرطی برای تمام الگوهای دو، سه، چهار، پنج و شش همسایگی در تصاویر آموزشی اولیه محاسبه میشوند. در مرحله بعد الگوریتم MCMC از اولین و کسل واقع در لایه اول مکعب دیجیتالی فرآیند بازسازی را آغاز می کند. یکی از ایدههای بکار رفته در الگوریتم MCMC برای کاهش زمان بازسازی و محاسبه مقدار دو و کسل مجاور به صورت همزمان است. به عبارت دیگر مقدار و کسل (k,j,i) و و کسل (k,j+1,i) بصورت همزمان محاسبه میشود. است. به عبارت دیگر مقدار و کسل (k,j,i) و و کسل (k,j+1,i) بصورت همزمان محاسبه میشود. مراحل مختلف الگوریتم MCMC برای بازسازی فضای متخلخل در ادامه آمده است. فرآیند بازسازی ها بازسازی می شود. پیش از شروع بازسازی سه تصویر آموزشی به عنوان لایه های اولیه مکعب دیجیتالی در نظر گرفته می شوند و بر اساس نظر کاربر به عنوان لایه اول در راستای XX، YZ و XX فرض می شوند (شکل ۳–۴). به طور کلی دو مرحله اصلی برای بازسازی یک مکعب کامل می توان

مرحله اول: بازسازی لایه اول مکعب با استفاده از احتمال شرطی بدست آمده از صفحه XY

الف) بازسازی ردیف اول به موازات صفحه XY

- مقدار تخلخل تصویر XY به عنوان مقدار احتمال شرطی برای مقداردهی اولین وکسل استفاده می شود.
 - وکسل دوم با استفاده از مقدار احتمال شرطی دو همسایگی مقداردهی می شود.
 - مابقی وکسل ها با استفاده از احتمال شرطی سه همسایگی مقداردهی می شوند.

ب) بازسازی ردیف دوم تا آخرین ردیف از لایه اول به موازات صفحه XY: از این مرحله محاسبه مقدار دو وکسل مجاور به صورت همزمان انجام می شود.

- اولین و دومین وکسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی سه و چهار همسایگی مقداردهی می شوند.
- سومین و چهارمین وکسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی پنج و شش همسایگی مقداردهی می شوند. این فرآیند تا آخرین وکسل ادامه می یابد.

مرحله دوم: بازسازی لایه دوم تا آخرین لایه

الف) بازسازی اولین ردیف از لایه دوم با استفاده از احتمالات شرطی بدست آمده برای صفحه YZ

- اولین ردیف بطور مشابه با دومین ردیف از لایه اول مقداردهی می شود. با این تفاوت که از احتمالات شرطی بدست آمده از صفحه YZ استفاده می شود.

ب) بازسازی دومین ردیف از لایه دوم

- اولین و دومین وکسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی هفت و هشت همسایگی مقداردهی می شوند (رابطه (۳–۲۲) و (۳–۲۳)).
- سومین و چهارمین و کسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی نه و ده همسایگی مقداردهی می شوند (رابطه (۳–۲۴) و (۳–۲۵)). این فرآیند تا مقداردهی تمامی و کسل های ردیف دوم ادامه می یابد.

ج) سومين رديف

- اولین و دومین وکسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی هفت و هشت همسایگی مقداردهی می شوند.

- سومین و چهارمین و کسل بصورت همزمان و با استفاده از احتمال شرطی یازده و دوازده همسایگی مقداردهی می شوند (رابطه (۳–۲۶) و (۳–۲۷)). این فرآیند تا مقداردهی تمامی و کسل های سومین ردیف ادامه می یابد.
 - مرحله (ج) برای شبیه سازی تمامی ردیف های لایه دوم استفاده می شود.

تمامی مراحل فوق الذکر برای لایه دوم، بصورت لایه به لایه در راستای محور z ادامه می یابد تا تمام وکسل های مکعب دیجیتالی مقداردهی شوند. شکل ۳-۴ نمایش شماتیکی از الگوی یازده و دوازده همسایگی را برای دو وکسل همسایه در داخل مکعب دیجیتالی نمایش می دهد.



شکل ۳-۳- نمایش شماتیک یازده و دوازده همسایگی برای دو وکسل مجاور
$$P\left(X_{ijk} | X\left(N_{7}(ijk)\right)\right) = \alpha \begin{cases} P\left(X_{ijk} | X\left(N_{i,3}(ijk)\right)\right) + P\left(X_{ijk} | X\left(N_{j,5}(ijk)\right)\right) \\ + P\left(X_{ijk} | X\left(N_{k,3}(ijk)\right)\right) \end{cases}$$
(۱۳-۳)

$$P\left(X_{ijk}|X(N_{9}(ijk))\right) = \alpha \begin{cases} P\left(X_{ijk}|X\left(N_{i,4}(ijk)\right)\right) + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{j,5}(ijk)\right)\right) \\ + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{k,5}(ijk)\right)\right) \end{cases} \quad (1\Delta-\Gamma) \end{cases}$$

$$P\left(X_{ijk}|X(N_{10}(ijk))\right) = \alpha \begin{cases} P\left(X_{ijk}|X\left(N_{i,6}(ijk)\right)\right) + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{j,4}(ijk)\right)\right) \\ + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{k,6}(ijk)\right)\right) \end{cases} \quad (19-7) \end{cases}$$

$$P\left(X_{ijk}|X(N_{11}(ijk))\right) = \alpha \begin{cases} P\left(X_{ijk}|X\left(N_{i,5}(ijk)\right)\right) + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{j,6}(ijk)\right)\right) \\ + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{k,5}(ijk)\right)\right) \end{cases} \quad (1 \forall -\forall) \end{cases}$$

$$P\left(X_{ijk}|X(N_{12}(ijk))\right) = \alpha \begin{cases} P\left(X_{ijk}|X\left(N_{i,6}(ijk)\right)\right) + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{j,6}(ijk)\right)\right) \\ + P\left(X_{ijk}|X\left(N_{k,5}(ijk)\right)\right) \end{cases} \quad (1 \wedge -7) \end{cases}$$

در این روابط $N_{j,n}$ ، $N_{i,n}$ و $N_{j,n}$ ، $N_{i,n}$ و $N_{j,n}$ ، $N_{i,n}$ ممسایگی بدست آمده از تصاویر آموزشی در راستای YZ ، XY و XZ می باشند. همچنین α که ضریب میانگین گیری است به نحوی بهینه بایستی مقداردهی شود تا تخلخل مکعب دیجیتالی بازسازی شده تقریبا برابر با مقدار میانگین تخلخل در تصاویر آموزشی اولیه باشد. بررسی ها نشان می دهد τ , مقدار منطقی برای این ضریب است و در بعضی موارد که نیاز به تغییر این پارامتر وجود دارد می توان از رابطه) و لوانها و لوانه باشد. برای این پارامتر وجود دارد می توان از رابطه) و $\phi_{digital}$ و $\phi_{image} - \phi_{digitalModel}$

٣-٣-٢ الگوريتم شبيه سازي همبستگي عرضي

علاوه بر روش زنجیره مارکو مونته کارلو، در این مطالعه از الگوریتم همبستگی عرضی نیز برای بازسازی فضای متخلخل سنگ استفاده خواهد شد. در تمام روشهای بازسازی فرض بر اینست اطلاعات اولیه از یک فضای متخلخل بصورت یک تصویر دو بعدی وجود دارد. الگوریتم همبستگی عرضی اولین بار توسط طهماسبی و سهیمی^۱ (۲۰۱۲) برای بازسازی فضای متخلخل با استفاده از یک

¹ Tahmasebi and Sahimi

تصویر مقطع نازک پیشنهاد شد. این الگوریتم با اسکن در یک مسیر شطرنجی بر روی تصویر آموزشی^۱ (TI) و اتخاذ یکسری استراتژیهای موثر برای حفظ ارتباط و توزیع فضاهای خالی سنگ، به شبیه سازی لایه های متوالی یک مدل دیجیتالی می پردازد که با کنار هم قرار گرفتن این لایه ها یک مدل سه بعدی از سنگ ایجاد می شود. در ادامه به بررسی اصول و مبانی این روش می پردازیم.

در شروع الگوریتم یک شبکه محاسباتی^۲ (G) ایجاد میشود که در مطالعه حاضر ابعاد آن با ابعاد تصویر آموزشی برابر در نظر گرفته شده است. این الگوریتم از تابع همبستگی عرضی برای محاسبه میزان تشابه بین دو لایه متوالی در فرآیند شبیه سازی استفاد میکند. سپس الگوریتم یک زیر شابلون^۳مربعی (T) به ابعاد $v_x x_x$ ایجاد میکند که شروع به اسکن کردن تصویر آموزشی در یک مسیر برداری می نماید. بعد از ثبت الگوی هر بخش، شابلون یک قطعه به جلو حرکت میکند. شکل ۳–۵ نمایش شماتیک از یک شابلون به ابعاد $P \times P$ را نشان می دهد. در طی هر مرحله الگوی زیر شابلون نمایش شماتیک از یک شابلون به ابعاد $P \times P$ را نشان می دهد. در طی هر مرحله الگوی زیر شابلون نمایش شماتیک از یک شابلون به ابعاد $P \times P$ را نشان می دهد. در طی هر مرحله الگوی زیر شابلون نمایش شماتیک از می شابلون به ابعاد $P \times P$ را نشان می دهد. در طی هر مرحله الگوی زیر شابلون زیر شابلون

 $u_{\alpha} = u + h_{\alpha}$ (۱۹–۳) در این رابطه h_{α} بردارهایی هستند که وسط شبکه مرکزی شابلون (u) را به هریک از شبکه های اطراف وصل میکند و در واقع معرف موقعیت شبکه u_{α} نسبت به شبکه مرکزی است.

¹ Training image

^r Computational grid

^r Template

\vdash	++	+	u
⊢⊢	╉╋╋	hé	4
┝╌┼╸			
\vdash	11		
\vdash		+	\vdash
	╈	+-	
	++		

شکل ۳-۵- نمایش شماتیک از یک شابلون به ابعاد ۹×۹

اسکن کردن تصویر آموزشی به صورت مدون و منظم یکی از مشخصه های الگوریتم تابع همبستگی است؛ در حالیکه در برخی روش های آماری چند نقطهای از اسکن تصادفی تصویر آموزشی استفاده می شود. شکل ۳-۶ فرآیند اسکن کردن تصویر آموزشی را نشان می دهد.



شکل ۳-۶- نمایش شماتیک از فرآیند اسکن شدن تصویر آموزشی در یک مسیر شطرنجی

ابعاد این شابلون قابل تغییر است و با تغییر آن می توان مدل های متفاوتی بازسازی نمود. هرچه ابعاد شابلون کوچکتر در نظر گرفته شود، زمان محاسبات افزایش می یابد. همچنین در صورتیکه اندازه شابلون بیش از حد کوچک باشد، الگوریتم نمی تواند شناخت مناسب از الگوهای موجود در تصویر آموزشی بدست آورد و بازسازی فضاهای بزرگ برای آن همراه با خطا و اشتباه خواهد بود. به بیان دیگر ابعاد شابلون در ارتباط مستقیم با اندازه فضاهای خالی است. داده های موجود در یک شابلون مشخص در نقطه u تحت عنوان رویداد داده^۱ در نقطه u ((D_T(u)) ذخیره می شوند که بعدا در طی فرآیند بازسازی فراخوانی خواهند شد. شکل ۳–۷ یک مورد رویداد داده بعد از قرار گرفتن شابلون بر روی تصویر آموزشی را نشان می دهد.



شکل ۳-۷- نمایش شماتیک یک رویداد داده در شابلون با ابعاد ۹×۹ بعد از قرار گرفتن بر روی فضاهای خالی

علاوه بر حرکت برداری شابلون، در هر مرحله مقدار همپوشانی^۲ (O) بین مجموعه D_T و الگوی شبیه سازی شده قبلی نیز لحاظ می شود. ابعاد ناحیه همپوشانی $v|\mathbf{x}x|$ است. مقدار x| برابر با x است در حالیکه v| بسیار کوچکتر از v_l فرض می شود. البته در صورتیکه دو شابلون در راستای محور x در همسایگی هم باشند آنگاه v|برابر با v_l و xl بسیار کوچکتر از x_l خواهد بود. مقدار همپوشانی شابلون های همسایگی هم باشند آنگاه v|برابر با v_l و xl بسیار کوچکتر از x_l خواهد بود. مقدار همپوشانی شابلون منابع همسایگی هم باشند آنگاه v|برابر با v_l و v_l بسیار کوچکتر از x_l خواهد بود. مقدار همپوشانی شابلون مای همسایگی هم باشند آنگاه v_l برابر با v_l و v_l بسیار کوچکتر از x_l خواهد بود. مقدار همپوشانی شابلون مونظ ارتباط و پیوستگی فضاهای خالی در مرز دو بلوک مجاور می شود. بنا به موقعیت رویداد داده سه نوع همپوشانی افقی، عمودی و متقاطع قابل تعریف است که در شکل π -۸ بصورت شماتیک نمایش داده شده است. نمایش شماتیک از شبیه سازی یک مدل سه بعدی از سنگ صرفا با تصاویر مقاطع نازک انجام نمی شود. در صورت عدم دسترسی به تصاویر مقاطع نازک می توان از داده های با

¹ Data event

^r Overlap

درجه تفکیک پایین تر مانند مقاطع لرزه ای که دربرگیرنده اطلاعاتی با دقت پایین تری هستند، نیز استفاده نمود.



شکل ۳-۸- نمایش شماتیک از انواع مختلف همپوشانی (الف) افقی، (ب) عمودی و (ج) متقاطع

نکته مهم اینست که الگوریتم تابع همبستگی عرضی صرف نظر از نوع تصویر آموزشی شبیه سازی زمین آماری را شروع و بازسازی را بصورت یکسانی انجام می دهد. علت نام گذاری این روش به همبستگی عرضی اینست که در هر مرحله از بازسازی از تابع همبستگی عرضی برای بررسی میزان مشابهت تصویر آموزشی و لایه شبیه سازی شده استفاده می شود. در این مطالعه از شبیه سازی غیر شرطی مبتنی بر تابع همبستگی عرضی برای بازسازی استفاده شده است که در ادامه جزئیات آن بررسی شده است.

۳-۳-۲-۱ - شبیه سازی غیر شرطی

منظور از شبیه سازی غیرشرطی اینست که در تصویری که شبیه سازی می شود پیکسلی بصورت پیش فرض مقداردهی شده باشد. در صورتیکه بعضی پیکسلها توسط کاربر مقداردهی شده باشند، شبیه سازی از نوع شرطی خواهد بود و به اطلاعاتی که از سمت کاربر به الگوریتم تحمیل می شود، داده سخت^۱ گفته می شود. علت این نامگذاری از آن جهت است که الگوریتم مجاب می شود تا در زمان بازسازی هر قطعه از تصویر با در نظر گرفتن اطلاعات وارد شده برای آن پیکسلها، الگویی را انتخاب کند که علاوه بر تناظر بین مقدار پیکسلهایش با داده های سخت، بیشترین همبستگی و

^{&#}x27; Hard data

مشابهت را نیز با الگوی تصویر آموزشی داشته باشد. لزوما نمی توان گفت کدامیک از روش های شبیه سازی شرطی یا غیرشرطی عملکرد دقیق تری دارند؛ چراکه گاهی تحمیل داده های سخت به مدل باعث ایجاد محدودیت در انتخاب الگو می شود و نهایتاً مدل شبیه سازی شده صرفا در یکسری پیکسلهای تحمیلی قرابت با تصویر آموزشی دارد و در سایر نقاط این تشابه دیده نمی شود.

فرآیند شبیه سازی یک تصویر جدید بر اساس تصویر آموزشی بصورت قطعه ای انجام می شود و اندازه این قطعه ها برابر با اندازه شابلون اسکن کننده خواهد بود. بعد از شبیه سازی هر قطعه، الگوریتم بصورت برداری به قطعه بعدی میرود. مسیر حرکت برداری الگوریتم در شکل ۳-۹ نمایش داده شده است.

	۳۱	14	۱۵	15	
	٩	۱۰	11	۲۱	
۵	۵	۶	v →	٨	
	,	۲	٣	۴	
بازسازى	ے۔ طی فرآیند	سیر حرکتی م	شماتیک از می	∎ کل ۳–۹– نمایش	

قطعه اول تصویر به بصورت تصادفی از میان تمامی الگوهای رویداد داده بدست آمده از تصویر آموزشی انتخاب می شود. سپس الگوریتم با در نظر گرفتن مقدار همپوشانی به قطعه دوم میرود و از میان رویدادهای داده موجود، آن رویدادی که در بخش همپوشانی بیشترین شباهت را با الگوی قبلی داشته باشد، انتخاب می کند. برای اندازه گیری میزان تشابه از رابطه (۳–۲۰) استفاده می شود. در این مطالعه با هدف صرفه جویی در حجم محاسبات و افزایش سرعت الگوریتم، اندازه گیری مقدار تشابه صرفا به ناحیه همپوشانی محدود شده است.

$$C(i,j) = \sum_{x=0}^{l_x-1} \sum_{y=0}^{l_y-1} TI(x+i,y+j) \times D_T(x,y)$$
 (7.-7)

که در این رابطه i و j مشخص کننده بازه تغییرات رویداد داده بر روی شبکه محاسباتی می باشند و مقدار تغییرات آن در بازه $1 - x + 1 > 2 = 0 = 1 - x + 1 > 1 \ge 0$ تعریف می شود. همچنین مقدار IT از تصویر آموزشی و T رویداد داده منتخب برای قرار گرفتن درقطعه در حال بازسازی است. با استفاده از تابع همبستگی، موقعیتی که در آن مقدار (i,j) بیشینه باشد بالاترین تطابق را با تصویر آموزشی خواهد داشت. مقدار C در بازه صغر تا بینهایت میتواند تغییر کند. لذا در این مطالعه بازه تغییرات تعییرات آن در بازه صغر تا بینهایت میتواند تغییر کند. لذا در این مطالعه بازه تغییرات تغییرات مقدار C در بازه صغر تا بینهایت میتواند تغییر کند. لذا در این مطالعه بازه تغییرات داشت. مقدار C در بازه صغر تا بینهایت میتواند تغییر کند. لذا در این مطالعه بازه تغییرات ایک داشت. مقدار C در بازه صغر تا بینهایت میتواند تغییر کند. لذا در این مطالعه بازه تغییرات دغییر میکند و $0=\delta$ به عنوان معیار بررسی میزان تشابه در نظر گرفته شد. مقدار δ در بازه صغر تا یک تغییر میکند و $0=\delta$ به معنوان معیار بررسی میزان تشابه در نظر گرفته شد. مقدار δ در بازه صغر تا یک تغییر میکند و راحة به معنوان معیار بررسی میزان تشابه در نظر گرفته شد. مقدار δ در بازه صغر تا یک تغییر میکند و $0=\delta$ به معنی تشابه کامل بین ناحیه همپوشانی O با بخش متناظر در تصویر آموزشی آمدت و در مقابل هرچه بر مقدار δ افزوده می شود، از میزان تشابه کاسته خواهد شد. مقدار قابل قبول که در این مطالعه $1/\cdot$ در نظر گرفته شد. رابطه استفاده شده در روش MISD بر خلاف روش های معای مرد که از فاصله اقلیدوسی (رابطه (۲–۲)) برای محاسبه میزان شباهت استفاده میکردند، باعث می شود که سرعت محاسبات افزایش یابد؛ چرا که این رابطه پیچیدگی های محاسباتی کمتری در می شود که سرعت محاسبات افزایش یابد؛ چرا که این رابطه پیچیدگی های محاسباتی کمتی مقدار می در در ورش های محاسباتی کمتری در می میزان شباهت استفاده میکردند، باعث می شود که سرعت محاسبات افزایش یابد؛ چرا که این رابطه پیچیدگی های محاسباتی کمتری در روش های آماری چند نقطه ای می باشد. همچنین محاسبه فاصله اقلیدوسی نمیواند نماینگر درستی می موند می ای ماری چند نقطه ای می باشد. همچنین محاسبه فاصله اقلیدوسی نمیواند نماینگر درستی

$$d^{2}(i,j) = \sum_{x=0}^{l_{x}-1} \sum_{y=0}^{l_{y}-1} [TI(x-i,y-j) - D_{T}(x,y)]^{2}$$
 (71-7)

در صورتیکه چندین رویداد داده دارای مقدار ضریب همپوشانی برابر باشند، آنگاه یکی از آنها به تصادف انتخاب می شود. این مهم باعث می شود تا در هر بار شبیه سازی از روی یک تصویر لایه های یکسانی بدست نیاید. فرآیند حرکت برداری تا زمانی که تمام مسیر بردار اول شبیه سازی شود ادامه خواهد یافت و پس از پایان یک ردیف بالاتر می رود (شکل ۳–۹ – قطعه شماره ۵). بعد از شبیه سازی قطعه اول از ردیف دوم الگوریتم وارد فاز پیچیده تری از شبیه سازی می شود؛ چراکه تا این مرحله فقط یک همپوشانی (افقی یا عمودی) را بررسی کرده در حالیکه از قطعه ۶ (شکل ۳-۹) بایستی همپوشانی افقی و عمودی به صورت توامان لحاظ گردد.

هدف از اسکن کردن تصویر آموزشی ثبت روند توزیع یک ساختار از روی آن است و تصویر دوم به نحوی شبیه سازی می شود که حداکثر مشابهت با تصویر اول را داشته باشد و در واقع روند گسترش یک ساختار را دنبال نماید. البته از آنجاییکه الگوهای رویداد داده بصورت تصادفی تولید می شوند، همیشه روند تغییرات ثابت نخواهد بود و طبعا بعد از شبیه سازی چند لایه روند یک لایه دستخوش تغییرات خواهد شد. این تغییرات می تواند با توجه به توزیع آن در تصویر آموزشی در جهت رشد یا حذف آن مشخصه باشد.

۳-۳-۳ رویکردهای متفاوت در شبیه سازی یک مدل سه بعدی

برای ایجاد یک مدل سه بعدی دیجیتالی با استفاده از یک تصویر دو بعدی رویکرد های مختلفی وجود دارد. در یک رویکرد تصویر آموزشی مبنای بازسازی تصاویر متعددی قرار میگیرد و سپس با کنار هم قرار گرفتن این تصاویر یک مدل سه بعدی ایجاد می شود. در این رویکرد فرض می شود که سنگ در راستای محور Z انیزوتروپ است و در واقع مشخصات مدل ساخته شده از منظر پارامترهای استاتیکی تا حدود بسیار زیادی مشابه با تصویر آموزشی است. به این روش، بازسازی تک تصویری گفته می شود. در رویکرد دیگر که در روش MCMC نیز از آن استفاده شده بازسازی بصورت متوالی و بر اساس مرحله قبلی انجام می شود. به بیان دیگر هر لایه بر اساس لایه قبلی بازسازی می شود. به این روش، بازسازی متوالی گفته می شود. به بیان دیگر هر لایه بر اساس لایه قبلی بازسازی می شود. به این روش، مرحله قبلی انجام می شود. به بیان دیگر هر لایه بر اساس لایه قبلی بازسازی می شود. به این روش، ازسازی متوالی گفته می شود. در این مطالعه از روش MCSI با هر دو رویکرد استفاده شده و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شده است. رویکرد سومی هم وجود دارد که در آن بجای یک تصویر آموزشی از چندین تصویر آموزشی استفاده می شود. در این روش بعد از بازسازی چند لایه از تصویر دهد. به این روش، بازسازی سریالی گفته می شود. از معایب این روش نیازمندی به تعداد مختلفی از مقطع نازک است که در بازه های چند میلیمتری از سنگ تهیه شده است. در این مطالعه به دلیل محدودیت دسترسی به مقاطع نازک از این روش استفاده نشده است.
فصل چهارم

پیش بینی تراوایی سنگ مخزن کربناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و روش های داده کاوی هوشمند فصل چهارم: پیش بینی تراوایی سنگ مخزن کربناته با استفاده از آنالیز تصویر مقاطع نازک و روش های داده کاوی هوشمند

۴–۱– مقدمه

ارزیابی سنگ مخزن و شناخت زون های با تخلخل و تراوایی قابل قبول و تحلیل کیفیت مخزنی بازه های مختلف سنگ مخزن از مهم ترین پیش نیازهای تولید و بهره برداری از سیالات هیدروکربوری بدام افتاده در لایه های زیر زمین است. حالات ایده آل یک سنگ مخزن کنار هم قرار گرفتن تخلخل بالا و تراوایی عالی است که البته درصد کمی از سنگ های کربناته مخزنی این ویژگی را دارند و در بسیاری از موارد تولید از سنگ های مخزنی با ناهمگنی بالا به دلیل پایین بودن تراوایی با مشکلات عدیده ای همراه است. ناهمگنی سنگ های کربناته باعث ایجاد عدم همخوانی و تطابق سنگ های مختلف با هم مي شود. به طور مثال امكان وجود چندين سنگ كربناته با تخلخل يكسان و تراوايي متفاوت در یک بازه مخزنی وجود دارد. این مهم باعث می شود تا در تحلیل و ارزیابی بازه های مخزنی کربناته نتوان صرفا با در نظر گرفتن اطلاعات بدست آمده از نگاره های تخلخل مانند نوترون، چگالی و یا صوتی شناخت دقیقی از زون های تراوا بدست آورد. وجود تخلخل های بین دانه ای، بین کریستالی و شکستگی ها موازی با ثبت تراوایی بالا می شوند و در مقابل تخلخل های غیر مفیدی چون قالبی و درون دانه ای تاثیر مثبتی بر گذردهی سیال از سنگ ندارند. علاوه بر نوع تخلخل، فرآیندهای دیاژنزی و تا حدودی مشخصه های بافتی نیز تاثیر گذار بر مقدار تراوایی سنگ هستند. در این مطالعه با بررسی مقاطع نازک و آنالیز تصاویر آنها تمامی این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است و نهایتاً ترکیب این پارامترها با توانایی های روش های داده کاوی منجر به ارائه مدلی جدید و نگاهی نو برای ارزیابی کیفی بازه های مخزنی شده است. برای رسیدن به این هدف پارامترهایی چون مشخصه های پتروگرافی مانند پیچیدگی شکل هندسی و نوع فضاهای خالی موجود در سنگ، نوع بافت دانهام (۱۹۶۲) و توزیع مقدار سیمان در بخش های مختلف سنگ از تصاویر مقاطع نازک استخراج شده اند. ناهمگنی سنگ های کربناته که غالبا از مشخصه های بافتی اولیه و فرآیندهای دیاژنزی ثانویه بوجود می آید باعث شده تا تخمین دقیق مقدار کمی تراوایی آنها کار مشکل و سختی باشد. لذا در این مطالعه بحث طبقه بندی بازه مخزنی و کلاسه بندی زون های تراوا و ناتراوا مطرح شد که نتایج آن می تواند برای تفکیک زونهای مخزنی از غیر مخزنی و پروسه تکمیل چاه و سوراخ کاری لوله جداری مورد استفاده قرار بگیرد. بطور کلی نوآوری این رویکرد را می توان در چهار مورد خلاصه نمود. مورد اول توجه ویژه به شکل هندسی و پیچیدگی فضاهای خالی و تاثیر آنها بر تراوایی سنگهای کربناته است. برای این منظور یک فرمول برای تحلیل مقدار پیچیدگی فضاهای خالی در بازه مخزنی کنگان و دالان ارائه شده است. مورد دوم پتروگرافی کمی سنگ های کربناته با استخراج توزیع انواع مختلف فضاهای خالی و مقدار سیمان در تصاویر مقاطع نازک است. نوآوری سوم استفاده از طیف متفاوتی از الگوریتم های داده کاوی برای طبقه بندی بازه مخزنی است و نهایتاً ارائه و بررسی مزایای دو استراتژی ترکیبی برای بهبود نتایج بدست آمده از الگوریتم های منفرد است. این استراتژی ها با پوشش نقاط ضعف یک الگوریتم با نقاط قوت یک الگوریتم دیگر باعث بهبود فرآیند طبقه بندی بازه مخزنی می شوید.

۴–۲– آماده سازی داده ها

داده های مورد نیاز برای ایجاد مدل های هوشمند طبقه بندی بازه مخزنی کربناته به دو دسته اصلی تقسیم می شوند. دسته اول داده های بدست آمده از تزریق های آزمایشگاهی بر روی پلاگ های مغزه و دسته دوم مقاطع نازک تهیه شده از پلاگ های مغزه است. در مطالعه حاضر از تعداد ۵۶ مقطع نازک اشباع شده با اپوکسی آبی تهیه شده از پلاگ های مغزه دو سازند کنگان و دالان استفاده شده ان نازک اشباع شده با اپوکسی آبی تهیه شده از پلاگ های مغزه دو سازند کنگان و دالان استفاده شده مازی مغزه است. در ادامه با بوکسی آبی تهیه شده از پلاگ های مغزه مغزه دو سازند کنگان و دالان استفاده شده مازی است. در ادامه ابتدا معرفی اجمالی از دو سازند کنگان و دالان ارائه شده و سپس مراحل آماده سازی مقاطع و تصاویر آنها آمده است.

۴-۲-۱ معرفی سازندهای کنگان و دالان

تمرکز مطالعه حاضر بر روی نمونه های گرفته شده از دو سازند کنگان و دالان است. نام سازند کنگان برگرفته از شهر کنگان می باشد. کنگان در نزدیک میدان عظیم گازی کنگان در حاشیه خلیج فارس است. برش نمونه این سازند در چاه شماره یک کوه سیاه واقع در طاقدیسی به همین نام که در جنوب شرقی بوشهر و در شرق تاقدیس و گنبد نمکی خورموج قرار دارد، انتخاب شده است که دارای ضخامت ۱۷۸ متر در برش مقطع و در چاه سطح الارضی کوه سورمه ضخامت این سازند به ۱۷۰ متر میرسد. سازند کنگان متعلق به تریاس زیرین است که مرز پایینی آن با سازند دالان ناپیوستگی دارد. مرز بالایی این سازند با بخش شیلی آغار از سازند دشتک پیوسته و هم شیب است. ضخامت این سازند در چاههای حفاری شده، ۱۵۰ تا ۱۵۵ متر است. از لحاظ مخزنی این سازند به دو بخش ۲۱ و در بالایی این سازند با بخش شیلی آغار از سازند دشتک پیوسته و هم شیب است. ضخامت این بخش ۲۸ متر است. هر کدام از این بخشها خود بر اساس لیتولوژی به چند زیر واحد تقسیم می شوند. بخش ۲۸ که مصادف با قسمت بالایی سازند کنگان است، شامل توالی دولومیت و آهک و لایه های بخش ۲۸ که مصادف با قسمت بالایی سازند کنگان است، شامل توالی دولومیت و آهک و لایه های انیدریتی است برخی لایههای انیدریتی ضخیم در مرز پایینی ۲۱ و در بخش بالایی این واحد توالی لایههای انیدریت و شیل دیده میشود (شیل آغار). واحد X۲ به لحاظ سنگ شناسی غالباً دولومیت و

لایههای انیدریتی (بخشهای بالایی) و آهک (بخشهای پایینی) است (غزبان^۱، ۲۰۰۷).

سازند دالان با لیتولوژی آهک و دولومیت، یکی از بزرگترین مخازن گاز در حوضه خلیج فارس است. نام این سازند از طاقدیسی به همین نام واقع در فاصله تقریبی ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز، انتخاب شده است و چاه شماره یک اکتشافی دالان در همین طاقدیس حفاری شده است. برش نمونه این سازند تحت الارضی است و در چاه اکتشافی شماره یک کوه سیاه بین اعماق ۲۸۶۹ تا ۳۶۱۷ متر قرار دارد و ضخامت آن به ۷۴۸ متر می رسد. قابل دسترسترین برش سطحی این سازند در دامنه شرقی کوه سورمه قرار دارد که ضخامت این سازند در آنجا به ۶۳۸ متر میرسد. این سازند به دو

^{&#}x27; Ghazban

بخش به نام K3 و K4 تقسیم بندی شده است. واحد K3 با ضخامت تقریبی ۱۲۵ متری به سن پرمین بالایی است. واحدهای K4 با ضخامت تقریبی ۱۵۹ متری نیز به سن پرمین بالایی است (غزبان^۱، ۲۰۰۷).

۴-۳- تهیه مقاطع نازک اشباع شده با اپوکسی آبی

اولین قدم در انجام هر تحقیق تعیین داده های مورد نیاز برای انجام کار است. جهت تهیه مقاطع اشباع شده از اپوکسی آبی رنگ، یک سری مراحل باید طی شود. ابتدا باید محلول اپوکسی آبی تهیه شود که ترکیبی از ۳۰۰ میلی گرم پودر اپوکسی و ۹۰ میلی گرم استن است. نمونه های مورد نظر را در داخل پوششی از کاغذ آلومینیوم قرار داده و سپس محلول مورد نظر را به آن اضافه می کنند سطح محلول باید به گونهای باشد که نمونه در آن غرق نشود. آنگاه در طی چند ساعت نمونه ها را درمحفظهای در حالت خلا قرار داده تا اپوکسی درآنها نفوذ کند، به این ترتیب نمونه آغشته به اپوکسی آبی رنگ تهیه میشود. برای تهیه مقاطع نازک نیز شبیه مقاطع معمولی عمل میشود با این تفاوت که از سمباده نرمتری برای سایش نمونه استفاده میشود (شمس نیا، ۱۳۸۵). مزیتی که استفاده از اپوکسی آبی رنگ دارد این است که احتمال کمی می رود که اجزای سنگ به طور طبیعی آبی رنگ باشد و به راحتی میتوان عناصر تخلخل را از سایر اجزای سنگ در مقاطع تشخیص داد (اهرلیچ^۲ و همکارن، ۱۹۹۱).

۴-۴- تهیه تصاویراز مقاطع نازک

از آنجایی که داده های ورودی نرم افزار به صورت تصاویر دیجیتال است، در این مرحله به کمک میکروسکوپ کانی شناسی و دوربین دیجیتال اقدام به عکس برداری از مقاطع نازک شد. میکروسکوپ مورد استفاده ساخت شرکت Ziess است و دوربین به صورت فابریک و کالیبره شده بر روی آن قرار گرفته بود. تصویر برداری از مقاطع به کمک یک کامپیوتر و نرم افزار همراه با میکروسکوپ صورت

^{&#}x27; Ghazban

^r Ehrlich

گرفت و تمامی پارامترهای نرم افزار نیز به صورت پیش فرض مورد استفاده قرار گرفت و دستکاری نشد. در شکل ۴–۱ تجهیزات تصویر برداری از مقاطع نازک شامل میکروسکوپ، دوربین دیجیتال و کامپیوتر قابل مشاهده است. این تجهیزات متعلق به پارک علم و فناوری استان سمنان واقع در شهرستان شاهرود می باشند. بعد از بررسی بزرگنمایی های مختلف مشخص شده که بزرگنمایی ۱۰ برابر مناسب ترین است چراکه هم نمایش دقیقی از بافت سنگ ارائه می دهد و هم استخراج ویژگی های فضاهای خالی با تعمیم پذیری بالایی ممکن خواهد بود. در صورتیکه بزرگنمایی بالا انتخاب شود، تصویر بدست آمده جامعیت کافی نخواهد داشت و بخش کوچکی از مقطع را پوشش خواهد داد که نمی تواند نماینده خوبی از تمام مقطع باشد و در صورتیکه بزرگنمایی پایین انتخاب شود، فضاهای خالی برای الگوریتم تشخیص الگو ممکن نخواهد بود. از هر مقطع نازک بنا به تشخیص کاربر فضاهای خالی برای الگوریتم تشخیص الگو ممکن نخواهد بود. از هر مقطع نازک بنا به تشخیص کاربر مخالهای خالی برای الگوریتم تشخیص الگو ممکن نخواهد بود. از هر مقطع نازک بنا به تشخیص کاربر جهار تا پنج تصویر تهیه شده است. می توان با کنار یکدیگر قرار دادن تصاویر مقاطع نازک تصویر جیهار تا پنج تماویر مقاطع نازک باشد. البته در این مطالعه صرفاً از هر مقطع یک تصویر که نماینده بهتری از تمام مقطع است، انتخاب شده است.



شکل ۴-۱- تجهیزات تصویربرداری از مقاطع نازک شامل میکروسکوپ کانی شناسی مجهز به دوربین و متصل به کامپیوتر

۴-۵- آماده سازی و پیش پردازش تصاویر

پیش از آنکه بتوان فضاهای خالی را مطالعه و آنالیز کرد، بایستی یک سری پیش پردازش ها بر روی تصویر انجام داد. مورد اول جداسازی فضاهای خالی از سایر بخشهای تصویر است که به لطف رنگ آبی، این فضاها از سایر بخش های سنگ به نحوی که در ادامه می آید، قابل تفکیک خواهند بود. در این مطالعه از یک الگوریتم منطقه محور برای تفکیک فضاهای خالی از سایر بخش های سنگ استفاده شده است. تصاویر سازنده تصویر رنگی RGB را تصاویر مولفه های قرمز، سبز و آبی می نامند. در مرحله اول پیاده سازی الگوریتم جداسازی فضاهای خالی، سه مولفه قرمز، سبز و آبی استخراج می-شود. در شکل ۴-۲ تصویر پشته ای قرمز (شکل ۴-۲(ب))، سبز (شکل ۴-۲(ج)) و آبی (شکل ۴-۲(د)) استخراج شده از یک تصویر رنگی نمایش داده شده اند. در مرحله دوم تصویر رنگی به یک تصویر خاکستری تبدیل می شود (شکل ۴–۲(و)). سپس تصویر پشته ای آبی از تصویر خاکستری تفريق مي شود. (شكل ۴–۲(ه)). سپس حد آستانه براي تبديل تصوير تفريقي به يک تصوير باينري محاسبه می شود. این مقدار برای هر تصویر بین ۰ تا ۱ تغییر می کند و برای تصاویر مورد استفاده در این مطالعه مقدار آن توسط الگوریتم و بصورت خودکار و با استفاده از دستور graythresh محاسبه می شود. برای این منظور از روش اتسو ٔ استفاده شده که در آن واریانس بین پیکسل های سفید و سیاه مینیمم می شود (شکل ۴–۲(ر)). مقدار بدست آمده برای حد آستانه در ۲۵۵ ضرب می شود (حد آستانه واقعی). در مرحله آخر تمام پیکسل های تصویر تفریقی که مقدار آنها از حد آستانه واقعی بیشتر باشد را صفر و مابقی پیکسل ها مقدار یک می گیرند. نتیجه نهایی یک تصویر باینری است که در آن تمام فضاهای خالی به رنگ سیاه و مابقی بخش های سنگ به رنگ سفید خواهند بود (شکل ۴-۲ (ز)).



(ادامه دارد)



(ادامه دارد)



شکل ۴-۲- مراحل استخراج فضاهای خالی در یک تصویر باینری از تصویر رنگی. (الف) تصویر RGB، (ب) تصویر پشته ای قرمز، (ج) تصویر پشته ای سبز، (د) تصویر پشته ای آبی، (و) تصویر خاکستری بدست آمده از تصویر رنگی، (ه) تصویر حاصل از تفریق تصویر خاکستری و تصویر پشته ای آبی، (ر) تصویر خروجی الگوریتم اتسو، (ز) تصویر باینری نهایی که فضاهای خالی با رنگ سیاه مشخص شده اند.

۴–۶– زون بندی مخزنی

زون بندی مخزنی یکی از مهم ترین فرآیندهایی است که برای تحلیل و شناخت دقیق تر از مخزن ضروری است. برای این منظور از داده ها و اطلاعات زمین شناسی، چاه نگاری و یا نتایج آنالیز مغزه می توان استفاده کرد. در این مطالعه از نتایج تخلخل و تراوایی پنجاه و شش پلاگ مغزه از سازندهای کنگان و دالان که در آزمایشگاه اندازه گیری شده است، برای تعریف چهار زون استفاده شده است و سپس با تکیه بر داده های پتروگرافی و آنالیز تصاویر مقاطه نازک مدلهای هوشمندی برای شناخت این زون ها در چاه های مجاور استفاده شده است. بدون ایجاد این زون بندی تحلیل و بررسی اطلاعات تخلخل و تراوایی ممکن نیست. شکل ۴–۳ نشان می دهد که ارتباط معناداری بین تخلخل و تراوایی نمونه های سازند کنگان و دالان وجود ندارد که خود موید این مهم است که ناهمگنی در آهک های سازند کنگان و دالان بالاست. برای تعریف چهار زون چهار قانون از جنس قوانین "اگر – آنگاه" که در منطق فازی کاربرد دارند، استفاده شده است:

قانون اول: اگر مقدار تخلخل کم و تراوایی کم باشد آنگاه نمونه متعلق به زون یک است. قانون دوم: اگر مقدار تخلخل زیاد و تراوایی کم باشد آنگاه نمونه متعلق به زون دو است. قانون سوم: اگر مقدار تخلخل زیاد و تراوایی متوسط باشد آنگاه نمونه متعلق به زون سه است. قانون چهارم: اگر مقدار تخلخل زیاد و تراوایی زیاد باشد آنگاه نمونه متعلق به زون چهار است.

ده در رده کم و مقادیر بیشتر در رده زیاد می باشند (شکل ۴–۴(الف)). همچنین مقدار تراوایی کمتر از ده میلی دارسی به عنوان کم، تراوایی بین ده تا صد میلی دارسی به عنوان متوسط و تراوایی بیشتر از صد میلی دارسی به عنوان زیاد در نظر گرفته شده است (شکل ۴–۴(ب)).



شکل ۴-۳- ارتباط بین تخلخل و تراوایی در نمونه های سازندهای کنگان و دالان

[\] Cut-off



شکل ۴-۴- تفکیک مقدار (الف) تخلخل و (ب) تروایی بر اساس حد آستانه تعریف شده در مفاهیم کم، متوسط و زیاد

شکل ۴–۵ کراس پلات تخلخل و تراوایی با در نظر گرفتن زون های تعریف شده برای نمونه ها را نمایش می دهد که چهار زون تعریف شده در نمونه ها را از هم تفکیک میکند. این چهار زون با در نظر گرفتن معیارهای تحلیل مخزنی و استانداردهای جدایش زون های مخزنی تراوا و ناتراوا تعریف شده اند و مشخص است که نمونه هایی که در کلاس چهار قرار می گیرند بالاترین ارزش مخزنی را دارند.



شکل ۴–۵- کراس پلات تخلخل و تراوایی در زون های تعریف شده

جدول ۴-۱ مقادیر تخلخل و تراوایی و زون های متناظر با هر نمونه مغزه را نمایش می دهد.

#	ф (%)	K (mD)	كلاس												
١	۵	۱/۶	١	۱۵	78/4	۱/۴	٢	۲۹	74	۵	٢	۴۳	١٠	١٩	٣
٢	۵	۰/۳۹	١	18	78/3	۰/٣٩	٢	۳۰	74	۵	٢	44	۲۳/۷	۴.	٣
٣	٧	٢	١	۱۷	۱۱/۲۸	٠/١۴	٢	۳١	۱Y/۱	٣/٣	۲	۴۵	22/1	۶۵	٣
۴	۶	۰/۵۵	١	۱۸	11/98	۲/۴۹	٢	٣٢	۳۳/۵	٣/۵	۲	49	۱۵	54	٣
۵	١/٩٨	١	١	۱۹	14/9	۴/۵	٢	٣٣	۱٩/٨۴	۱۱/۵	٣	41	۱۸/۴	۴۸	٣
۶	١/٩٨	١	١	۲۰	۲۲/۸	• ۶	٢	٣۴	۲۱	۱۱/۲	٣	۴۸	۲۳/۲	34.	۴
٧	۴	۰/۷۶	١	۲۱	۲۳/۷	۰/۶۵	٢	۳۵	۱۵/۶۵	11	٣	49	۲۱	۲۱۳	۴
٨	۲	١	١	٢٢	۱۸	۱/٨	٢	۳۶	11	١٠	٣	۵۰	۲۸	۱۸۱	۴
٩	۶	٠/٢	١	۲۳	۱۸/۵۸	٠/١٨	٢	۳۷	14/01	26/18	٣	۵١	۱۹	۱۸۰	۴
١٠	۲	• / ١	١	74	۱۲/۸	۵	٢	۳۸	۲۱/۸۸	۱۵	٣	۵۲	۱۹/۵	۱۵۸	۴
۱۱	۵	٠/۴	١	۲۵	14/1	• ۶	٢	٣٩	۱۴/۸۸	37/13	٣	۵۳	۲۸/۵	۱۰۵	۴
١٢	۱/۵	٢	١	79	۱۷/۲	•/87	٢	۴.	۱۰/۵	۲۰	٣	۵۴	۲۱/۴	۱۲۳	۴
۱۳	٣	٠/٢	١	۲۷	۲۱/۸	٣/٩	٢	41	11	۳۳/۵	٣	۵۵	79/4	۱۵۵	۴
14	۲۹	١	٢	۲۸	۱۵	۲/٨	٢	47	۲۱	۱۵/۵	٣	۵۶	۲۲/۳	147	۴

مغزه	نمونه	ا هر	متناظر ب	های	زون	نراوایی و	و ز	تخلخل	مقادير	-1-4	جدول
------	-------	------	----------	-----	-----	-----------	-----	-------	--------	------	------

۴-۷- آنالیز تصاویر و مطالعه پتروگرافی مقاطع

مقاطع نازک حاوی اطلاعات گستردهای، در مورد سنگ می باشند. این مقاطع در بر گیرنده انواع مختلف کانی ها، مشخص کننده انواع مختلف فضاهای خالی و شکستگیها، انواع مختلف میکرو فسیلها، وضعیت دانه بندی سنگ و غیره هستند. در این بخش به معرفی پارامترهای هندسی استخراج شده از فضاهای خالی پرداخته شده است. همچنین تعریف پیچیدگی هندسی فضاهای خالی، شاخصه پیکسلهای سیمان در تصاویر رنگی و ارتباط بافت دانهام در تراوایی و زون های مخزنی بیان خواهد شد.

۴–۷–۱ – مشخصه های هندسی فضاهای خالی

مشخصه های هندسی به شرح آنچه در فصل بعد آمده، برای تمام فضاهای با اندازه متوسط ($\mu\mu$ مشخصه های هندسی با اندازه بزرگ ^۲ (بزرگتر از $\Lambda + \mu$) استخراج شدهاند و فضاهای با اندازه کوچکتر از $\mu\mu$ ۳۵ (میکرون) مورد بررسی قرار نگرفت چراکه شکل هندسی این فضاها فارغ از نوع آن، بسیار بهم نزدیک و در بسیاری مواقع مشابه هم است. این مقادیر بر اساس مقاله لونوی^۳ (۲۰۰۶) در نظر گرفته شده اند. لذا صرفا مقدار درصد ریزتخلخل ها با شمارش پیکسلهای مربوط به این فضاها محاسبه و برای بررسی تاثیر آنها بر تراوایی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد ریز تخلخل ها ار میکرون مورسی تاثیر آنها به عنوان فضاها به منوان فاکتور موثری برای زون بندی مخزنی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد ریز تخلخل ها محاسبه و برای بررسی تاثیر آنها بر تراوایی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد ریز تخلخل ها معاور موثری برای زون بندی مخزنی استفاده کرد.

با استفاده از مدل هوشمند طراحی شده برای تفکیک انواع مختلف فضاهای خالی که در فصل بعد به تفصیل در مورد آن صحبت خواهد شد، توزیع هریک از فضاهای خالی در تصاویر مقاطع نازک محاسبه شد. مقدار درصد هر نوع فضای خالی (بین دانهای، درون دانهای، قالبی (کامل و ناقص) و حفره ای) با تقسیم توزیع آن بر تخلخل کل فضاهای بزرگتر از ۳۵μ۳ بدست میآید. نهایتاً درصد هر نوع فضای

¹ Mesopore

² Macropore

³ Lonoy

خالی به عنوان ورودی های الگوریتم داده کاوی استفاده خواهند شد. در شکل ۴–۶ حاصلضرب مقدار نوع تخلخل و مقدار تخلخل کل به عنوان یک مشخصه واحد با تراوایی نمایش داده شده است. این شکل ارتباط مستقیم بین انواع تخلخل و تراوایی را نشان می دهد و این بدان مفهوم است که استفاده از مقدار هر نوع فضای خالی باعث بهبود تشخیص زون های مخزنی از غیر مخزنی خواهد شد در حالی که استفاده از تخلخل کل نمی تواند روند مناسبی از تغییرات تراوایی را ایجاد کند. از میان انواع مختلف فضاهای خالی که مورد بررسی قرار گرفت، تخلخل بین دانه ای تنها تخلخل مفید شناسایی شده است و در مقابل تخلخل درون دانه ای، قالبی و حفره تاثیر بسزایی در بهبود تراوایی نداشته اند و شده است و در مقابل تخلخل درون دانه ای، قالبی و حفره تاثیر بسزایی در بهبود تراوایی نداشته اند و مخزنی شود. این مطلب گواه آن است که تخلخل بافتی که در زمان رسوبگذاری شکل می گیرد تاثیر مخزنی شود. این مطلب گواه آن است که تخلخل بافتی که در زمان رسوبگذاری شکل می گیرد تاثیر مثرنی شود. این مطلب گواه آن است که تخلخل بافتی که در زمان رسوبگذاری شکل می گیرد تاثیر مثبت بر تراوایی داشته است. در این مطالعه با در نظر گرفتن پارامترهای دیاژنزی مانند رشد سیمان بافتی نیز در نظر بگیریم. در مواردی که مقدار سیمان در نمونه ها بیشتر از ۲۰ درصد است، با وجود بافتی نیز در نظر بگیریم. در مواردی که مقدار سیمان در نمونه ها بیشتر از ۲۰ درصد است، با وجود تخلخل بین دانه ای بالا ولی تراوایی قابل ملاحظه ای مشاهده نشد.



(ادامه دارد)





$$PoreComplexity = (\frac{7}{22.14} \times roundness) + (\frac{3}{7.65} \times elongation)$$
(1-4)

در این رابطه $\frac{7}{22.14}$ و $\frac{5}{7.65}$ ضرایب ثابتی هستند که برای هر سنگ مخزن مقدار منحصر بفردی خواهد بود و به شرحی که در ادامه آمده، محاسبه می شوند. جهت آشنایی با مفهوم گردشدگی و کشیدگی به فصل پنج مراجعه شود. مقدار گردشدگی و کشیدگی برای هر تصویر برابر با میانگین

^v Tonietto

گردشدگی و کشیدگی فضاهای متوسط و بزرگ آن تصویر در نظر گرفته شده است. بیشترین مقدار گردشدگی در تصاویر بررسی شده ۲۲/۱۴ و بیشترین مقدار کشیدگی ۷/۶۵ است. همچنین اعداد ۷ و ۳ نیز بترتیب مشخص کننده ضریب تاثیر گردشدگی و کشیدگی در پیچیدگی هندسه فضاهای خالی می باشند. مقدار پیچیدگی هندسی فضاهای خالی بین ۱ تا ۱۰ متغیر است که ۱ برای یک فضا با شکل ساده مانند دایره و ۱۰ برای فضای با شکل هندسی پیچیده است. شکل ۴–۷ چهار نمونه از فضاهای خالی با پیچیدگی هندسی متفاوت را نشان می دهد. مقدار پیچیدگی هندسی هریک از این فضاها با رنگ زرد در کنار آنها مشخص شده است. جدول ۴–۲ مقدار پیچیدگی هندسی در تصاویر مقاطع نازک بررسی شده را نمایش می دهد.



شکل ۴-۷- تفاوت در پیچیدگی هندسی فضاهای خالی.

#	پیچیدگی	كلاس									
	هندسی			هندسی			هندسی			هندسی	
١	١	١	۱۵	١/٧۵	٢	۲۹	۱/۸	٢	47	4/7	٣
٢	١	١	18	١/٢	٢	۳۰	۲/۴	٢	44	۴/٨	٣
٣	١/۵	١	۱۷	١/٢	٢	۳١	٢	٢	40	۲/۳	٣
۴	١	١	۱۸	١/۵	٢	٣٢	۱/٣	٢	49	۴/۳	٣
۵	١	١	۱۹	١/٧	٢	٣٣	۴/۲	٣	41	۴	٣
۶	١	١	۲۰	٢	٢	34	٧	٣	۴۸	٣/۵	۴
۷	١/٨	١	۲۱	٢	٢	۳۵	۲/٨	٣	49	٣/۵	۴
٨	١/٩	١	77	۲/۲	٢	۳۶	٢	٣	۵۰	٣/۴	۴
٩	١	١	۲۳	۴	٢	۳۷	۲/۵	٣	۵١	٣/۴	۴
۱۰	١	١	74	۲/۵	٢	۳۸	٣/٧	٣	۵۲	۴	۴
۱۱	١	١	۲۵	۲/۵	٢	٣٩	۲/۴	٣	۵۳	٣/٧	۴
١٢	۲/۲	١	79	١/٨	٢	۴.	۲/۲	٣	54	٣/٣	۴
١٣	١/٧	١	۲۷	١/٩	٢	41	۴/۳	٣	۵۵	٣/۶	۴
14	۱/۸	٢	۲۸	٢	۲	47	4/8	٣	۵۶	٣/٧	۴

جدول ۴-۲- مقدار میانگین پیچیدگی هندسی در تصاویر مقاطع نازک بررسی شده

۴–۷–۳ توزیع سیمان

رشد سیمان در بافت سنگ کربناته تاثیر منفی در میزان گذردهی سیال از ان دارد. بررسی مقاطع نازک سازندهای کنگان و دالان نشان می دهد که سیمان انیدریتی و کلسیتی دو نوع غالب سیمان در این دو سازند کربناته می باشند. این دو نوع سیمان در سنگ کربناته و زیر نور پلاریزان با رنگ سفید از بافت سنگ متمایز می شوند. برای اندازه گیری فراوانی سیمان در تصاویر از روش شمارش پیکسلی در تصاویر خاکستری استفاده شده است. برای این منظور با روش سعی و خطا یک مقدار حد آستانه برای شدت نور پیکسلهای سیمان محاسبه شد که نتایج نشان می دهد که پیکسل های با شدت روشنایی بیشتر از ۱۶۵ مشخص کننده سیمان هستند. هیستوگرام شدت نور برای پیکسلهای یک تصویر در شکل ۴–۸ نمایش داده شده اند. ناحیه ای که با رنگ خاکستری مشخص شده مربوط به پیکسلهای سیمانی است. در شکل ۴–۹ تصاویر مقاطع نازک که رشد گسترده سیمان در آنها اتفاق دهد علی غم وجود تخلخل مناسب ولی رشد گسترده سیمان باعث از بین رفتن گلوگاه های ارتباطی احتمالی بین فضاهای خالی شده است.



شکل ۴–۹(الف) رشد سیمان را در بافت و فضاهای قالبی سنگ نشان می دهد. تخلخل و تراوایی اندازه گیری شده برای این نمونه در آزمایشگاه بترتیب ۸/۷ درصد و ۶/۰ میلی دارسی است. شکل ۴–۹(ب) رشد سیمان در بافت و فضای داخل دانهها نشان می دهد. وجود فضاهای ایزوله و رشد گسترده سیمان در بافت سنگ باعث شده تا علارغم تخلخل ۱۴/۱ درصدی ولی تراوایی آن کمتر از ۲ میلی دارسی باشد که از نظر مخزنی آن را بی ارزش می کند. شکل ۴–۹(ج) نمونه بارزی از تاثیر منفی رشد سیمان بر تراوایی است. در این نمونه رشد اصلی سیمان در فضاهای بین دانهای حادث شده است و باعث شده با وجود تخلخل بسیار بالای ۲۲/۸ درصدی ولی تراوایی آن کمتر از ۲ میلی دارسی



شکل ۴–۹– تصاویر مقاطع نازک سه نمونه از سازندهای کنگان و دالان با رشد گسترده سیمان. (الف) رشد سیمان در زمینه و فضاهای قالبی، (ب) رشد سیمان در زمینه و دانه های سنگ و (ج) رشد سیمان در فضاهای بین دانه ای سنگ و پر شدن ارتباط بین آنها

۴-۷-۴ بافت کربناته

یکی از مهم ترین و پرکاربرد ترین روش های مطالعه بافتی نمونه های کربناته طبقه بندی دانهام^۱ است که چهار نوع اصلی مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون برای بافت سنگ در آن تعریف می شود. شکل ۴–۹ تغییرات تراوایی را در بافت های مختلف نشان می دهد. بر اساس این شکل تقریبا

[\] Dunham

تمام نمونه هایی که در زون یک قراردارند دارای بافت مادستونی بوده اند. این روند نشان می دهد که وجود رخساره مادستونی نمی تواند ایجاد زون مناسبی از نظر مخزنی در سازندهای کنگان و دالان کند که در توجیه آن نیز می توان به نبود تخلخل مناسب در این رخساره اشاره کرد. معمولا ریزتخلخلها، نوع غالب فضاهای خالی در یک رخساره مادستونی هستند که به دلیل ارتباط ضعیف آنها نمیتوانند تراوایی مناسبی را ایجاد کنند. در مقاطع بررسی شده تنها یک نمونه مربوط به زون یک دارای رخساره گرینستونی است. در ادامه بررسی بیشتری بر روی آن انجام شده است (شکل ۴-۱۰ (الف)). نکته دیگری که از نمودار قابل استخراج است، بافت گرینستونی تمام نمونه های زون چهار است. البته از آنجایی که نمونه هایی از زون دو و سه هم دارای بافت گرینستونی بوده اند، نمی توان صرفا وجود بافت گرینستونی را ملاکی برای شناسایی زونهای تراوا تشخیص داد و به نوعی بافت گرینستونی فقط شرط لازم قضیه است.



شکل ۴-۱۰- توزیع اندازه بافت دانهام در زون های تعریف شده برای سازندهای کنگان و دالان

شکل ۴–۱۱ تصاویر مقاطع نازک چهار نمونه از سازندهای کنگان و دالان را که دارای بافت گرینستونی بوده اند، نشان می دهد. یک رخساره گرینستونی می تواند زون مخزنی خوبی باشد البته در صورتیکه شاخصه های پتروفیزیکی آن در اثر فرایندهای دیاژنزی از بین نرفته باشد. شکل ۴-

۱۱(الف) یک بافت گرینستونی است که به دلیل رشد گسترده سیمان در فضاهای بین دانه ای آن، نه تنها فضاهای خالی آن با سیمان پر شده (تخلخل کمتر از ۲ درصد) بلکه تراوایی آن نیز از بین رفته و به کمتر از ۱ میلی دارسی رسیده است. شمارش پیکسلی این تصویر نشان می دهد که ۳۷٪ از سطح تصویر مربوط به سیمان است که مقدار قابل ملاحظه سیمان را نشان میدهد. این نمونه متعلق به زون یک است. شکل ۴-۱۱(ب) نمونه دیگری با بافت گرینستونی متعلق به زون دو را نشان می دهد که تخلخل قالبی نیز در آن گسترده است و تخلخل آن ۲۶/۴ درصد است. همچنین ۲۵٪ از سطح تصویر مربوط به پیکسل های سیمانی است که باعث از بین رفتن بخشی از ریزتخلخل های احتمالی در بافت سنگ شده است. به دلیل ارتباط ضعیف فضاها با یکدیگر و میزان بالای رشد سیمان تراوایی اندازه گیری شده برای این نمونه کمتر از ۰/۵ میلی دارسی بوده است. شکل ۴-۱۱(ج) نمونه گرینستونی متعلق به زون سه را نشان می دهد که غالب تخلخل آن درون دانه ای و بین دانه ای است. همچنین کمتر از ۱۰٪ رشد سیمان در تصویر به ثبت رسیده است. وجود تخلخل بین دانه ای و فراوانی کم سیمان باعث شده تا تراوایی این نمونه ۱۷ میلی دارسی باشد. شکل ۴–۱۱(د) یک بافت گرینستونی با شرایط ایده آل برای تبدیل شدن به یک زون تراوا را دارد. رشد سیمان در گلوگاه های ارتباطی بین فضاهای بین دانه ای بسیار ناچیز است و فراوانی بالای تخلخل بین دانه ای (۲۲/۵ درصد) باعث شده تا نمونه متناظر با این تصویر تراوایی بیش از ۲۰۰ میلی دارسی را نشان دهد. بررسی آماری مقاطع نازک نشان می دهد که کمتر از ۲٪ کل نمونه ها و کمتر از ۸٪ از نمونه های کلاس ۱ وضعیت مشابه شکل ۴-۱۰(الف) را دارند و به همین دلیل این حالت یک استثنا در نظر گرفته شده است. همچنین حدود ۲۵٪ از کل نمونه ها ۶۸٪ از نمونه های کلاس ۲ حالتی مشابه با آنچه برای شکل ۴-۱۰(ب) بیان شد را نشان می دهند. حدود ۵٪ از کل نمونه ها و ۲۰٪ از نمونه های کلاس ۳ وضعیتی مشابه با آنچه برای شکل ۴–۱۰(ج) گفته شد را دارند. نهایتاً ۱۶٪ از کل نمونه ها و ۱۰۰٪ نمونه های کلاس ۴ وضعیتی مشابه با شکل ۴-۱۰(د) دارند. در شکل ۴–۱۲ نمونه های بررسی شده بر اساس نوع بافت در هریک از کلاس های مخزنی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، چهار نمونه از کلاس ۲ دارای بافت مادستونی هستند که با توجه به تعریف کلاس دو، بایستی تخلخل بالایی داشته باشند. بررسی تصاویر این نمونه ها نشان می-دهد تخلخل غالب در این نمونه ها از نوع حفره ای است که ارتباطی بین فضاهای انحلالی آن ایجاد نشده است و لذا در عین وجود تخلخل بالا ولی تراوایی پایین بوده است. نمونههای کلاس سه دربرگیرنده هر چهار نوع بافت تعریف شده هستند. هشت نمونه پکستون، سه نمونه وکستون، سه نمونه گرینستون و یک نمونه مادستون است. این مهم نشان می دهد صرفاً با در نظر گرفتن نوع بافت نمی توان تخمین مناسبی از کیفیت مخزنی نمونه ها داشت و لازم است نوع و مقدار تخلخل غالب در هر نمونه نیز مدنظر قرار گیرد که این مطلب در شکل ۴–۱۳ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۴-۱۱- چهار نمونه با بافت گرینستونی متعلق به (الف) زون یک، (ب) زون دو، (ج) زون سه و (د) زون چهار



شکل ۲–۱۲– تقسیم بندی نمونه ها بر اساس توزیع بافت در هریک از کلاس های مخزنی در شکل ۲–۱۲ نوع بافت سنگ و توزیع انواع مختلف تخلخل در مقابل تراوایی نمودار شده اند. بررسی این نمودارها نشان می دهد که میزان بالای تخلخل بین دانه ای در کنار بافت گرینستونی باعث ایجاد تراوایی مناسب در سنگ شده و در مقابل مقدار تخلخل بین دانه ای در نمونه های مربوط به زون یک و دو ناچیز بوده است (شکل ۴–۱۳(الف)). بیشترین فراوانی تخلخل قالبی در نمونه های متعلق به زون دو مشاهده میشود که نشان می دهد تقریبا تخلخل قالبی نقش موثری در بهبود تراوایی سنگ مخزن نمیگان و دالان نداشته است (شکل ۴–۱۳(الف)). از طرف دیگر ریزتخلخل ها بیشترین فراوانی را در کنگان و دالان نداشته است (شکل ۴–۱۳(ب)). از طرف دیگر ریزتخلخل ها بیشترین فراوانی را در نمونه های مادستونی داشته اند و همانگونه که انتظار می رود تاثیری در بهبود تراوایی نداشته اند (شکل ۴–۱۳(چ)). تخلخل درون دانه ای بطور نسبتا مثابهی در تمامی نمونه های متعلق به چهار زون مشاهده شده اند (شکل ۴–۱۱(د)). عموما این نوع تخلخل را غیرمفید می دانند مگر اینکه شکستگی مشاهده شده اند (شکل ۴–۱۱(د)). عموما این نوع تخلخل را غیرمفید می دانند مگر اینکه شکستگی مشاهده شده اند (شکل ۴–۱۱(د)). عموما این نوع تخلخل را غیرمفید می دانند مگر اینکه شکستگی مشده داشته است و فقط در بعضی از نمونه های زون دو مشاهده میشود (شکل ۴–۱۳(د)). این مهم مده داشته است و فقط در بعضی از نمونه های زون دو مشاهده میشود (شکل ۴–۱۲(و)). این مهم مدد داشته است و فقط در بعضی از نمونه های زون دو مشاهده می شود (شکل ۴–۱۲(و)). این مهم مدی در در اول تاثیر ضعیف فرآیند دیاژنزی انحلال و دوم تاثیر ضعیف تخلخل حفره



(ادامه دارد)



(ادامه دارد)



شکل ۴–۱۳ فراوانی نوع بافت سنگ و انواع مختلف تخلخل (الف) بین دانه ای، (ب) قالبی، (ج) درون دانه ای، (د) ریز تخلخل و (و) حفره ای در مقابل تراوایی

۴-۸- طراحی، آموزش و ارزیابی عملکرد الگوریتم های داده کاوی

در این بخش اطلاعات استخراج شده از هر تصویر مقطع نازک شامل فراوانی انواع مختلف فضاهای خالی، تخلخل نوری، میانگین پیچیدگی هندسی هر تصویر، مقدار سیمان و نوع بافت به انضمام زون مخزنی مربوط به آن برای طراحی و آموزش الگوریتم های داده کاوی و طبقه بندی، استفاده شده اند. پارامترهای استخراجی از تصاویر به عنوان ورودی و زون مخزنی متناظر با آن به عنوان خروجی الگوریتم ها معرفی شده اند. مجموعا برای ۵۶ نقطه که مقاطع نازک و مقدار متناظر تخلخل و تراوایی مغزه آنها در دسترس است، محاسبه عملکرد انجام شد. در ادامه معیارهای ارزیابی عملکرد، محاسبه دقت این مدل ها معرفی و جزییات مربوط به طراحی آنها در دو بخش جداگانه بررسی خواهد شد. ۴-۸-۴ معیارهای ارزیابی عملکرد مدلهای طبقه بندی داده

دو استراتژی کلی به نام های K-لایه ای^۱ و بسط دادن^۲ برای ارزیابی عملکرد مدل های طبقه بندی داده وجود دارد. در روش K-لایه ای داده های آموزشی به K زیرمجموعه تقسیم می شوند و سپس الگوریتم طبقه بندی K بار آموزش داده می شود و هربار ۱-K مجموعه به عنوان داده آموزشی و یک مجموعه باقیمانده برای ارزیابی مدل استفاده می شود و نهایتاً میانگین دقت بدست آمده از تمام مدلها به عنوان دقت نهایی مدل ارایه می شود. این روش برای مطالعاتی که دسترسی به مجموعه داده آموزشی محدود باشد مناسب است و معمولا زمان محاسبات در این روش بویژه در مواقعی که تعداد داده های آموزشی زیاد باشد، بالا خواهد بود. در این مطالعه با توجه به محدود بودن تعداد داده های آموزشی از این روش برای ارزیابی عملکرد مدلهای هوشمند بر اساس معیارهای چهارگانه دقت⁷، صحت⁷، بازخوانی^۵ و میانگین همساز² استفاده شده است. همچنین مقدار K برابر ۱۰ در نظر گرفته شد و این بدان معنیست که مقدار هریک از این معیارها بر اساس میانگین نتایج ده مدل محاسبه شده

۲–۸–۴ دقت

دقت یکی از مرسوم ترین معیارها برای برای سنجش عملکرد روشهای داده کاوی و طبقه بندی داده است. برای محاسبه دقت یک مدل از رابطه (۴–۲) استفاده می شود.

$$Accuracy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} I(\operatorname{Pr} edictedClass = ActualClass) + \begin{cases} I(false) = 0\\ I(true) = 1 \end{cases}$$
(۲-۴)

¹ K-fold

² Hold-out

^r Accuracy

^{*} Precision

^a Recall

⁶ Harmonic Mean

۴-۸-۳- صحت و بازخوانی

این دو معیار برای مواقعی که عدم توازن بین داده های آموزشی وجود دارد بسیار مفید است و این حالت در داده های آموزشی مطالعه حاضر نیز وجود داشت. هر یک از این معیارها میزان عملکرد مدل آموزش دیده را برای هر طبقه از داده ها بصورت مجزا مشخص می کند. لذا با هدف بررسی میزان تفکیک پذیری کلاس های مختلف از دو معیار صحت و بازخوانی استفاده شده است. مشابه با اندازه گیری دقت، ۵۶ نقطه داده استفاده شده اند. مخزنی برای محاسبه صحت، نتایج بدست آمده از مدل داده کاوی در هر کلاس به دو دسته مطلوب و نامطلوب تقسیم می شوند. آن بخش از داده های کلاس مورد نظر که به درستی طبقه بندی شده اند داده های مطلوب فرض می شوند و آن بخش از داده های کلاس های دیگر که به اشتباه در کلاس مورد نظر قرار گرفته اند، نامطلوب در نظر گرفته می شوند. سپس با استفاده از رابطه (۴–۳) مقدار صحت محاسبه می شود:

 $Precision (Class_i) = \frac{Number of desired samples}{Number of desired + undesired samples}$ (\mathcal{T}-\mathcal{F})

رابطه محاسبه مقدار بازخوانی کاملا مشابه با رابطه صحت است با این فرق که تعریف متفاوتی از داده های نامطلوب برای آن در نظر گرفته می شود. در محاسبه مقدار بازخوانی، داده نامطلوب به داده ای از کلاس مورد نظر گفته می شود که به اشتباه در کلاس های دیگر قرار گرفته اند. مقدار بدست آمده برای صحت و بازخوانی یک مدل در تک تک کلاس های مورد نظر محاسبه میشود و می توان آنرا با استفاده از یک میانگین گیری وزنی به کل مدل تعمیم داد. مقدار سهم هر کلاس در دقت نهایی بر اساس فراوانی داده های آموزشی در آن کلاس تعیین میشود.

۴–۸–۳– میانگین همساز

آخرین معیاری که برای اعتبارسنجی روش داده های داده کاوی استفاده شده است، میانگین همساز است که با استفاده از رابطه (۴-۴) و بر اساس مقدار صحت و بازخوانی محاسبه می شود:

$$Harmonic_average = \frac{2 \times \operatorname{Pr}ecision(class_i) \times \operatorname{Re}call(class_i)}{\operatorname{Pr}ecision(class_i) + \operatorname{Re}call(class_i)}$$
(f-f)

۴-۹- ارزیابی عملکرد کلی مدل های طبقه بندی داده

در این بخش جزییات مربوط به مدل های داده کاوی طراحی شده مطرح می شوند و در ادامه به مقایسه عملکرد آنها بر اساس معیارهای مطرح شده می پردازیم.

۴–۹–۱ – الگوریتم درخت تصمیم گیری

سه مدل متفاوت از الگوریتم درخت تصمیم به نام های ساده، متوسط و پیچیده استفاده شده است. شاخص پراکندگی جینی^۱ به عنوان مقیاس تقسیم بندی شاخههای درخت تصمیم گیری استفاده شده است. بیشینه تعداد شاخهها در مدل ساده، متوسط و پیچیده بترتیب ۴، ۲۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شد. مدل ساده درخت تصمیم گیری با بیشترین مقدار دقت (۸۶/۳ ٪) بهترین عملکرد را داشته و این بدین معناست که زیاد کردن تعداد شاخه ها تاثیر مثبتی در بهبود عملکرد مدل نداشته است. دقت مدل های خطی و درجه دو مبتنی بر تابع آنالیز تفکیک بسیار بهم نزدیک بوده و در این میان تابع تفکیک کننده درجه دو با دقت (۸۷/۲ ٪ عملکرد بهتری را نشان می دهد.

در طراحی مدل ماشین بردار پشتیبان از توابع کرنل مختلفی شامل خطی، درجه دو، سه، گوسی کوچک، گوسی متوسط و گوسی بزرگ استفاده شده است. سطح محدودیت جعبهای^۲ تمامی مدلها یک است. تفاوت توابع کرنل گوسی کوچک، متوسط و بزرگ در مقیاس کرنل آنها است که بترتیب برابر با ۲/۸، ۲/۱ و ۱۱ است. در میان مدلهای ماشین بردار پشتیبان مدل خطی بهترین عملکرد را برای زون بندی سنگ مخزن داشته است و دقت آن ۸۶/۳ ٪ است.

شش ساختار متفاوت از الگوریتم KNN به نام های کوچک، متوسط، بزرگ، مکعبی، کسینوسی و وزندار آموزش داده شده است. تعداد همسایگی ها برای مدل های کوچک، متوسط و بزرگ بترتیب برابر ۱، ۱۰ و ۱۰۰ است و معیار اقلیدوسی برای محاسبه مسافت در این سه ساختار استفاده شده

^{&#}x27; Gini's diversity index

^r Box constraint level

است. از طرف دیگر تعداد همسایگیها در ساختار مکعبی و کسینوسی برابر با ۱۰ و بترتیب معیار کسینوس و مینکووسکی^۱ برای محاسبه مسافت در آنها استفاده شده است. وزن مسافتی در تمامی مدلهای یکسان در نظر گرفته شده است. نهایتاً در ساختار وزن دار تعداد همسایگی ها ۱۰ فرض شده و بترتیب از معیار اقلیدوسی و معکوس مکعب به عنوان معیار محاسبه مسافت و وزن مسافتی استفاده شده اند. در میان این مدلها ساختار متوسط بهترین عملکرد و ساختار بزرگ ضعیف ترین عملکرد را داشته است. این مهم نشان می دهد با توجه به محدود بودن تعداد داده های آموزشی، افزایش تعداد همسایگی ها باعث کاهش چشمگیر دقت در مدل با تعداد همسایگی بزرگ شده است؛ بطوریکه

نهایتاً دو مدل ترکیبی بر اساس تئوری تقویت کننده و دسته بندی طراحی شده اند. مدل های داده کاوی منفرد از نوع درخت تصمیم گیری متوسط انتخاب شده اند و سپس با یکدیگر ترکیب شده اند. دقت مدل طبقه بندی کننده و دسته بندی بترتیب برابر ۹۱/۳ ٪ و ۹۴/۹ ٪ است و مقدار میانگین همساز برای این دو مدل نیز بترتیب ۹۱/۱ ٪ و ۹۴/۷ ٪ است. همانگونه که انتظار میرفت نتایج بدست آمده از این دو مدل دقت بالاتری داشته اند و دقت طبقه بندی تا ۷/۷ ٪ در مقایسه با دقیق ترین مدل منفرد بهبود یافته است. بعد از بررسی دقت کلی مدل های مختلف مشخص شد که درخت تصمیم گیری متوسط، تابع تفکیک کننده درجه دو، ماشین بردار پشتیبان خطی، مدل متوسط KNN و مدل ترکیبی دسته بندی بهترین عملکرد را در میان مدل های هم نوع خود داشته اند. نتایج بدست آمده برای این مدل ها در جدول ۴–۳ نمایش داده شده است.

¹ Minkowski

الگوريتم	نوع طبقه بندي كننده	L.	معيار ارزيابي
		(%) دقت	(%)ميانگين همساز
درخت تصميم	درخت پیچیدہ	۸۵/۵	$\Lambda\Delta/\Upsilon$
گیری	درخت ساده	86/3	88/1
	درخت متوسط	۸۵/۵	٨۵/٢
تفکیک کنندہ	تفکیک گر خطی	٨۶/٣	٨۵/٩
	تفکیکگر درجه دوم	۸۷/۲	٨۶/٨
ماشين بردار	SVM خطی	۸۷/۲	8/٩
پشتيبان	SVM درجه دوم	۸۵/۵	٨۵/۶
	SVM مكعبى	٨۴/۶	٨۴/٩
	SVM کوچک	۸۵/۶	<i>۶۶</i>
	SVM متوسط	٨۶/٢	٨۶/١
	SVM بزرگ	٨۴/۶	۳/۶۸
	KNN متوسط	86/3	٨۵/٩
KNN	KNN بزرگ	۳٩/٣	۲۷
	KNN مكعبى	۸۵/۵	٨۵/٢
	KNN كسينوسى	۲/۱۸	Λ • /٣
	KNN وزن دار	۸۵/۵	٨۵/٢
تركيبى	درخت طبقه بندی	۹۱/۳	۹۱/۱
	درخت دسته بندی	94/9	٩۴/٧

جدول۴-۳- دقت و میانگین همساز در تمامی مدل های آموزش دیده برای زون بندی مخزنی

۴-۹-۲ ارزیابی دقت مدلها در زون های مختلف

در بخش قبلی دقت کلی مدلها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شده که در هر نوع از الگوریتم داده کاوی چه مدلی بهترین عملکرد را داشته است. دراین بخش دقت مدلهای داده کاوی برای زون-های مختلف مخزنی بصورت زون به زون با استفاده از ماتریس کارایی^۱ بررسی خواهد شد. برای این منظور از دو معیار صحت و بازخوانی استفاده شده است و صرفا مدل هایی که در میان مدل های هم نوع خود عملکرد دقیقتری داشتند، انتخاب شدهاند.

ماتریس کارایی یک ماتریس مربعی با اندازه n است که مولفههای قطر اصلی آن مشخص کننده تعداد بردارهایی است که بدرستی طبقه بندی شده اند. در مقابل مقدار مولفه C_{ij} مشخص کننده تعداد

¹ Confusion matrix

بردارهای کلاس i است که به اشتباه در کلاس j طبقه بندی شده است. جدول ۴-۴ ماتریس کارایی مدل های مختلف را نشان می دهد. با استفاده از این ماتریس مقدار صحت، بازخوانی و میانگین همساز این مدل ها محاسبه شده است.

كلاس	كلاس تخمينى																			
واقعى	کننده درخت تصمیم گیری						ع تفكياً	تاب	ماشین بردار پشتیبان			نزدیکترین همسایگی				ترکیبی دسته بندی				
		دە	سا		درجه دو			خطی			متوسط									
	١	۲	٣	۴	١	۲	٣	۴	١	۲	٣	۴	١	۲	٣	۴	١	۲	٣	۴
١	34	۲	•	٠	38	٠	•	•	38	•	•	•	۳۵	١	•	٠	38	•	•	٠
٢	۴	79	۴	٠	۴	۲۷	٣	•	۴	79	۴	•	۵	28	۲	١	۲	۳۱	١	٠
٣	•	۴	20	۲	۷	١	۲۳	•	١	۵	۲۵	•	۲	۵	۲۳	١	٠	۲	۲۸	١
۴	•	•	•	18	•	•	•	18	•	•	١	۱۵	•	•	•	18	•	•	•	18

جدول ۴-۴- ماتریس کارایی برای مدلهایی که بهترین عملکرد را در رسته خود داشته اند.

جدول ۴–۵ نشان می دهد که بهترین طبقه بندی در زون چهار انجام شده و بجز مدل ماشین بردار پشتیبان خطی، بقیه مدل ها بطور کامل بردارهای ورودی متعلق به این کلاس را شناسایی کرده اند. جایگاه دوم متعلق به زون یک است بطوریکه سه مدل تابع تفکیک کننده درجه دوم، ماشین بردار پشتیبان خطی و مدل ترکیبی دسته بندی تمام بردارهای ورودی مربوط به این کلاس را به درستی شناسایی کرده اند. بهترین مقدار صحت زون سه برابر ۹۶/۵ ٪ است که بوسیله مدل ترکیبی طبقه بندی بدست آمده است. همچنین مدل KNN متوسط نیز با صحت ۹۲ ٪ عملکردی نزدیک به مدل دسته بندی داشته ولی مقدار معیار بازخوانی آن ۷۴/۱ ٪ است که بوسیله مدل ترکیبی طبقه مدل دسته بندی داشته ولی مقدار معیار بازخوانی آن ۲۰/۱ ٪ است که ۲۶/۲ ٪ کمتر از مقدار بازخوانی مدل دسته بندی داشته ولی مقدار معیار بازخوانی آن ۲۰/۱ گر است که بهترین عملکرد در از مقدار بازخوانی بردارهای متعلق به زون سه داشته است. نهایتاً ضعیف ترین طبقه بندی مربوط به زون دو است که این مهم نشان می دهد بردارهای ورودی مربوط به این زون در داده های آموزش پراکندگی بالاری در مقایسه با سایر زون ها داشته است. با نگاه کلی به نتایج بدست آمده در این بخش می توان گفت مقایسه با سایر زون ها داشته است. با نگاه کلی به نتایج بدست آمده در این بخش هی توان گفت

كلاس	معيار ارزيابي													
تراوايي	تصميم	درخت ً	ک کنندہ	تابع تفكيك	بردار	ماشين	ھمسایگی	نزديكترين	تركيبي دسته بندى					
	سادہ	گیری	ء دو	درجه	، خطی	پشتيبان	ىبط	متو						
	Pr (%) Re (%)		Pr (%)	Re (%)	Pr (%) Re (%)		Pr (%)	Re (%)	Pr (%)	Re (%)				
١	٨٩/۵	۹۴/۴	٩٠	۱۰۰	$\lambda \gamma / \lambda$	۱۰۰	۸۳/۷	۱۰۰	٩۴/٧	۱۰۰				
٢	۸۱/۲	٧۶/۴	۷۹/۴	۲۹/۴	۸۳/۸ ۷۶/۴		۸۳/۸	٧۶/۴	१٣/٩	۹ ۱ / ۱				
٣	۸۶/۲ ۸۰ <i>/</i> ۶		٨٨/۴ ٧۴/١		۸۳/۳ ۸۰/۶		٩٢	۲۴/۱	٩۶/۵	۹٠/٣				
۴	۸۸/۸ ۱۰۰ ۹۴/۱ ۱۰۰		١٠٠	١٠٠	۹۳/۷	۸۸/۸ ۱۰۰		۹۴/۱	۱۰۰					
ميانگين	۸۶/۱ ۸۶/۳		٨٧	٨٧/٢	٨٧/١	٨٧/١	٨۶/۶	٨۶/٣	۹۴/۸	۹۴/۸				

جدول ۴-۵- مقدار صحت و بازخوانی در پنج روش داده کاوی که بهترین عملکرد را داشته اند.

۴-۱۰- نتیجه گیری و جمع بندی

در این بخش نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی برای تفکیک زون بندی مخزنی دو سازند کربناته کنگان و دالان جمع بندی شده اند.

- تقریبا تمام نمونه های بررسی شده که بافت مادستونی داشتند از نظر کیفیت مخزنی در جایگاه ضعیفی قرار می گیرند. از طرف دیگر تمامی نمونه های کلاس چهار دارای بافت گرینستونی هستند ولی این بدان معنی نیست که بافت گرینستونی تضمینی برای کیفیت بالای مخزنی است.
- رشد گسترده سیمان کلسیتی و انیدریتی در بافت آهک های کنگان و دالان و عدم ارتباط فضاهای ایزوله (قالبی و درون دانه ای) با یکدیگر باعث شده تا علارغم وجود بافت گرینستونی ولی تراوایی بسیار پایین باشد. لذا به نظر میرسد وجود بافت گرینستونی شرط لازم برای کیفیت مخزنی بالاست و برای رخداد این موضوع باید پارامترهای دیگری نظیر توزیع سیمان و نوع تخلخل نیز لحاظ گردند.
- غالب مطالعات گذشته به زون بندی مخزنی با استفاده از داده های چاه پیمایی پرداخته اند و کمتر توجهی به اطلاعات کمی قابل استخراج از مقاطع نازک برای این منظور شده
است. در این مطالعه چهار بازه مخزنی تعریف شد و سپس نتایج حاصل از پتروگرافی و آنالیز مقاطع نازک به عنوان ورودی به مدل های مختلف داده کاوی داده شد تا زون مخزنی متناسب با آن مشخص شود؛ بدون آنکه نیاز باشد مقدار دقیق تخلخل و تراوایی بدست آمده از آنالیز مغزه های آنها نیاز باشد.

یک بازه ۳۵ متری از سازندهای کنگان و دالان با استفاده از روش ارائه شده و مدل ترکیبی دسته بندی مورد بررسی قرار گرفت. برای این بازه داده های آنالیز مغزه نیز فراهم بود و لذا زون بندی بر اساس این اطلاعات نیز انجام شد و در نهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده اند. شکل ۴–۱۴ نشان میدهد که الگوریتم دسته بندی در ۳۱ متر از این بازه زون مخزنی مشابهی با آنچه بر اساس داده مغزه بدست آمده را پیشنها داده است. اگر نتایج بدست آمده از داده های مغزه را درست فرض کنیم، نتایج بدست آمده از الگوریتم دسته بندی دیدگاه قابل قبولی از وضعیت زون های تراوا و غیرتراوا در بازه بررسی شده میدهد. در این مطالعه، اطلاعات میکروسکوپی بدست آمده از مقاطع نازک برای زونبندی مخزنی در مقیاس ماکرو استفاده شده است. شاید در نگاه اول به نظر برسد تعمیم اطلاعات یک مقطع نازک که نماینده یک ضخامت چند میلیمتری از سنگ است، به یک زون کار درستی نباشد؛ ولی با در نظر گرفتن این مهم که در تمامی مطالعات مخزنی به گونهای ساده سازی مسئله رخ میدهد، میتوان از این تعمیم دفاع کرد. به عنوان مثال در زون بندی مخزن با استفاده از داده های نگاره نیز محدودیت داده وجود دارد و معمولا از هر یک فوت از سنگ فقط یک برداشت می شود و مقدار بدست آمده از آن نقطه به تمام یک فوت تعمیم داده می شود. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی مغزه نیز معمولا از هر فوت دو پلاگ ۲ اینچی تهیه می شود و سپس با انجام آزمایش تزریق هلیم و جیوه بصورت جداگانه مقدار تخلخل و تراوایی بدست می آید. در این مطالعه نیز در صورت دسترسی به داده های مغزه میتوان تعداد مقاطع نازک

را افزایش داد (از هر فوت یک اسلاید) که این مهم باعث افزایش درجه تفکیک در زون بندی مخزنی خواهد شد. از طرفی چون تهیه مقاطع نازک در مقایسه با آنالیز مغزه بسیار مقرون به صرفه تر است، افزایش تعداد نقاط داده نیازمند صرف هزینه بالا نخواهد بود و علارغم این نکته شناخت دقیقی از مخزن نیز ارائه خواهد کرد.

- تمامی نتایج بدست آمده در این تحقیق بر اساس اطلاعات موجود از یکی از چاههای یکی از میادین جنوبی ایران بدست آمده و طبعا تعمیم دادن و استفاده از مدل های آموزش دیده برای بخش های دیگر سازندهای کنگان و دالان و یا چاه های دیگر ممکن است دقت کافی نداشته باشد و تنها با گسترش دادن ماتریس آموزشی این مدل ها می توان به عملکرد آنها در سایر چاه ها هم اطمینان داشت.



الگوريتم هوشمند دسته بندى

فصل پنجم

طراحی الگوریتم تشخیص الگو برای تفکیک انواع فضاهای خالی در مقاطع کربناته

فصل پنجم: طراحی الگوریتم تشخیص الگو برای تفکیک انواع فضاهای خالی در مقاطع کربناته

۵–۱– مقدمه

در این مطالعه برای ارائه الگوریتمی خودکار با قابلیت شناخت و تفکیک نوع فضاهای خالی موجود در تصاویر مقاطع نازک کربناته از جعبه ابزار آنالیز تصویر در نرم افزار متلب استفاده شده است. پارامترهای هندسی مختلفی از فضاهای خالی استخراج شدهاند. هریک از این پارامترها به لحاظ هندسی مفهوم متفاوتی را بیان میکنند و لذا میتوانند ابزاری مناسب برای معرفی انواع فضاهای خالی به کامپیوتر باشند. در ادامه به مراحل طراحی الگوریتم پرداخته خواهد شد.

۵-۲- مشخصه های هندسی قابل استخراج از فضاهای خالی

این مرحله یکی از مهمترین مراحل یک فرآیند تشخیص الگو است و لازم است که نهایت دقت و تامل برای انتخاب داده ها انجام گیرد. با توجه به ماهیت مسئله ای که می خواهیم با تشخیص الگو آنرا حل کنیم نوع این داده ها تغییر می کند. داده های انتخاب شده در این بخش به مدل هوشمند این توانایی را می دهند تا وجه تمایز بین انواع مختلف فضاهای خالی را تشخیص دهد. الگوریتم شناسایی فضاهای خالی نیز باید ویژگی های منحصر بفردی را از هر کلاس از فضاهای خالی داشته باشد که با دیدن این ویژگی ها بتواند نوع آنرا تشخیص دهد.

در مسئله مورد نظر، مغز انسان از تفاوت شکل هندسی انواع فضاهای خالی استفاده می کند تا نوع فضاهای خالی را در زیر میکروسکوپ تشخیص دهیم. لذا برای رسیدن به راه کار مناسبی برای تشخیص فضاهای خالی و کلاسه بندی آنها مجموعه ای از مشخصه های هندسی برای هر فضاهای خالی را مورد آنالیز و بررسی قرار دادهایم. مشخصه های زیر برای تک تک فضاهای خالی قابل استخراج است. در ادامه هریک از این مشخصه ها معرفی شده و تعریفی از مفهوم هندسی آن نیز آورده شده است.

محیط
$$\frac{1}{4\pi \times 1}$$
 = گردشدگی (۱-۵)

برای رده بندی فضاهای خالی از اندازه مساحت و محیط به شکل مستقیم برای بررسی فضاهای خالی استفاده نشده است و از مفهوم گرد شدگی که در واقع نسبتی از آنها است، بهره بردهایم.

۴- قطر کوچک: کوچکترین قطر در هر خلل و فرج
 ۵- قطر بزرگ: بزرگترین قطر در هر خلل و فرج
 ۶- قطر معادل⁴: قطر دایرهای با مساحت برابر با مساحت هر خلل و فرج. مقدار این مشخصه از فرمول زیر نیز محاسبه میشود.

مساحت×4 = قطر معادل
$$\sqrt{\frac{4 \times -1}{\pi}}$$

در ادامه از اندازه قطرها به شکل مستقیم برای بررسی فضاهای خالی استفاده نشده است و بجای آنها دو پارامتر جدید که عبارتند از نسبت اندازه قطر کوچک به اندازه قطر بزرگ (نسبت تصویر^۵) و نسبت اندازه قطر معادل به اندازه قطر بزرگ، استفاده کردهایم.

- ¹ Area
- ² Perimeter
- ³ Roundness
- ⁴ Equivalent diameter
- ⁵ Aspect ratio
- ⁶ Bounding box

- ۸- انحراف از مرکز^۱: در حالت کلی عبارت است از نسبت فاصله بین دو کانون بیضی به قطر بزرگ آن. در مورد فضاهای خالی سنگ که اشکال پیچیدهای را تشکیل میدهند، این مقدار برای بیضی که به بهترین حالت هر خلل و فرج را در بر می گیرد محاسبه شده است. شکل ۴- (و) مفهوم این بیضی را بهتر نشان میدهد. مقدار انحراف از مرکز عددی بین صفر تا یک است. بیضی که مقدار این پارامتر در آن صفر باشد دایره است و بیضی با مقدار یک، خط مستقیم است.
- ۹- میزان فراخی^۲: از تقسیم مساحت هر خلل و فرج به مقدار مساحت مستطیل مرزی آن بدست میآید.

مقدار این مشخصه بین صفر تا یک تغییر میکند. با افزایش پیچیدگی و بینظمی در یک شکل مقدار فراخی کم و هرچه شکل آن به دایره و مربع نزدیکتر باشد مقدار فراخی افزایش مییابد. فضاهای خالی از نوع قالبی که دایرهای شکل هستند دارای مقدار فراخی نزدیک به ۰٫۷ هستند. ۱۰- استحکام^۳: پیش از آن که این مشخصه را تعریف کنیم لازم است به تعریف دو پارامتر دیگر توجه شود.

- پوسته محدب[†]: عبارت است از کوچکترین چند ضلعی محدب که یک خلل و فرج را در بر میگیرد.
- مساحت محدب^۵: عبارت است از تعداد پیکسلهای موجود در پوسته محدب.
 حال می توان مفهوم استحکام را بیان کرد. استحکام عبارت است از نسبت مساحت یک خلل و فرج
 به مساحت محدب آن.
- ¹ Eccentricity
- ² Extent
- ³ Solidity
- ⁴ Convex hull

⁵ Convex area

(۴-۵)

نمایش گرافیکی مشخصه های استخراج شده در شکل ۵–۱ آمده است.



شکل ۵-۱- نمایش گرافیکی مشخصه های استخراج شده از هر خلل و فرج (الف) محیط، (ب) قطر کوچک و بزرگ، (ج) مستطیل مرزی، (د) پوسته محدب، (ه) مساحت، (و) انحراف از مرکز

۵–۳– استخراج مشخصه های هندسی از تصویر

عملکرد الگوریتم تشخیص الگو به شدت وابسته به انتخاب آگاهانه و استخراج دقیق مشخصه های هندسی فضاهای خالی است. برای استخراج فضاهای خالی از تصویر رنگی فرآیندی مشابه با آنچه در فصل قبل آمد، انجام شده است. سپس با استفاده از دستور bwlabel فضاهای خالی را برچسب گذاری می کنیم. شایان ذکر است که مقدار حد آستانه برای این بخش ۸ پیکسل در نظر گرفته شده است. یعنی مشخصه هندسی فضاهایی که ۸ یا بیش از ۸ پیکسل دارند، استخراج خواهد شد. در مرحله آخر از دستور so مشخصه است. این مشخصه های خالی را برچسب گذاری می کنیم. شایان ذکر است که مقدار حد آستانه برای این بخش ۸ پیکسل در نظر گرفته شده است. یعنی مشخصه هندسی فضاهایی که ۸ یا بیش از ۸ پیکسل دارند، استخراج خواهد شد. در مرحله آخر از دستور so مشخصه اصلی تعریف شده در بخش قبل با استفاده از دستور این دستور استخراج ضواهد شد. در مرحله آخر از دستور so مشخصه اصلی تعریف شده در بخش قبل با استفاده از دستور این دستور استخراج شده و سپس بر اساس کسرها و نسبتهای تعریف شده، مقدار گردشدگی، نسبت این دستور است. بررسی عکسهای

مختلف نشان داد که برای تعیین درصد هریک از انواع فضاهای خالی موجود در تصویر، بایستی محدودیتی در مقدار مساحت هریک از فضاها، در نظر گرفت. این محدودیت باعث میشود تا سرعت و دقت الگوریتم افزایش چشمگیری داشته باشد. در مطالعه چشمی تخلخل نیز معمولاً نوع تخلخل غالب و مقدار درصد هر نوع تخلخل بر اساس فضاهای با مساحت بزرگتر تعیین میشود. پس از بررسیهای مختلف به این نتیجه رسیدیم که انتخاب ۱۶ فضای بزرگتر برای مطالعه میتواند تقریب مناسبی از مقدار انواع تخلخل موجود را ارائه دهد. لذا با استفاده از دستور sort، فضاها بر حسب مساحت مرتب شدهاند. ترتیبی اتخاذ شده که این فضاها به ترتیب اندازه با شماره های ۱ الی ۱۶ شماره گذاری شوند. در شکل ۵–۲ نمونه ای از خروجی الگوریتم تا این مرحله نمایش داده شده است.



شکل ۵–۲– در این تصویر فضاهای خالی بررسی شده به ترتیب اندازه شماره گذاری شده اند.

مقدار مشخصه های هندسی بیان شده برای ۳۸۴ فضای خالی متفاوت که در کلاس های ذکر شده طبقه بندی می شوند، در بیش از ۲۴۰ تصویر گرفته شده از مقاطع نازک، محاسبه شده است. از این تعداد ۲۹۴ مورد از اطلاعات در قالب ماتریس آموزش مدل هوشمند در الگوریتم تشخیص الگو استفاده شد و ۹۰ مورد هم برای اعتبارسنجی و آزمایش عملکرد مدل بکار گرفته شده است.

۵-۴- تحلیل آماری اطلاعات استخراج شده از فضاهای خالی

از آنجایی که الگوریتم تفکیک کننده بایستی قابلیت شناخت فضاها را به لحاظ شکل هندسی داشته باشد، لذا پارامترهای انتخاب شده باید معرف خوبی از شکل هندسی فضاها باشند. مطالعه و بررسی آماریِ ده پارامتراستخراج شده از هر خلل و فرج نشان میدهد، که برای تفکیک فضاهای خالی، پارامترهای گردشدگی (ضریب شکل هندسی)، نسبت قطر بزرگ به کوچک (نسبت تصویر)، فراخی، انحراف از مرکز و نسبت قطر معادل به قطر بزرگ میتوانند تغییرات در شکل هندسی را نشان دهند. در جدول ۵–۱ مقدار مقدار ماکزیمم، مینیمم و میانگین مشخصه های هندسی اندازه گیری شده برای هریک از کلاسهای فضای خالی نمایش داده شده است.

میزان تغییرات و پراکندگی مشخصه های هندسی برای هر نوع از فضاهای خالی (شامل تخلخل بین دانهای (نقاط آبی)، درون دانهای (نقاط قرمز)، قالبی کامل (نقاط سبز)، قالبی ناقص (نقاط سیاه) و حفره ای (مثلث سیاه)) در نمودار های زیر بررسی شده است. این بررسی با هدف ارزش گذاری بر هریک از این مشخصه ها در گروه های دوتایی انجام شده است. از شکلهای ۵-۳ مشخص است که نمی توان با تکیه بر تنها دو پارامتر، مدلی دقیق برای تفکیک فضاهای خالی ارائه داد. نتایج نشان می دهد که سه مشخصه گردشدگی، نسبت تصویر و فراخی، سه مولفه ای هستند که می توانند تمایز بین کلاس های مختلف فضاهای خالی را ایجاد کنند. انتظار می رود که سه مشخصه دیگر نیز تاثیر مثبتی در تفکیک داشته باشند. برای این منظور از تکنیک شبکه عصبی استفاده شده و جایگشتهای مختلفی از این مشخصه ها به عنوان ورودی به شبکه عصبی معرفی شده است و عملکرد شبکه ها با ورودی مختلف مورد تحقیق قرار گرفته است تا بهترین جایگشت از ورودی ها انتخاب شود.

نوع فضای خالی	مشخصه هندسی	ماكزيمم	مینیمم	ميانگين
	قطر بزرگ به کوچک	۱۳/۸	٢	0/14
	گردشدگی	۷/۶	١	۲/۵۴
فضاهای خالی بین دانه ای	انحراف از مرکز	٠/٩٨	•/۴٧	۰/٨۶
	فراخى	•/94	•/17	•/٣٧
	قطر معادل به بزرگ	۰/۸۳	•/۲٩	•/۵۵
	استحكام	۰/۸۳	•/٣٧	•/۵V
	قطر بزرگ به کوچک	44	۴	۱۷/۱۹
	گردشدگی	۴/۲	1/•4	۱/۹۵
فضاهای خالی درون دانه ای	انحراف از مرکز	•/٩٧	•/9٣	۰/۸۴
	فراخى	۰/۵۱	٠/١٩	•/٣۴
	قطر معادل به بزرگ	•/98	•/٣٧	۰/۵۱
	استحكام	• ۶ •	۰ /۳ ۱	•/49
	قطر بزرگ به کوچک	۴/۱	۲/۱	٣/٠٣
	گردشدگی	۲/۸	١	1/41
فضاهای خالی ملدیک (قالبی) کامل	انحراف از مرکز	•/97	• /٣٢	•/97
	فراخى	۰/۹۳	•/4•	•/80
	قطر معادل به بزرگ	۰/۹۵	٠/۵٩	۰/۸۴
	استحكام	•/9۶	•/۴٩	٠/٨۴
	قطر بزرگ به کوچک	۶/۷	1/44	۳/۴۵
	گردشدگی	٣	۱/•۵	۱/۵۳
فضاهای خالی ملدیک (قالبی) ناقص	انحراف از مرکز	•/9۴	۰/۳۱	•/۶٨
	فراخى	۰/۶۱	•/٣۴	۰/۴۸
	قطر معادل به بزرگ	•/٧٨	•/۲٨	۰/۶۱
	استحكام	•/9۴	٠/۴٧	•/98
	قطر بزرگ به کوچک	36	۲/۷	17/71
	گردشدگی	۱۸/۷	۴	11/1
فضاهای خالی حفره ای	انحراف از مرکز	•/٩٩	•/9۶	٠/٩٨
	فراخي	•/4٣	• / ١	•/77
	قطر معادل به بزرگ	•/44	• / ١	•/٣٢
	استحكام	۰/٨۶	۰/۱۵	•/۵۵

جدول ۵-۱- مقدار ماکزیمم، مینیمم و میانگین مشخصه های هندسی اندازه گیری شده برای هریک از کلاسهای فضای خالی



(ادامه دارد)



شکل ۵–۳- تغییرات پارامترهای هندسی در مقابل انواع فضاهای خالی، انحراف از مرکز - گردشدگی (الف)، نسبت تصویر - گردشدگی (ب)، نسبت قطر معادل به قطر بزرگ – گردشدگی (ج)، فراخی – گردشدگی (د)، انحراف از مرکز – نسبت تصویر (ه)، نسبت قطر معادل به قطر بزرگ – نسبت تصویر (و)، نسبت تصویر (ی)، انحراف از مرکز - نسبت قطر معادل به قطر بزرگ (ر)، انحراف از مرکز – فراخی (ژ)، نسبت قطر معادل به قطر بزرگ – فراخی (ص)

شکل ۵-۴ پراکندگی سه پارامتر نسبت تصویر، فراخی و گردشدگی را نشان میدهد. با توجه به نمودار مشخص است که مرز انواع مختلف فضاهای خالی مشخص بوده و میزان همپوشانی کمی بین آنها وجود دارد.



شکل ۵-۴- پراکندگی سه پارامتر نسبت تصویر، فراخی و گردشدگی برای پنج نوع فضای خالی

ورودیهای شبکه عصبی جایگشتهای مختلف حاصل از این مشخصه های هندسی و خروجی، پنج نوع تخلخل مورد بررسی است. مقایسه دقت شبکه های عصبی در جدول ۵-۲ بعضی از جایگشتها که بهترین عملکرد را داشته اند نمایش داده شده است.

خطا (./)	ورودی ها
۱٩/٩١	نسبت تصوير
19/54	فراخي ,نسبت تصوير
۱۹/۴۸	استحكام ,نسبت تصوير
۱۱/۲۸	گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر
۱۳/۳۱	استحكام ,فراخي ,نسبت تصوير
۱۱/۶۵	استحکام ,گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر
۱۰/۵۴	نسبت قطر معادل به قطر بزرگ ,گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر
))/Y)	انحراف از مرکز ,استحکام ,گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر
11/22	نسبت قطر معادل به قطر بزرگ ,انحراف از مرکز ,گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر
11/17	نسبت قطر معادل به قطر بزرگ ,استحکام ,انحراف از مرکز ,گردشدگی ,فراخی ,نسبت تصویر

جدول ۵-۲- دقت شبکه های عصبی برای پیش بینی انواع فضاهای خالی

با توجه به نتایج جدول فوق مشخص است که استفاده از چهار مشخصه نسبت تصویر، میزان فراخی، گردشدگی و نسبت قطر معادل به قطر بزرگ می تواند دقیقترین عملکرد را برای سیستم هوشمند الگوریتم تشخیص الگو فراهم آورد. ارزیابی های جزئی تر بر روی داده های استخراج شده از تصاویر نشان میدهد که سه کلاس بین دانهای، درون دانهای و حفرهای تنها با تکیه بر سه مشخصه هندسی نسبت تصویر، گردشدگی و میزان فراخی قابل تفکیک از هم هستند در حالیکه در شناسایی دو کلاس ملدیک کامل و ملدیک ناقص تکیه به این سه پارامتر دقت را پایین میآورد. لذا بررسی های بیشتر نشان داد که در صورت استفاده از نسبت قطر معادل به بزرگ این مشکل نیز تا حدود بسیار زیادی مرتفع خواهد شد.

۵-۵- طراحی و آموزش سیستم هوشمند

تا به این مرحله تمامی فرآیندهای لازم برای پردازش تصویر و استخراج مشخصه های هندسی لازم برای تفکیک فضاهای خالی بیان شد. در واقع تا این مرحله تلاش شد تا با بکارگیری تکنیکهای پردازش تصویر، ورودیهای مدل هوشمند را به طریقی فراهم آوریم که این مدل قابلیت تفکیک انواع مختلف فضاهای خالی را داشته باشد. در این بخش مراحل طراحی و آموزش مدل هوشمند که در واقع مغز تحلیل گر الگوریتم تشخیص الگو است توضیح داده می شود.

در این مطالعه از سه روش آنالیز تفکیک کننده خطی، آنالیز تفکیک کننده درجه دوم و شبکه عصبی برای طراحی سه مدل هوشمند استفاده شده است و در پایان عملکرد این سه مدل با هم مقایسه خواهد شد.

۵–۵–۱ انتخاب بهینه داده های آموزش

برای این منظور داده های آموزش را به نسبت ۷۵ ٪ به ۲۵ ٪ تقسیم و در چهار گروه جداگانه تقسیم بندی کرده ایم. تفاوت این چهار گروه با هم در داده های تست آنها است، بطوریکه داده های تست به صورت چرخشی تغییر داده شده است. بدین صورت چهار مدل هوشمند طراحی شده که هریک با داده متفاوت آموزش و تست شده است. اینکار باعث می شود تا از میان داده های موجود بهترین ها انتخاب شوند و مدل هوشمند واقف به تمامی الگوها و مدلهای پنهان موجود در داده ها باشد. برای اینکه عملکرد شبکه عصبی تنها تحت تاثیر ماتریس دادههای آموزشی باشد ویژگی های شبکه مانند تعداد لایه های پنهان و تعداد نرون های آن در هر چهار مدل یکسان فرض شده است. بردار ورودی شامل مقادیر عددی پارامترهای استخراج شده از تصویر و خروجی نوع کلاس فضای خالی متناظر با آن است. از مجموع عکسهای بررسی شده تعداد ۲۲۹ فضای خالی رقومی شده و مقدار مشخصه های هندسی آنها در یک ماتریس گردآوری شده اند. در مرحله اول ۲۴۲ فضای خالی برای آموزش و ۸۲ مورد برای تست شبکه عصبی انتخاب شده است. همین نسبت در سه شبکه دیگر نیز رعایت شده است؛ با این تفاوت که نمونه هایی که در یک مرحله به عنوان تست انتخاب شده اند، در سایر مراحل مقایسه کرده ایم. در این ماتریس تعداد نمونههایی که به اشتباه جزء کلاس دیگری طبقه بندی شده اند با ذکر نوع کلاس واقعی و کلاس نسبت داده شرکه عصبی، مشخص می شره اند با ذکر نوع کلاس واقعی و کلاس نسبت داده شره می استباه جزء کلاس دیگری طبقه بندی شده اند با ذکر نوع کلاس واقعی و کلاس نسبت داده شده توسط شبکه عصبی، مشخص می شود. این مهم

		کلاس تخمین زده شده (شبکه)						
		١	٢	٣	۴	۵		
ç	١	7.γ۵	·/. •	·/. •	۲۵٪	·/.•		
شد ب)	٢	۵./	`/. ? •	·/. •	۲.۳۵	·/. •		
<u>مین</u> ز شنا	٣	·/.•	·/.•	7.1	·/.•	·/.•		
بي ک	۴	7.10	۵۲.٪	·/.•	·/. ? •	·/.•		
ጟ	۵	·/.•	·/.•	·/.•	·/. •	7.1		

جدول ۵-۳- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره یک

جدول ۵–۳ نشان می دهد که مدل شماره یک در تشخیص فضاهای خالی ملدیک کامل (۳) و حفره ای (۵) کاملا موفق بوده است. همچنین فضاهای خالی بین دانه ای (۱) را با دقت بسیار خوبی تشخیص داده است. نکته حائز اهمیت در مورد این مدل عملکرد آن برای فضاهای خالی درون دانه ای (۲) و ملدیک ناقص (۴) است که ظاهرا در ۴۰ ٪ مواقع این دو فضا بجای یکدیگر تشخیص داده شده اند. البته از آنجایی که ماهیت پتروفیزیکی این دو نوع تخلخل یکی بوده و هر دو به دلیل فرآیندهای دیاژنتیکی یکسانی در سنگ تشکیل می شوند و به لحاظ شکل ظاهری بسیار شبیه به یکدیگر هستند، این اشتباه تا حدودی قابل پیش بینی نیز بود. در عین حال بدلیل تاثیر مشابهی که این دو نوع فضای خالی در خواص پتروفیزیکی سنگ دارند و هردو از انواع تخلخل های غیرمفید هستند، این میزان خطا در آنها تاثیری در تفسیر رفتارهای سنگ مخزن و حتی در محاسبات مخزنی ندارد چرا که معمولا در مطالعات مخزنی فقط مقدار تخلخل مفید سنگ در محاسبات لحاظ می شود. شایان ذکر است در صورتیکه هدف انجام مطالعات دیاژنتیکی و تحلیل محیط رسوبگذاری باشد بایستی این

		(۵	کلاس تخمین زده شده (شبکه)							
		١	٢	٣	۴	۵				
ę	١	`∕.∧∙	۵./	·/. •	7.10	·/.•				
شد ن شد س	٢	7.1 •	۰.۷۵	'/. •	7.10	·/. •				
مینا، شنا،	٣	·/. •	·/. •	7.1••	·/.•	·/. •				
ب ک	۴	۲́.۱۰	۰ <i>۲</i> .۲	·/. •	·/.γ •	·/. •				
	۵	·/.•	·/. •	·/. •	·/. •	7.1				

جدول ۵-۴- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره دو

جدول ۵–۴ عملکرد مدل شماره ۲ را نمایش می دهد. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل شماره ۲ نشان میدهد که به مراتب بهتر از مدل شماره یک عمل کرده است و نه تنها دقت مشابه در تفکیک فضاهای ملدیک کامل و حفره ای داشته بلکه دقت بالاتری در تفکیک فضاهای بین دانه ای، درون دانه ای و ملدیک کامل داشته است.

		(۵	ده (شبک	ن زده شد	ں تخمیر	كلاس
		١	٢	٣	۴	۵
ę	١	۶۵./	7.10	'/ . •	۰X.	·/.•
ن شد اس)	٢	7.10	۶ <i>۰.</i> /	·/. •	۰۲.۲	·/.•
یک من	٣	7.1•	·/. •	%.٩∙	·/. •	·/.•
ي ي	۴	7.10	7.10	·/. •	·/. ? •	<u>٪</u> ۱۰
~ ጜ	۵	7.10	7.Δ	·/. •	·/. •	'∕.∧ •

جدول ۵-۵- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره سه

مقایسه نتایج بدست آمده برای این مدل که در جدول ۵–۵ آمده، حاکی از آن است که توزیع داده های آموزشی در کلاس های مختلف فضای خالی مناسب نیست و مدل عملکرد خوبی در تشخیص سه فضای خالی بین دانه ای، درون دانه ای و ملدیک ناقص نداشته است. حتی برای دو نوع فضای خالی ملدیک کامل و حفره ای که در غالب موارد دقیق شناسایی می شوند نیز نتوانسته تمایز خوبی ایجاد کند.

		(۵	ه (شبک	ن زده شد	ں تخمیر	<i>צ</i> אני
		١	٢	٣	۴	۵
ę	١	۵۷.٪	7.Δ	·/. •	۲́.۱۰	7.Δ
ن شد بي)	٢	۰.۵	۲ . ۷۵	·/. •	7.10	7.Δ
مینا، شنا،	٣	·/. •	·/. •	7.1	·/. •	·/. •
بَّي رَ	۴	۲.۵	۰۲.۲	·/. •	<i>γ</i> .γ۵	·/. •
ጜ	۵	۵./	·/.•	·/. •	·/. •	7.90

جدول ۵-۶- ماتریس درهم ریختگی مدل شماره چهار

بررسی اماری نتایج این مدل (جدول ۵–۶) نشان میدهد که به مراتب از مدل شماره سه بهتر عمل کرده ولی در مقایسه با مدل شماره دو عملکرد ضعیفتری داشته است بجز در تفکیک فضاهای خالی ملدیک ناقص از فضاهای درون دانه ای. همچنین در تفکیک چهار فضای خالی بین دانه ای، درون دانه ای، ملدیک کامل و ناقص از مدل شماره یک هم بهتر عمل کرده است ولی در تفکیک فضاهای حفره ای اندکی ضعیف تر عمل کرده است. با بررسی های انجام شده بر روی چهار مدل طراحی شده تصمیم گرفته شد تا داده های آموزشی مدل شماره دو برای آموزش نهایی مدل هوشمند الگوریتم طراحی شده استفاده شوند. البته با توجه به اینکه مدل چهارم دقت بهتری در تفکیک فضاهای ملدیک ناقص داشت، تعدادی از داده های آموزشی کلاس شماره چهار این مدل نیز به داده های آموزشی نهایی اضافه شد.

۵-۷- ارزیابی و دقت سنجی عملکرد الگوریتم

بعد از آموزش سیستم های رده بندی، برای تست آنها تعداد ده تصویر که دربرگیرنده انواع مختلف فضاهای خالی موجود در سنگهای کربناته است، به عنوان ورودی به الگوریتم داده شده است. تصاویر انتخاب شده در شکل ۵–۵ نشان داده شدهاند. در جدول ۵–۷ و ۵–۸ مقدار واقعی تخلخل نوری و هریک از انواع کلاسهای تخلخل نمایش داده شده است. در مقابل در جدول ۵–۹ مقدار درصد هر نوع فضای خالی که بر اساس سیستمهای تفکیک کننده بدست آمده لیست شدهاند. برای محاسبه مقدار تخلخل مربوط به هر رده، مجموع مساحت مربوط به هر آن نوع از خلل و فرج را بر مساحت کل ۱۶ فضای انتخاب شده تقسیم و در مقدار تخلخل کل ضرب شده است. رابطه زیر روش محاسبه را نشان می دهد.

$$X$$
 مقدار تخلخل نوری × محموع مساحت $pore$ های نوع $= \frac{X}{\alpha}$ مقدار تخلخل نوع X مقدار تخلخل نوع $(\Delta - \Delta)$



(ادامه دارد)



شکل ۵-۵- تصاویر انتخاب شده برای تست الگوریتم تفکیک کننده

۵-۷-۱ محاسبه خطا الگوریتم بر اساس مساحت محاسبه شده

در جدول ۵–۱۰ مقدار خطای الگوریتم بر حسب نوع تابع تفکیک کننده آمده است. برای محاسبه خطا مقادیر محاسبه شده برای هر نوع تخلخل (مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از الگوریتم) اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار بدست آمده از الگوریتم را به عنوان خطا در نظر گرفتهایم. در پایان نیز برای انتخاب بهترین تابع تفکیک کننده میانگین مقدار خطا در پیشبینی هریک از انواع فضاهای خالی در ده تصویر مورد بررسی، محاسبه شده است. با توجه به جدول ۵–۱۰ مشخص است که میانگین خطا توابع خطی، درجه دو و شبکه عصبی بر حسب درصد برای تخلخل بین دانهای به ترتیب ۸۰/۳، ۸/۸۸ و ۱۱/۶ برای تخلخل درون دانهای ۳/۴۵، ۱۱/۶۸ و ۳/۶ برای تخلخل حفره ای ۶/۱۶، ۱/۳۰ و ۲/۸۷ است. این مقایسه نشان میدهد که تابع تفکیک کننده خطی بهترین پیش بینی را از تخلخل بین دانهای، درون دانه ای، ملدیک کامل و ناقص داشته است. حال آنکه تابع تفکیک کننده درجه دوم بهترین پیش بینی را از تخلخل حفره ای داشته است. با در نظر گرفتن این موارد تابع خطی به عنوان مدل هوشمند در طراحی الگوریتم استفاده خواهد شد.

شماره نمونه	١	٢	٣	۴	۵	۶	۷	٨	٩	١٠
مقدار تخلخل نوری	۱۰/۷۶	17/47	۱۰/۱۵	14/88	۱۹/۳	۱٩/۴	19/78	۱۱/۷۸	13/15	11/87

جدول ۵-۷- مقدار تخلخل نوری در نمونه های بررسی شده

		<u>,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,</u>	,	0, 1	
شماره	بین دانهای (./)	درون دانهای (٪)	قالبی کامل (./)	قالبی ناقص (./)	حفره ای (٪)
نمونه					
١	٣,٠٩	۵,۷۱	۰,۲۷	١,٢٣	•,۴۴
٢	۶,۶۱	١,۶۵	1,70	۲,۹۱	•
٣	7,47	4,49	1,17	۲,۱۱	•
۴	۰,۴۶	۰,۲۱	17,17	١,٧٨	•
۵	٧,٩٣	7,47	4,17	۴,۷۷	•
۶	•	۶۱, ۰	۵,۶۵	١,٨٧	11,78
۷	•	۵,۳۱	١١,٧٩	۲,۱۵	•
٨	۱,۸۱	۷,۶	۶۱, ۰	1,07	۲,۳۰
٩	۵,۰۸	•	۲,۳۳	۵,۷	•
١.	۲,۷۲	۶,۹	•	١,٩٩	•

جدول ۵-۸- مقدار هریک از انواع تخلخل در تصاویر انتخاب

شماره	مدل تفکیک	بین دانهای	درون دانهای	قالبی کامل	قالبى ناقص	حفرہ ای
نمونه	كننده	(/.)	(/.)	(/.)	(/.)	(/.)
	خطی	۲,۷۸	۵,۸۳	•,٣۴	1,88	۴۴, ۰
١	درجه دوم	۲,۹۷	۵,۸۳	•,٣۴	١,١۶	۴۴, ۰
	شبکه عصبی	۲,۸۳	۵,۸۳	•,٣۴	١,١۶	۴۴, ۰
	خطى	۶,۲۷	۱,۶۸	۶۷, ۰	٣,٧٩	•
٢	درجه دوم	۶,۳۳	۲,۰۷	۶۷, ۰	۲,۸۴	۵۱, ۰
	شبكه عصبي	۶,۲۷	۲,۰۷	۶۷, ۰	٣,۴١	•
	خطى	4,57	۲,۰۸	١,٣١	7,11	•
٣	درجه دوم	4,•7	3,47	۰,۸۲	١,٨۴	•
	شبکه عصبی	٣,١٢	٣,٨٧	٠,٩١	1,70	۰,۹
	خطی	۶۸, ۰	۰,۷۶	10,49	7,59	•
۴	درجه دوم	•	1,44	٨,۶۶	4,01	•
	شبكه عصبي	•	1,44	٩,٨۶	٣,٣٣	•
	خطی	۸,۸۱	۲,۳۲	4,•1	4,17	•
۵	درجه دوم	۳,۵۸	۵۳, ۱۰	4,79	۰,۳۹	•
	شبكه عصبي	0,74	۵,۹۴	4,79	۳,۲۳	•
	خطى	•	۴۹,	۶,۱۹	١,٠٢	11,88
۶	درجه دوم	۰٫۵۹	۴۹, ۰	۵,۵۶	۱,۰۶	11,88
	شبکه عصبی	•	۴۹,	۵,۳۷	۱,۰۶	17,49
	خطى	۰,۳۵	۵,۹۳	۱۰,۳۲	7,54	•
٧	درجه دوم	۰,۳۵	5,87	۱۰,۹۷	1,81	•
	شبکه عصبی	۰,۳۵	۶,۱۲	11,17	1,81	•
	خطى	7,4	٧,۴	•,۴٣	۱,۵۵	•
٨	درجه دوم	1,14	4,18	•	7,77	٣,٣٩
	شبکه عصبی	۲,۱	٧,١	•,۴٣	۱,۵۵	•
	خطى	۶,۱	•	١,٨٩	۵,۱۲	•
٩	درجه دوم	1,94	١,٨٣	2,80	۶,۶۸	•
	شبکه عصبی	1,94	١,٨٣	7,84	<i>۶</i> ,٩٩	•
	خطی	٢,١٩	٨,٠٩	•	1,88	•
۱٠	درجه دوم	3,07	٨,٠٩	•	•	•
	شبكه عصبي	7,19	٨,٠٩	•	١,٣٣	•

جدول ۵-۹- مقدار هر نوع فضای خالی بر اساس مدل تفکیک کننده

شماره	مدل تفکیک	خطا در بین دانه-	خطا در درون	خطا در قالبی	خطا درقالبی	خطا در حفره ای(٪)
نمونه	كننده	ای (./)	دانەاى(./)	كامل(./)	ناقص(./)	
	خطى	۲,۸۸	١,١١	۶۵, ۰	1,7	•
١	درجه دوم	١,١١	١,١١	۶۵, ۰	۶۵, ۰	•
	شبكه عصبى	7,41	١,١١	۶۵, ۰	۶۵, ۰	•
	خطى	۲,۷۳	۰,۲۷	۳,۳۸	٧,•٨	•
٢	درجه دوم	۲,۲۵	۳,۳۸	4,99	۵, ۰	•
	شبكه عصبى	۲,۷۳	۳,۳۸	4,99	4,•7	•
	خطى	٠,٢١	22,0	١,٧٧	•	•
٣	درجه دوم	۱۵,۷	١٠	۳,•۵	7,88	•
	شبكه عصبي	۶,۸	۶,۱	۲,۰۶	٧,۴	•
	خطى	۱,۵	٣,٧	11,41	۶,۲	•
۴	درجه دوم	۳,۱	٨,۴	۲۳,۹۹	۲٩,٩	•
	شبكه عصبى	۳,۱	٨,۴	۲۳,۹۹	۳,۷۵	•
	خطى	۴,۵	۰,۷۷	۰,۶۲	۳,۱	•
۵	درجه دوم	22,0	۴۰,۸	٣,۴	22,4	•
	شبكه عصبى	18,41	۱۰,۳۱	٣,۴	٧,٩	•
	خطى	•	۶۱, ۰	۲,۷۸	4,77	۲,1۶
۶	درجه دوم	٣	۵, ۰	۰,۴	۴,۱	۲,1۶
	شبكه عصبى	•	۵, ۰	1,44	۴,۱	۶,۳
	خطى	۱,۸۱	٣,٢٢	٧,۶٣	۲,۵	•
٧	درجه دوم	۱,۸۱	0,74	4,70	۰,۴	•
	شبكه عصبي	١,٨١	4,7	٣,٢	۰,۴	•
	خطى	۵	١,٧	1,87	۰,۱۶	۱۹,۵
٨	درجه دوم	۵,۶۸	23,75	۵,۱	۷,۱	٩,٢
	شبکه عصبی	7,49	4,74	١,۵٢	۰,۱۶	۱۹,۵
	خطى	٧,٧٧	•	۳,۳۵	4,47	•
٩	درجه دوم	۲۳,۹	۱۳,۹	7,47	٧,۴	•
	شبکه عصبی	۲۳,۹	۱۳,۹	۱۷,۸۳	٩,٨٣	•
	خطى	4,47	10,74	•	۵,۷	•
١٠	درجه دوم	۶,۸	1.,74	•	17,17	•
	شبکه عصبی	4,47	10,74	•	۵,۶	•
~ .	خطى	۳,۰۸	4,87	۳,۳۱	3,47	7,18
میانگین خمال	درجه دوم	۸۵۸	11,88	4,79	9,75	1,11
-	شبکه عصبی	8,11	۶,۲۳	۵,۸۷	4,31	۲,۵۸

جدول ۵-۱۰- مقدار خطای الگوریتم بر حسب نوع مدل تفکیک کننده

۵-۷-۲- محاسبه دقت الگوریتم بر اساس پارامترهای هندسی

در قسمت قبل، دقت الگوریتم بر اساس مجموع مساحت هر نوع از فضاهای خالی بررسی شد. این بررسی نتیجه نهایی در مورد مقدار درصد هر نوع از فضاهای خالی را ارائه میدهد و مشخص نمی کند که الگوریتم چه دقتی در تفکیک یک به یک انواع فضاهای خالی داشته است، به عبارت دیگر در صورتیکه دو فضای خالی از نوع بین دانهای و قالبی ناقص با مساحت برابر وجود داشته باشد، ممکن است الگوریتم فضای خالی از نوع بین دانه ی را قالبی ناقص و فضای خالی از نوع قالبی ناقص را بین دانهای پیش بینی کند و به این ترتیب در عین حال که تغییری در مقدار هر کلاس نمایان نمی شود ولى در واقع الگوريتم مسير اشتباهي رفته و در موارد ديگر ممكن است اين اشتباهات باعث ايجاد خطا شود. لذا لازم است تا دقت الگوریتم را در مورد شناخت فضاهای خالی به صورت منفرد نیز بررسی کنیم. برای این منظور پارامترهای هندسی (شامل گردشدگی، نسبت تصویر، فراخی و نسبت قطر معادل به بزرگ) هشتاد و چهار فضای خالی را محاسبه کردهایم. از این میان تعداد سی و چهار فضای خالی بین دانهای، چهارده فضای خالی درون دانهای، چهارده فضای خالی قالبی کامل، پانزده فضای خالی قالبی ناقص و هفت فضای خالی حفره ای است. مشابه با قسمت قبل از سه الگوریتم با توابع تفکیک کننده خطی، درجه دو و شبکه عصبی استفاده شد. در شکل ۵-۶ دقت هریک از سه الگوریتم در شناخت صحیح نوع فضای خالی آمده است. در این نمودار ستونهای قهوهای، خاکستری و آبی به ترتیب بیانگر دقت الگوریتمهای با توابع خطی، درجه دوم و شبکه عصبی در شناخت فضاهای خالی منفرد است. نتايج بدست آمده از اين نمودار تاييد كننده نتايج قسمت قبل است. الگوريتم تفكيك کننده در شناخت هر نوع از فضاهای خالی به صورت جداگانه نیز با دقت بالایی عمل میکند و لذا می توان با اطمینان بالا در مورد نتایج حاصل از الگوریتم برای مساحت و درصد هر نوع از فضاهای خالی در یک تصویر نیز اظهار نظر کرد.



شکل ۵-۶- مقایسه دقت سه الگوریتم در شناخت فضای خالی منفرد

در این بخش عملکرد الگوریتم طراحی شده با تکیه بر اصول و مبانی زمین شناسی نفت بررسی شده است. در دیدگاه زمین شناسی نفت بر خلاف مطالعات پتروفیزیکی که مقدار دقیق کمی تخلخل حائز اهمیت است، مقدار دقیق و کمی هر نوع تخلخل کمتر مد نظر قرار می گیرد. بلکه معمولا بر اساس مرزهای از پیش تعیین شده ای بحث می شود. به عنوان مثال در دیدگاه زمین شناسی نفت سنگی که نسبت تخلخل مفید به غیرمفید آن بیشتر از یک باشد از نظر مخزنی در رده عالی رده بندی می شود حال آنکه هرچه این نسبت از یک کمتر باشد کیفیت مخزنی هم ضعیفتر می شود بطوری که در مقادیر نزدیک به صفر سنگ فاقد کیفیت مخزنی ارزیابی می شود. در مقابل هرچه این نسبت از یک بزرگتر باشد کیفیت هم بهتر خواهد بود. در مطالعه حاضر مجموع مقادیر تخلخل بین دانهای تخلخل مفید و مجموع تخلخل درون دانهای، حفرهای و ملدیک کامل و ملدیک ناقص تخلخل غیر مفید است. در جدول ۵–۱۱ تفسیری از کیفیت مخزنی نمونه های شماره یک تا ده که در شکل ۵–۸ نمایش داده

۵-۷- تحلیل و بررسی عملکرد الگوریتم از دیدگاه زمین شناسی نفت

شماره نمونه	کیفیت مخزنی
١	تخلخل مفید متوسط و از نظر کیفیت مخزنی مناسب است.
٢	تخلخل مفید و غیر مفید برابر هستند و کیفیت مخزنی متوسط انتظار می رود.
٣	تخلخل غیرمفید بیشتر از مفید است و کیفیت مخزنی ضعیف - متوسط انتظار می رود.
۴	تخلخل مفيد مشاهده نشد و لذا سنگ فاقد كيفيت مخزني است
۵	تخلخل مفيد و غير مفيد تقريبا يكسان و لذا كيفيت مخزني قابل قبولي انتظار مي رود.
۶	تخلخل مفید بالا و کیفیت مخزنی عالی انتظار می رود.
۷	تخلخل مفيد ناچيز و فاقد كيفيت مخزني انتظار مي رود.
٨	تخلخل مفید نه چندان بالا و کیفیت مخزنی ضعیفی انتظار می رود.
٩	تخلخل مفید بسیار بالا و کیفیت مخزنی مستعد و خوبی انتظار می رود.
١٠	تخلخل غیر مفید چند برابر مفید است و لذا کیفیت مخزنی ضعیف است.

جدول ۵-۱۱- توصيف كيفي نمونه هاي استفاده شده براي تست عملكرد الگوريتم

در ادامه نتایج بدست آمده از الگوریتم با تفاسیر ارائه شده در جدول ۵–۱۱ با هم مقایسه شده است. برای این منظور مقدار تخلخل مفید و غیر مفید بدست آمده بر اساس الگوریتم هوشمند و نسبت این دو مقدار در جدول ۵–۱۲ آمده است. بر اساس اطلاعات این جدول نتایج زیر برای کیفیت مخزنی قابل استخراج است. از آنجایی که بررسی های آماری نشان می دهد مدل تفکیک کننده خطی بهترین عملکرد را در تشخیص انواع مختلف فضاهای خالی داشته است، در این جدول فقط مقادیر تخلخل مفید و غیرمفید بدست آمده از تابع تفکیک کننده خطی نمایش داده شده است.

شماره نمونه	١	٢	٣	۴	۵	۶	٧	٨	٩	١٠
مقدار تخلخل مفيد	۳,۲۲	۶,۲۷	4,97	۶۷, ۶۷	۸,۸۱	11,88	۳۵, ۰	۲,۳۹	۶,۱	۲,۱۹
مقدار تخلخل غيرمفيد	۷,۵۴	۶,۱۵	۵,۵۱	18,90	10,49	۷,۷۱	۱۸,۹۰	۹,۳۸	۷,۰۲	9,41
نسبت تخلخل مفيد به	۴۲,	۱,۰۱	۰٫۸۴	۰,۰۴	۰٫۸۳	۱٫۵۱	۰,۰۲	۳۱, ۰	۰,۸۶	۰,۲۳
غيرمفيد										

جدول ۵-۱۲ مقدار تخلخل مفید، غیرمفید و نسبت تخلخل مفید و غیرمفید

مقایسه نتایج این جدول و جدول ۵–۱۱ نشان می دهد الگوریتم طراحی شده به خوبی می تواند سنگهای مخزنی کربناته را از نظر کیفی نیز رده بندی کند و بازتاب دقیقی از ارزش پتروفیزیکی زونهای مختلف ارائه کند. فصل ششم

بازسازی سه بعدی فضای متخلخل و شبیه سازی حرکت سیال

فصل ششم: بازسازی سه بعدی فضای متخلخل و شبیه سازی حرکت سیال

۶–۱– مقدمه

تعیین پارامترهای پتروفیزیکی و بررسی توزیع آنها در فواصل مخزنی، می تواند منجر به زون بندی جدید مخزن وتغییر ضخامت تولیدی میدان گردد. در بسیاری از میادین کشور، سال های متمادی است که برداشت ذخایر هیدروکربوری صورت میگیرد و ارزیابیهای انجام شده در گذشته نیاز به بازنگری و بررسی دارد تا دراینده برای برداشت از این میادین مفید واقع شوند. علارغم سهم بالای سنگ های کربناته در ذخیره کردن سیالات هیدروکربوری، تولید از آنها به سادگی تولید از سنگ مخازن ماسه سنگی نیست و غالبا با مشکلات و سختیهای خاص خود همراه است. این قبیل سختی ها حتى در مرحله مطالعه سنگ هاى كربناته به دليل بالا بودن ناهمگنى هم ظهور مىكند و از همان ابتدا تفاوت آنها را با سنگ های آواری مشهود مینماید. تخلخل و تراوایی از مهمترین خواص پتروفیزیکی مربوط به ذخیره سازی و انتقال سیالات در مخزن هستند. آگاهی دقیق از این دو ویژگی برای هر مخزن به همراه خواص سیال، جهت پیش بینی عملکرد آینده میدان لازم است. تاکنون روشهای مختلفی برای اندازه گیری و یا تخمین تخلخل و تراوایی سنگ مخزن ارائه شده است. در این مطالعه سعی شده تا با بکارگیری تصاویر مقاطع نازک به عنوان دادهای در دسترس و ارزان، فضای سه بعدی سنگ شبیه سازی شود. تواناییهای دو روش زنجیره مارکو مونته کارلو و تابع همبستگی عرضی ۲ برای بازسازی مدل سه بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای رسیدن به دقیق ترین جوابها، پارامترهای موثر بر فرآیند بازسازی سه بعدی بررسی شد. از آنجاییکه سنگ های کربناته ساختار متخلخل پیچیده تری در مقایسه با سنگ های آواری دارند، تلاش شد تا با پیاده سازی یک استراتژی جدید و تفکیک فضاهای خالی با اندازه های مختلف، از میزان پیچیدگی ساختاری کاسته شود. علاوه بر این با این روش می توان سهم اندازه های مختلف فضاهای خالی (اعم از میکرو، مزو و ماکرو) را در

¹ Markov chain Monte Carlo (MCMC)

² Cross correlation (CC)

تراوایی کل سنگ محاسبه نمود. در ادامه ابتدا به جزئیات مربوط به پیاده سازی و ارزیابی الگوریتم LBM پرداخته شده و عملکرد آن در یک فضای متخلخل نیمه پیچیده مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۲- شبیه سازی حرکت سیال با استفاده از روش شبکه – بولتزمن

در این مطالعه از روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی حرکت سیال در مدل های سه بعدی دیجیتالی استفاده شده است. روش شبکه بولتزمن ورژن توسعه یافته از تئوری جنبشی گازها در مدل شبکه ای گازی است که در آن حرکت پیچیده و پیوسته ذرات در مقیاس ماکروسکوپ به حرکت ساده و گسسته در مقیاس مزوسکوپیک تبدیل می شود (شکل ۶–۱). روش شبکه بولتزمن رفتار مشابه با مقیاس ماکروسکوپیک و فیزیک متناظر با مقیاس میکروسکوپیک سیالات را ارائه می کند.



شکل ۶-۱- نمایش مقیاس ماکروسکوپیک، مزوسکوپیک و میکروسکوپیک در سیالات. طراحی یک مدل شبکه بولتزمن از سه مرحله اصلی تشکیل می شود. در مرحله اول برخورد و جریان ذرات سیال با استفاده از تابع توزیع سرعت و با فرض سرعت گسسته برای هر شبکه محاسبه می شود. تابع توزیع سرعت با استفاده از مدل کلاسیک بهاتنگار –گروس –کروک^۱ بصورت زیر تعریف می شود:

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{[f_i(x, t) - f_i^{(eq)}(x, t)]}{\tau}$$
(1-8)

¹ Bhatnagar Gross Krook model

در این رابطه $f_i(x + e_i\Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t)$ مشخص کننده مولفه جریان ذرات و $f_i(x, t) = f_i(x, t)$ است. Δt است. $f_i^{(eq)}(x, t) = f_i^{(eq)}(x, t)$ است. همچنین τ معرف زمان آرامش و تابعی از لزجت سیال است و با استفاده از رابطه (۶–۲) محاسبه می شود:

$$\tau = \frac{V}{C_s^2 \Delta t} + 0.5 \tag{(Y-9)}$$

با استفاده از این رابطه سرعت حرکت سیال از حالت عدم تعادل به تعادل محاسبه می شود. فرض بر این است که برخورد ذرات سیال منجر به یک تعادل محلی خواهد شد. تابع توزیع تعادل یک بسط درجه دوم از تابع تعادل ماکسول – بولتزمن ^۱ است که فرم کلی آن بصورت رابطه (۶–۳) خواهد بود:

$$f_i^{eq} = \beta_i \rho \left[1 + \frac{3e_i u^{eq}}{C^2} + \frac{9}{2} \left(\frac{e_i u^{eq}}{C^2} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{u^{eq}}{C} \right)^2 \right]$$
(٣-۶)

در این رابطه β_{i} ضریب وزنی بوده و مقدار آن برای $\frac{1}{8} = \frac{1}{8}$ و $\beta_{1-6} = \frac{1}{18}$ و $\beta_{1-6} = \frac{1}{36}$ قابل جایگذاری است. همچنین در این رابطه C سرعت مبنا در شبکه ها است که برای مدل های سه بعدی فضای متخلخل برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه که فضای های متخللخل بصورت سه بعدی بازسازی شده اند لذا در این مطالعه از روش شبکه بولتزمن سه بعدی استفاده شده است. در این روش وضعیت حرکت ذرات در سه بعد و نوزده جهت (D3Q19) بررسی و شبیه سازی می شود (شکل ۶-۲). همچنین مقادیر i⁹ یا همان بردارهای سرعت هم بصورت یک ماتریس با سه ردیف و نوزده ستون تعریف شده است که بترتیب مشخص کننده o⁹ تا e¹ و در سه جهت X و Y و Z بترتیب در ردیف های اول، دوم و سوم است.

[\] Maxwell–Boltzmann

حرکت جریان در این رابطه در صورتیکه نسبت اختلاف میانگین بردارهای سرعت دو تکرار متوالی به حاصلضرب ابعاد مدل کمتر از ^{۱۰-۱۰} باشد، جریان پایدار ^۱ فرض می شود. برای اطمینان از اینکه حرکت سیال به حالت پایدار رسیده و نتایج بدست آمده متعلق به حالت حرکت پایدار سیال است، تعداد تکرارهای الگوریتم ^۸۰۱×۵ بار در نظر گرفته شده است. حداکثر سرعت جریان پوازی ورودی^۲ (U_{max}) نیز ۱/۰ در نظر گرفته شد. در سایر مرزهای مدل سه بعدی شرایط مرزی بدون لغزش^۳ فرض شده است. مقدار زمان آرامش ۱ فرض شده که معادل گرانروی ۱/۰۶ است.



شکل ۶-۲- مدل شبکه بولتزمن در سه بعد و ۱۹جهت حرکت ذرات (D3Q19)

¹ Steady state

² Maximum velocity of Poiseuille inflow

³ No-slip boundary condition

۶–۲–۱– شبیه سازی حرکت سیال در لوله

ابعاد مدل سه بعدی بصورت T = 1 و R = 7 و $N_Z = 7$ ، $N_Y = 07$ ، $N_X = 07$ و شرایط مرزی در جهت Z از نوع نوسانی⁷ در نظر گرفته شده است. شکل ۶–۳(الف) نمایش شماتیک از لوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از لوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک از اوله و شکل ۶– T (الف) نمایش شماتیک و شرایط مرزی در مواجع عرضی از اوله را نشان می دهد.



شکل ۶–۳- نمایش شماتیک از (الف) لوله و (ب) توزیع شار سیال در مقطع عرضی لوله

¹ Poiseuille flow analytical solution

² Periodic boundary condition

همچنین روند حرکت سیال در لوله در بازه های زمانی مختلف در شکل ۶-۴ نمایش داده شده است. با توجه به شکل می توان گفت با افزایش بازه زمانی نتایج مدل شبکه بولتزمن از حرکت ذرات سیال به پاسخ تحلیلی حرکت سیال در لوله نزدیکتر شده و نهایتاً در بازه زمانی^۱ ۴۰۰۰ کاملا منطق با آن خواهد شد. این شکل علاوه بر اینکه صحت عملکرد مدل بولتزمن در شبیه سازی حرکت سیال در لوله را نشان می دهد، همچنین ثابت می کند در روش شبکه بولتزمن برای رسیدن به پاسخ مطلوب بایستی بازه زمانی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود تا حرکت سیال به حالت پایدار برسد. در صورتیکه بازه زمانی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود تا حرکت سیال به حالت پایدار برسد. در مورتیکه بازه زمانی بزرگتر از مقدار لازم هم فرض شود مدل از حالت همگرایی خارج نخواهد شد (۱۲۵–۸۰۰۰). شکل ۶–۵ پاسخ نهایی LBM برای حرکت سیال در لوله را نمایش می دهد که توزیع شار جریانی در بخشهای نزدیک به لوله شدت بیشتری در مقایسه با بخش های نزدیک به دیواره لوله داشته است و این بدین معنی است که سیال تمایل بیشتری به حرکت در بخش مرکزی لوله داشته است.

این واقعیت در فضای متخلخل به این شکل تعبیر می شود که شار جریان در بخش های نزدیک به دیواره حفرات کمتر است و تمایل سیال به نحوی است که در مسیر گلوگاه های بزرگتر حرکت کند. در ادامه به شبیه سازی حرکت سیال در یک فضای متخلخل نیمه پیچیده پرداخته شده است که نتایج محاسبات تحلیلی آن برای محاسبه تراوایی موجود است. در صورتیکه کد نوشته شده بتواند برای این فضا نتایج قابل قبولی ارئه کند، می توان اطمینان داشت که در مواجه با یک فضای متخلخل پیچیده نیز عملکرد درستی خواهد داشت.

¹ Time step



شکل ۶-۴- روند حرکت سیال در لوله در بازه های زمانی مختلف



شکل ۶-۵- خروجی نهایی روش شبکه بولتزمن برای حرکت سیال در لوله

۶-۲-۲- شبیه سازی حرکت سیال در فضای متخلخل نیمه پیچیده در این بخش عملکرد کد شبکه بولتزمن در یک مدل مکعبی به ابعاد ۴۸×۴۸×۴۸ ارزیابی خواهد شد. یک کره کامل در مرکز و هشت سکتور برابر از کره (مجموعه دو کره در کل مکعب وجود دارد) در گوشه های مکعب قرار گرفته است و مابقی فضای آن خالی است (شکل ۶-۶). این آرایش به مکعب مرکز پر^۱ (BCC) معروف است. به دو دلیل از این مدل برای ارزیابی کد نوشته شده استفاده شده است. دلیل اول وجه شباهتی است که بین یک فضای متخلخل و مجموعه کره هایی است که در کنار هم چیده شده اند. در فرآیند شبیه سازی شبکه تخلخل سه بعدی یک فضای خالی نیز از این مفهوم

¹ Body centred Cubic

استفاده می شود و برای ساده سازی فضاهای خالی را بصورت کره هایی که از مرکز بهم متصل هستند، فرض میکنند. دلیل دوم در استفاده از این مدل وجود حل تحلیلی حرکت سیال در اطراف کره است. اولین بار سنگانی و اکریووس^۱ (۱۹۸۲) حل تحلیلی محاسبه تراوایی در این مدل را به شرحی که در رابطه (۶-۴) آمده ارائه کردند.

$$K = \frac{L^3}{6\beta\pi a C_d} \tag{(-9)}$$

 β در این رابطه K و L و L بترتیب تراوایی، شعاع کره و واحد طول ضلع مکعب هستند. همچنین مشخص کننده تعداد کرههای داخل مکعب به ضلع L است که در نمونه مورد استفاده برابر با ۲ است. برای محاسه C_d از رابطه (β -۵) استفاده می شود:

$$C_d = \sum_{n=0}^{30} \alpha_n X^n \tag{\Delta-P}$$

در این رابطه αn ضرایبی هستند که با نحوه چینش و قرارگیری کره ها در مکعب تغییر می کنند. سنگانی و آکریووس (۱۹۸۲) مقدار این ضرایب را برای مدل BCC محاسبه و در جدولی منتشر کرده اند. همچنین X نیز تابعی از حجم بخش جامد مکعب (c) است که به قرار (۶–۶) محاسبه می شود:

$$X = (c / c_{\text{max}})^{0.33}$$
 (9-9)

در این رابطه C_{max} مشخص کننده بیشترین حجم جامد بر اساس آرایش قرارگیری کرهها است که با استفاده از ماکزیمم شعاع کره در یک مکعب به ضلع L بدست می آید. در آرایش BCC مقدار c_{max} برابر با ۸۵/۱۷۵ است. نهایتاً مقدار c بر اساس شعاع کره میانی و طول ضلع مکعب محاسبه می شود. در این مطالعه طول ضلع مکعب ۴۸، شعاع کره ۱۷/۶ در نظر گرفته شد که بر این اساس مقدار تخلخل مکعب و c بترتیب ۸۵/۰ و ۱۲/۶۰۰ بدست می آید. بعد از شبیه سازی حرکت سیال با کد LBM پیاده شده در نرم افزار متلب، مقدار تراوایی بدست امده از کد (KLBM) برابر KLBM) برابر LBM

¹ Sangani and Acrivos
شد. همچنین مقدار تراوایی محاسبه شده با رابطه سنگانی و آکریوسس (K_{Sangani}) برای مدل استفاده شده برابر با ۶/۴۷۰۲۷۴ است. اختلاف ناچیز مقدار تراوایی تحلیلی و تراوایی تخمینی با LBM نشان می دهد که کد نوشته شده می تواند در محیطهای که از نظر توزیع فضای خالی پیچیده باشند هم عملکرد قابل قبولی داشته باشد.



شکل ۶-۶- نمایش شماتیک از فضای متخلخل نیمه پیچیده.

شکل ۶–۷ توزیع بردارهای سرعت، اندازه سرعت و خطوط جریان را در دو لایه از مکعب BCC نمایش می دهد. سه تصویر بالایی مربوط به لایه اول و سه تصویر پایینی مربوط به لایه ۲۳–ام از این مکعب می دهد. سه تصویر بالایی مربوط به لایه اول و سه تصویر پایینی مربوط به لایه ۳۳–ام از این مکعب هستند. شکل ۶–۷ (الف) و (ب) نشان می هد که بیشترین تمایل سیال به حرکت در فضای میانی لایه که خالی است بوده و بیشترین مقدار سرعت نیز در این قسمت بوده است. در مقابل در لایه ۳۳–ام برداره بردارهای سرعت با نزدیک شدن به کره (می ایف می در این قسمت بوده است. در مقابل در لایه ۳۳–ام برداره بردارهای سرعت با نزدیک شدن به کره (که نقش مانع را ایفا می کند) تغییر مسیر داده و به دو طرف متمایل شده اند و این دقیقا همان حالتی است که در واقعیت حادث می شود. شکل ۶–۷ (و) نشان می دهد که مقدار سرعت در بخشهایی که با کره پر شده صفر است و این به معنی عدم وجود جریان در این نقاط است. نهایتاً شکل ۶–۷ (ه) تغییر مسیر خطوط جریان در تقابل با کره را نمایش داده در این.



شکل ۶-۷- نمایش شماتیک توزیع (الف) و (د) بردارهای سرعت ، (ب) و (و) مقدار سرعت و (ج) و (ه) خطوط جریان در (بالا) لایه اول و (پایین) لایه ۲۳-ام از مکعب BCC

شبیه سازی حرکت سیال در لوله و فضای متخلخل نیمه پیچیده نتایج امیدوار کننده ای از عملکرد کد نوشته شده LBM ارائه نمود. با در نظرگرفتن دقت الگوریتم در رسیدن به نقطه پایدار برای حرکت سیال، شناخت دقیق موانع در مسیر حرکت و اتخاذ تصمیم درست در انتخاب مسیر مناسب برای عبور از آنها می توان امیدوار بود در تقابل با فضای متخلخل پیچیده نیز پاسخ درستی ارایه خواهد کرد. شایان ذکر است که مقدار خروجی کد LBM مشخص کننده میانگین مقدار بردارهای سرعت در تمام وکسل های مدل سه بعدی بعد از رسیدن به جریان پایدار خواهد بود که بایستی به میلی دارسی تبدیل شود. برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۶-۷) مقدار میانگین بردارهای سرعت به واحد شبکه تبدیل می شود:

$$\left(\text{شبكه} \right) = \frac{\frac{(K_{LMB} \times \text{Vis})}{C_s}}{delta}$$

در این رابطه KLBM، گرانروی وحاصلضرب ابعاد مدل در این رابطه Vis، KLBM، گرانروی وحاصلضرب ابعاد مدل هستند. همچنین مقدار delta نیز مشخص کننده حداکثر نیرویی است که در هر تکرار به کل مجموعه وارد میشود تا حرکت سیال ادامه یابد که در این مطالعه $^{-1}$ فرض شده است. علت استفاده از این مقدار حفظ پایداری حرکت سیال است. مقدار واحد شبکه با استفاده از رابطه ($^{-1}$) به تراوایی (بر حسب مترمربع) تبدیل می شود:

 $\left($ مترمربع $\right) = [\left($ مساحت هر پیکسل × $\left($ سرعت به واحد شبکه $\right)] = تراوایی \left($ مترمربع $\right) = 10^{-12}$

مقدار بدست آمده برای تراوایی بر حسب مترمربع با استفاده از رابطه (۶-۹) به تراوایی بر حسب میلی دارسی تبدیل می شود:

۶–۳– الگوریتم های بازسازی مدل سه بعدی سنگ

در این مطالعه از دو روش زنجیره مارکو-مونته کارلو^۱ و تابع همبستگی عرضی^۲ برای شبیه سازی فضای متخلخل سه بعدی استفاده شده است. هر یک از این دو روش از اصول و قواعد متفاوتی برای بازسازی فضای متخلخل استفاده می کنند. الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو به سه تصویر و الگوریتم تابع همبستگی به یک تصویر برای بازسازی فضای متخلخل نیاز دارد. دو الگوریتم فوق الذکر در نرم افزار متلب پیاده سازی شده اند و در ادامه اعتبارسنجی و کنترل عملکرد کدهای نوشته شده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای تاثیرگذار بر بازسازی و دقت مدل های دیجیتالی بحث خواهند شد.

برای بازسازی فضای متخلخل با استفاده از الگوریتم همبستگی عرضی فقط نیاز به یک تصویر دو بعدی از سنگ است. این تصویر می تواند یک تصویر مقطع نازک و یا یک برش از تصویر اسکن شده

¹ Markov chain Monte Carlo (MCMC)

² Cross correlation (CC)

سنگ توسط میکروسکوپ الکترونی باشد. در مرحله اول به منظور ارزیابی و تست عملکرد الگوریتم CCSIM و شناخت یارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد الگوریتم از مدل دیجیتالی ماسه سنگ بریا استفاده شد. پس از شناخت پارامترهای تاثیرگذار و کنترل درستی عملکرد الگوریتم از آن برای بازسازی لایه های یک نمونه دیجیتالی کربناته با نام C1 استفاده خواهد شد. تصاویر سه بعدی این نمونه ها در آزمایشگاه علوم زمین امیریال کالج لندن تهیه شده و از سایت این دانشکده^۲ قابل دانلود است. این مدلهای دیجیتالی از نمونه واقعی سنگ و توسط دستگاه توموگرافی اشعه ایکس تهیه میشوند و به دلیل دسترسی رایگان و همچنین شناخت نسبتا دقیقی که از ساختار فضای متخلخل آن و چگونگی حرکت سیال در خلل و فرج های سنگ وجود دارد، توسط محققین برای تست مدل های بازسازی کننده استفاده میشوند. مدل بریا یک ماسه سنگ هموژن است که توزیع اندازه فضاهای خالی آن وسیع نیست و غالب فضاهای خالی از نوع بین دانه ای هستند. تخلخل سنگ ۱۹/۹ ٪ و تراوایی مطلق آن نیز در راستای y ،x و z بترتیب ۱۳۶۰ mD ،۱۳۶۰ و ۱۱۹۳ mD است که با این حساب می توان تراوایی میانگین آن را ۱۲۸۶ mDدر نظر گرفت. به لطف ارتباط خوب فضاهای خالی در این سنگ و بسته نشدن گلوگاه ها با سیمان سیلیسی یا کربناته، تراوایی ماسه سنگ بریا بالاست (دونگ، ۲۰۰۷). شکل ۶–۸ نمایش شماتیک از ساختار فضای خالی در ماسه سنگ بریا و همچنین سه لایه بیرونی این مکعب دیجیتالی در راستای صفحات xz ، xz و xy را نمایش می دهد. همچنین شکل ۶–۹ نمودار فراوانی تخلخل در اسلایس های تشکیل دهنده مدل دیجیتالی ماسه سنگ بریا را در سه راستا و در ده بازه مختلف نمایش می دهد. با توجه به این شکل و مقدار کمینه و بیشینه تخلخل در سه راستا، می توان مهر تایید دیگری بر هموژنتی و ایزوترویی ماسه سنگ بریا زد.

' Berea

² https://www.imperial.ac.uk/earth-science/research

[&]quot; Dong



شکل ۶-۸- نمایش شماتیک از مدل سه بعدی ماسه سنگ بریا که در (الف) که فضای متخلخل به رنگ آبی و در (ب) فضای متخلخل به رنگ زرد مشخص شده است. (ج) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه XZ، (د) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه YZ و (و) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه XY



در این تحقیق برای ارزیابی بهتر و دقیقتر الگوریتم CCSIM و شناخت پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند شبیه سازی، ابتدا مدل ماسه سنگ بریا که به مراتب در مقایسه با کربناته ها ساده تر است، استفاده و سیس برای مطالعات تکمیلی و شناخت ضعفهای احتمالی الگوریتم از مدل کربناته C1 کمک گرفته شد. در مقابل نمونه C1 یک سنگ کربناته هتروژن است که با توجه به تراوایی نسبتا بالای آن به نظر می رسد ارتباط خوبی بین فضاهای خالی در آن وجود دارد. شکل ۶–۱۰ نمایش شماتیک از ساختار فضای خالی در نمونه C1 و همچنین سه لایه بیرونی این مکعب دیجیتالی در راستای صفحات yz ،xz و xy را نمایش می دهد. ابعاد این نمونه دیجیتالی ۴۰۰×۴۰۰+۴۰۰ است و درجه تفکیک آن ۲/۹ میکرون برای هر وکسل است. تخلخل کل و تراوایی مطلق آن نیز در راستای x، y و z بترتیب ۲۳/۳ ٪ ، ۱۴۶۹ mD ،۷۸۵ mD و ۱۰۵۳ mD است. همچنین تراوایی کل سنگ که از میانگین تراوایی در سه راستا بدست آمده نیز برابر ۱۱۰۲ mD محاسبه شده است (دونگ، ۲۰۰۷). شکل ۶-۱۱ نمودار فراوانی تخلخل در اسلایس های تشکیل دهنده مدل دیجیتالی C1 را نمایش می دهد. بیشترین فراوانی تخلخل در راستای محور X در محدوده ۱۵ ٪ بوده و تقریبا نیمی از اسلایس های این مدل در راستای X تخلخل کمتر از ۲۵ ٪ را نشان داده است. در مقابل در راستای Y غالب اسلایس ها تخلخل در محدوده ۲۴ ٪ داشته اند و در پاره ای موارد تخلخل بالاتر از ۳۰ ٪ نیز وجود دارد. این مهم می تواند دلیلی بر تراوایی بالای مدل C1 در راستای Y باشد. مقایسه سه نمودار گواه آن مورد است که این نمونه در سه راستا رفتار متفاوتی در عبور سیال از خود خواهد داشت و این مهم در مقادیر بدست آمده برای تراوایی مطلق که در بالا آمد، عیان می شود. با توجه به شکل می توان گفت در راستای X بیشترین فراوانی تخلخل در سایت ازمایشگاه علوم زمین امپریال کالج فایل مربوط به مدل سه بعدی دو سنگ کربناته به نام های C1 و C2 قرار گرفته است که علاوه بر درجه تفکیک بهتر تصویربرداری برای نمونه C1، تراوایی نمونه C2 هم پایین گزارش شده و لذا در این مطالعه نمونه C1 مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۶-۱۰- نمایش شماتیک از مدل سه بعدی کربناته C1 که در (الف) که فضای متخلخل به رنگ آبی و در (ب) فضای متخلخل به رنگ زرد مشخص شده است. (ج) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه XZ، (د) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه YZ و (و) لایه اول مدل سه بعدی در راستای صفحه XY



C1 شکل 8-۱۱- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه کربناته

۶-۴- بازسازی فضای متخلخل با استفاده از الگوریتم CCSIM

برای کنترل عملکرد الگوریتم CCSIM لایه اول در راستای صفحه XZ (شکل ۶–۸(ج)) از مکعب دیجیتالی بریا برداشت شده و به عنوان تصویر آموزشی استفاده گردید. همانطور که در معرفی مبانی الگوریتم CCSIM آمد، عملکرد این الگوریتم در حالت غیر شرطی که از داده تحمیلی استفاده نشود فقط تحت تاثیر اندازه شابلون اسکن کننده و اندازه ناحیه همپوشانی خواهد بود. در این بخش ابتدا تاثیر این دو پارامتر را بر نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار خواهیم داد. تصاویر بازسازی شده در شرایط متفاوت از یک تصویر واحد آموزشی از با در نظر گرفتن پارامترهای شبکه تخلخلی با هم مقایسه شده اند.

8-۴-۲ – تاثیر اندازه شابلون اسکن کننده

شابلون اسکن کننده در واقع یک شبکه مستطیل شکل فرضی است که تصویر آموزشی را اسکن میکند و تمامی احتمالات ممکن از رویداد داده را ثبت می کند. الگوریتم CCSIM در مرحله بازسازی از این احتمالات برای بازسازی یک لایه جدید استفاده می نماید. هر چه اندازه شابلون اسکن کننده کوچکتر باشد زمان شبیه سازی لایه جدید بیشتر خواهد بود. در این بخش به بررسی اندازه شابلون اسکن کننده بر نتایج الگوریتم CCSIM خواهیم پرداخت. حداقل مساحت شابلون ۶۱ پیکسل است. به عبارت دیگر با توجه به مربعی بودن شابلون، حداقل اندازه هر ضلع آن ۴ پیکسل خواهد بود. مساحت شابلون بایستی همیشه زوج باشند. در مرحله اول برای بررسی اندازه شابلون، مساحت ناحیه همپوشانی برابر ۸ پیکسل و ثابت فرض شده و سه بار بازسازی با شابلون های با اندازه ۶۱، ۳۶ و ۴۶ انجام شده است. شکل ۶–۱۲ سه لایه بازسازی شده با مساحت شابلون ۶۱ را نشان می دهد. در هر مرحله تصویر جدید بر اساس تصویر مرحله قبل بازسازی شده است. به طور مشابه با مرحله قبل، بازسازی با شابلون به مساحت ۶۳ انجام شده است. شکل ۶–۱۳ سه لایه بازسازی شده با مساحت شابلون ۳۶ را نشان می دهد. شکل ۶–۱۴ سه لایه بازسازی شده با مساحت شابلون ۶۴ را نشان می دهد.

برای انتخاب مقدار بهینه اندازه شابلون تصاویر بازسازی شده توسط الگوریتم CCSIM از دیدگاه ساختار شبکه ای و پارامترهای استاتیک فضاهای خالی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور شاخصه های اندازه بزرگترین و کوچکترین فضای خالی، میانگین اندازه و میانگین شعاع فضاهای خالی، نسبت اتصالات خلل و فرجها، میانگین قطر و طول گلوگاهها و تخلخل کل در لایه های بازسازی شده محاسبه شدند^۱. نتایج بدست آمده در جدول ۶–۱ نمایش داده شده است.

^۱ مراحل و جزئیات طراحی الگوریتم استخراج کننده پارامترهای ساختار شبکه فضاهای خالی و گلوگاه های متصل کننده آنها در پیوست ۱ آمده است.



شکل ۶–۱۲– بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۱۶. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.



شکل ۶–۱۳– بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۳۶. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.



شکل ۶–۱۴– بازسازی ۳ لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با شابلون اندازه ۶۴. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.

مقایسه نتایج بدست آمده مشخص میکند که لایه های بازسازی شده با اندازه شابلون ۳۶ بیشترین همخوانی و قرابت را با تصویر آموزشی دارند. در لایه های بازسازی شده با شابلون ۱۶ مقدار میانگین شعاع فضاهای خالی، نسبت اتصالات و تخلخل کل افزایش داشته و از آنجاییکه در هر مرحله لایه ۱–۱ به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود، این روند در لایه های ۱۰ به بعد باعث خطای بالای مدل خواهد شد و نهایتاً تصویر بازسازی شده در این لایه ها نه تنها هیچ همخوانی با تصویر آموزشی اولیه (که به عنوان معرف فضای متخلخل است) نخواهد داشت بلکه هیچ شباهتی به یک فضای متخلخل هم نمیتوان در آن دید. در شکل ۶–۱۵ لایه نهم و دهم بازسازی شده با شابلون اندازه ۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶–۱۵– لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۱۶ (فضای خالی به رنگ سفید است)

بررسی پارامترهای مربوط به شبکه فضای خالی لایه های بازسازی شده با اندازه شابلون ۳۶ نشان می دهد که روند معقولی طی شده است و هیچ یک از پارامترها تفاوت معناداری با تصویر آموزشی ندارند. در شکل ۶–۱۶ لایه های نهم و دهم بازسای شده با اندازه شابلون ۳۶ نمایش داده شده است. اگرچه مقایسه کیفی تصاویر با تصویر آموزشی نشان می دهد که یکسری الگوها بیش از اندازه در تصاویر تکرار شده اند ولی با در نظر گرفتن میانگین پارامترهای شبکه تخلخل، می توان تصویر تولید شده را به عنوان یک لایه قابل استناد به فضای متخلخل در نظر گرفت.



شکل ۶–۱۶– لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۳۶ (فضای خالی به رنگ سفید است)

نهایتاً بررسی پارامترهای شبکه ای فضای متخلخل در لایه های بازسازی شده با شابلون ۶۴ مشخص می کند که مقادیر بدست آمده کمتر از مقادیر محاسبه شده در تصویر آموزشی است. ادامه این روند در بازسازی لایه های بعدی باعث می شود تا الگوریتم نتواند بازتاب مناسبی از فضای خالی مدنظر ارایه نماید. در شکل ۶–۱۷ لایه های نهم و دهم بازسازی شده با اندازه شابلون ۶۴ نمایش داده شده است. مقایسه کیفی دو لایه متوالی با هم نشان می دهد که یک الگو بصورت گسترده ای تکرار شده است. این مهم گویای آنست که الگوریتم CCSIM در مرحله ثبت رویدادهای داده مربوط به تصویر آموزشی نتوانسته شناخت دقیقی از توزیع انواع رویداد داده بدست آورد. بزرگ بودن اندازه شابلون در مقایسه با اندازه تصویر و اندازه فضاهای خالی آن یکی از دلایل این رخداد است. نهایتاً با در نظر گرفتن مطالب فوق الذکر اندازه شابلون ۳۶ به عنوان مقدار بهینه برای بازسازی در تصاویر مربوط به



شکل ۶-۱۷- لایه نهم و دهم بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM با اندازه شابلون ۶۴ (فضای خالی به رنگ سفید است)

مساحت شابلون (پیکسل)	تصوير	بزرگترین فضا (2^mm)	میانگین فضا (2^سلم)	کوچکترین فضا (2^mμ)	میانگین شعاع (mµ)	نسبت اتصالات	ميانگين قطر گلوگاه (mm)	میانگین طول گلوگاه (mn)	تخلخل (٪)
	آموزشى	80878	6.14	۵۷	۳۱	٠/١۵	۲۳/۸	147	70/81
	لايه ۱	88060	69.4	۵۷	۳۰	۰/۲۱	۲۳/۴	147	78/97
18	لايه ۲	88060	۶۸۵۱	١٩٩	۳۵	•/١٩	۲۳/۵	188	22/22
	لايه ۳	8806.	7475	١٩٩	۳۷	۰/۳۳	7 <i>4</i> /V	10.	24/12
	لايه ۱	8806.	8.90	۵۷	۳۲	•/\\	22/2	188	19/88
۳۶	لايه ۲	8806.	٧٠۶۵	۵۷	34	•/14	۳٣/٨	101	۲۰/۵۸
	لايه ۳	88060	४०९४	۵۷	٣٣	•/١٢	47/21	170	۲۰/۳۷
	لايه ۱	22060	4991	۵۷	۲۸	٠/١٣	۱۷/۵	۱۵۸	۱۷/۹۱
84	لايه ۲	8806.	4801	۵۷	78	•/ \ \	۱۳/۸	107	11/16
	لايه ۳	8804.	۵۰۶۹	٨۵	۲۷	•/17	١٨/١	۱۵۸	۱۵/۰۹

جدول ۶-۱- نتایج حاصل از ساختار شبکه ای لایه های بازسازی شده با استفاده از CCSIM

۶–۴–۲– تاثیر اندازه ناحیه همپوشانی

در زمان بازسازی هر بخش از تصویر جدید، به منظور حفظ ارتباط بین فضاهای خالی در دو بعد یک ناحیه همپوشانی بین بخش در حال ساخت با بخش قبلی آن در نظر گرفته می شود، که به این فضا، ناحیه همپوشانی گفته می شود. اندازه ناحیه همپوشانی نیز مشخص کننده میزان همپوشانی دو قطعه متوالی در فرآیند شبیه سازی است. بر خلاف آنچه برای اندازه شابلون گفته شد، هرچه اندازه مساحت همپوشانی کوچکتر باشد، زمان شبیه سازی یک لایه کمتر خواهد بود؛ علت این امر هم در این مهم نهفته است که محاسبات مربوط به مقدار شبیه سازی فقط برای ناحیه همپوشانی انجام می شود و هرچه این ناحیه کوچکتر باشد، حجم و میزان محاسبات کمتر خواهد بود. در الگوریتم CCSIM طراحی شده، حداقل اندازه ناحیه همپوشانی ۸ پیکسل است و مساحت آن بایستی همیشه یک عدد زوج باشد. در زمان استفاده از الگوریتم CCSIM علاوه بر رعایت مقدار حداقلی مساحت مساحت ناحیه همپوشانی و شابلون اسکن کننده و زوج بودن مقادیر آنها، بایستی به این نکته هم دقت کرد که این عدد زوج بتواند در نتیجه حاصلضرب دو عدد زوج ایجاد شود؛ به عبارت دیگر ابعاد آنها نیز زوج باشند. به عنوان مثال اعدادی دنباله عددی ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۲، ۲۶، ۳۰ و ... قرار میگیرند، نمی توانند به عنوان مقدار همپوشانی و شابلون اسکن کننده انتخاب شوند. در این بخش به بررسی تاثیر اندازه ناحیه همپوشانی بر فرآیند شبیه سازی لایه جدید پرداخته شده است. اندازه شابلون اسکن کننده ۳۶ ناحیه همپوشانی بر فرآیند شبیه سازی لایه جدید پرداخته شده است. اندازه شابلون اسکن کننده ۲۶ راثابت) و برای ناحیه همپوشانی مقادیر ۱۲، ۱۶ و ۲۰ در نظر گرفته شد. شکل ۶–۱۹ و ۶–۱۹ و ۶–۲۰ بترتیب نتایج بدست آمده برای بازسازی سه لایه متوالی با همپوشانی ۱۲، ۱۶ و ۶۰ را نشان می دهد. در ادامه با بررسی پارامترهای شبکه تخلخل هریک از این تصاویر به بررسی میزان شباهت لایه ها با تصویر آموزشی پرداخته خواهد شد (جدول ۶–۲).



شکل ۶–۱۸– بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۱۲. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.



شکل ۶–۱۹– بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۱۶. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.



شکل ۶-۲۰- بازسازی سه لایه با استفاده از الگوریتم CCSIM با همپوشانی ۲۴. (الف) سمت چپ تصویر آموزشی اولیه برگرفته از مکعب دیجیتالی بریا و تصویر راست بازسازی شده است. (ب) و (ج) تصویر چپ به عنوان تصویر آموزشی برای بازسازی تصویر.

			- , ,		,	,	•		
مساحت ناحیه همپوشانی (برکسل)	تصوير	بزرگترین فضا (mu)	میانگین فضا (mµ)	کوچکترین فضا (mµ)	میانگین ش ع اع (my)	نسبت اتصالات	میانگین قطر گلوگاه (mn)	میانگین طول گلوگاه (mu)	تخلخل (٪)
(پيانس)	آموزشي	8.818	۶۰۷۸	۵۷	۳۱	٠/١۵	۲۳/۸	147	۲۰/۶۱
	لايه ۱	8806.	8.90	۵۷	٣٢	•/\٨	۲۳/۲	١٣٣	19/88
٨	لايه ۲	8806.	۲۰۶۵	۵۷	34	•/14	۳٣/٨	101	۲۰/۵۸
	لايه ۳	8806.	٧٠٩٢	۵۷	٣٣	•/17	41/21	180	۲۰/۳۷
١٢	لايه ۱	41787	۶۱۹۵	١٧١	۳۱	•/\\	۳۳/۴	١٧٧	۱۷/۰۳
	لايه ۲	84911	۵۵۷۸	111	29	•/•۶	74/4	١٢٢	۱۵/۵۸
	لايه ۳	84989	۵۵۲۰	۵۷	۲۸	•/•۶	۶۵/۰۳	1.8	14/40
	لايه ۱	71117	4907	۵۷	۲۵	•/•٣	17/47	۵۵	13/46
18	لايه ۲	20828	4809	270	78	•/• ٧	47/18	188	11/80
	لايه ۳	29883	0.41	۵۷	78	•/•٧	34/41	1	۱۰/۹۲
74	لايه ۱	81880	5195	۵۷	٣٠	•/•۶	22/18	١١٩	Y/AY
	لايه ۲	8818	1447	347	۱۵	•	•	•	۳/۰۲
	لايه ۳	4408	4409	4409	34	•	•	•	•/74

جدول ۶-۲- نتایج بدست آمده از ساختار شبکه ای لایه های بازسازی شده با استفاده از CCSIM

جدول ۶–۲ مقادیر پارامترهای شبکه تخلخل برای لایه های بازسازی شده بر اساس مساحت همپوشانی ۱۲، ۱۶ و ۲۴ را نمایش می دهد. مقایسه نتایج هریک از تصاویر با پارامترهای تصویر آموزشی نشان می دهد که لایه های بازسازی شده با استفاده از همپوشانی ۸ و شابلون ۳۶ پیکسلی نزدیکتر به پارامترهای شبکه تخلخل در تصویر آموزشی هستند. به نظر میرسد هرچه اندازه ناحیه همپوشانی افزایش یابد دقت الگوریتم در بازسازی لایه های دوم و سوم به شدت کاهش مییابد. بطوریکه در شکل ۶–۲۰ مشخص است لایه دوم و سوم هیچ شباهتی به فضای متخلخل ندارند و هیچ

۶-۴-۴ به دام افتادن الگوریتم در الگوهای تکراری

الگوریتم CCSIM مبتنی بر انتخابهای تصادفی با فرض وجود شباهت حداکثری در ناحیه همپوشانی است. در صورتیکه میزان مشابهت چند الگوی متفاوت در یک بخش با هم برابر باشد، الگوریتم یکی از الگوها را به تصادف انتخاب می کند. در صورتی که از شبیه سازی با رویکرد متوالی استفاده شود، در برخی موارد اشتباهات اساسی در شبیه سازی ها مشاهده میشود؛ بطوریکه یک الگو که در لایه n تکرار زیادی داشته باشد، شانس بسیار بالاتری برای حضور در لایه بعدی پیدا می کند و این امر سبب میشود تا لایه های بعدی بر اساس تعداد بسیار محدودی الگو بازسازی شوند. در شکل ۶–۲۱ نمونه ای از این اشتباه نمایش داده شده است که از لایه چهارم به بعد، لایه ها بسیار شبیه بهم و بازسازی شده بر اساس یک الگو هستند. برای این منظور لازم است در صورتیکه از رویکرد بازسازی متوالی استفاده می شود، فرآیند شبیه سازی با الگوریتم CCSIM بصورت تحت نظارت انجام شود و در صورتیکه لایه بازسازی شده متشکل از یک الگوست، بازسازی مجدد برای آن انجام گیرد. یکی از دلایل بوجود آمدن است که می توان با تعیین مقادیر میه ام ادازه شابلون اسکن کننده و مساحت ناحیه همپوشانی است که می توان با تعیین مقادیر بهینه، احتمال این رخداد را به حداقل رساند. راهکار دیگر آستانه-گذاری بر روی تعداد الگوهای رویداد داده در هر مرحله از بازسازی است که به کمینه کردن احتمال این رخداد کمک می کند.



شکل ۶–۲۱- تکرار یک الگو از لایه چهارم در فرآیند بازسازی متوالی

۶-۴-۴-۱ ارزیابی عملکرد الگوریتم CCSIM در بازسازی فضای متخلخل نمونه ماسه سنگ بریا بعد از محاسبه مقدار بهینه اندازه شابلون و ناحیه همپوشانی، فرآیند بازسازی فضای متخلخل ماسه سنگ بریا با استفاده از الگوریتم CCSIM انجام گرفت. برای این منظور از تصویر اول در راستای XY استفاده شد و با روش بازسازی متوالی شبیه سازی شد که با کنار هم قرار گرفتن لایه های بازسازی شده که از نظر ساختاری روند درستی در بازسازی آنها لحاظ شده بود، یک مکعب دیجیتالی به ابعاد ۴۰۰×۴۰۰×۴۰۰ بدست می آید. شکل ۶–۲۲ نه لایه از مکعب بازسازی شده و نمای کلی از آنرا نمایش میدهد. شکل ۶–۲۳ نمودار فراوانی تخلخل در اسلایس های مدل بازسازی شده ماسه سنگ بریا را در سه راستا نمایش می دهد. مقایسه این نمودارهای با آنچه برای مدل اصلی بدست آمد نشان می دهد که همخوانی و مطابقت قابل قبولی بین اسلایس های مدل اصلی و بازسازی شده در سه راستا وجود دارد. الگوریتم CCSIM توانسته مدلی بازسازی کند که نه تنها بیشینه و کمینه تخلخل در اسلایس های آن نزدیک و بعضا مطابق با مدل اصلی است؛ بلکه فراوانی بازه های تخلخل هم بهم نزدیک است. به عنوان مثال در مدل اصلی و در راستای محور X بیشترین فراوانی تخلخل در بازه ۱۸ تا ۲۰ درصد مشاهده شده است که این مهم در مدل بازسازی شده نیز مشاهده شد. مقایسه این نمودارها در راستای محور Y و Z نیز موید این نکته است. البته برای مقایسه دقیقتر این مدل ها می توان ساختار شبکه تخلخل آنها را در سه بعد نیز بررسی نمود که این کار از حوصله مطالعه حاضر خارج است و می تواند در کارهای آینده مدنظر قرار گیرد. در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد الگوریتم از فرآیند شبیه سازی حرکت سیال در مدل استفاده شد و با مقایسه نتایج بدست آمده در مدل بازسازی شده و مدل اصلی برآوردی از دقت الگوریتم اراده شده است. برای بازسازی در راستای محور X، Y و Z بترتیب از تصاویر XZ، YZ و XY استفاده شد. پس از بازسازی فضای متخلخل در راستای محورهای X، X و Z شبیه سازی حرکت سیال در مدلهای بازسازی شده انجام و مقدار تراوایی در راستای X ،X و Z بترتیب ۹۸۴، ۹۳۲ و ۷۵۱ میلی دارسی تخمین زده شد.



(ادامه دارد)



شکل ۶-۲۲- نمایش شماتیک از مکعب دیجیتالی بازسازی شده بر اساس لایه اول ماسه سنگ بریا. (الف) لایه ۱، (ب) لایه ۵۰، (ج) لایه ۱۰۰، (د) لایه ۱۵۰، (و) لایه ۲۰۰، (ه) لایه ۲۵۰، (ی) لایه ۳۰۰، (ز) لایه ۳۵۰، (ژ) لایه ۴۰۰ و (ر) نمای کامل از کل مکعب.



شکل ۶-۲۳- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه بازسازی شده ماسه سنگ بریا

۶–۴–۶ عملکرد الگوریتم CCSIM در بازسازی فضای متخلخل نمونه کربناته C1 بعد از شناخت پارامترهای مهم و تاثیر گذار در عملکرد الگوریتم CCSIM، از آن برای بازسازی فضای متخلخل در نمونه کربناته C1 استفاده شد. بصورت پیش فرض اندازه شابلون و ناحیه همپوشانی برابر با مدل ماسه سنگ بریا در نظر گرفته شده است. بطور مشابه با قسمت قبل از سه لایه اولیه مکعب C1 برای شبیه سازی در سه راستا استفاده شده است. شکل ۶-۲۴ نمودار فراوانی تخلخل در اسلایس های مدل بازسازی شده نمونه C1 را در سه راستا نمایش می دهد. مقایسه این نمودارها با آنچه برای مدل اصلی بدست آمد، نشان می دهد که تشابه ساختاری بسیار ضعیفی بین مدل های بازسازی شده و مدل اصلي وجود دارد. نه تنها مقدار بيشينه و كمينه تخلخل در نمونه ها بسيار متفاوت است بلكه از نظر فراوانی تخلخل نیز مشابهت معناداری وجود ندارد. نکته قابل تامل دیگر وجود اسلایس های با تخلخل بسیار پایین است که حاکی از بازسازی اشتباه در این لایه ها است. با توجه به این تصاویر می توان وجود دو ضعف را در الگوریتم CCSIM شناسایی کرد. مورد اول در نظر نگرفتن مقدار تخلخل اولیه تصویر آموزشی است که باعث می شود احتمال ایجاد تصاویری با مقدار تخلخل متفاوت با تصویر اوليه وجود داشته باشد. البته با توجه به اينكه در اين الگوريتم امكان تعريف و تحميل داده سخت به فرآیند بازسازی وجود دارد، می توان تا حدودی این ایراد را مرتفع نمود. در این مطالعه حد آستانه ای برای تفاوت تخلخل تصویر اولیه و بازسازی شده در نظر گرفته شده است. در صورتیکه اختلاف مقادیر تخلخل در دو تصویر بیش ۵± درصد باشد، تصویر ایجاد شده در مدل نهایی استفاده نشده است. ضعف دومی که می توان به ان اشاره نمود، ثابت بودن اندازه شابلون در فرایند بازسازی است. شبیه سازی حرکت سیال در مدل های بازسازی شده، تایید میکند که بازسازی به درستی انجام نشده است؛ چراکه تراوایی در راستای محور X، Y و Z بترتیب ۳۱، ۳۸ و ۲۷ میلی دارسی بدست آمده است. که با واقعیت تفاوت چشمگیری دارد. مدل های بازسازی شده حتی نتوانسته اند بازتابی تقریبی از وضعیت گذردهی سیال در سنگ ارائهه دهند. از نگاه پتروفیزیکی نمونه کربناته C1 می تواند یک

سنگ مخزن ایده آل باشد ولی نتایج بدست آمده از شبیه سازی آنرا به عنوان یک سنگ با قابلیت متوسط تا ضعیف معرفی مینماید.



 ${
m C1}$ شکل ۶-۲۴- فراوانی تخلخل در راستای سه محور برای نمونه بازسازی شده کربناته

از آنجاییکه در سنگ های کربناته اندازه فضاهای خالی طیف وسیعتری را شامل می شود، اسکن کردن تمام یک تصویر با یک شابلون باعث می شود تا الگوریتم نتواند شناخت درستی از الگوهای موجود در تصویر پیدا نماید و این ضعف در بازسازی بصورت لایه هایی به مانند آنچه در شکل ۶–۲۵ نمایش داده شده، می شود. این تصاویر بر اساس لایه اول مدل سه بعدی C1 در راستای صفحه XX اندازه فضاهای خالی در سنگ کربناته از چند میکرون تا چند صد میکرون می تواند تغییر کند. وجود این قبیل اسلایس ها با تخلخل ناچیز در ساختار مدل دیجیتالی بازسازی شده به مثابه موانعی در مسیر حرکت صفر خواهد بود.



شکل ۶-۲۵- چهار نمونه از تصاویری بازسازی شده با خطای بالا

برای رفع این ضعف راهکار تفکیک فضاهای خالی با اندازه های مختلف پیشنهاد شد و تاثیر آن بر دقت شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به جزئیات آن پرداخته خواهد شد.

۶-۵- تفکیک فضاهای خالی با اندازه های مختلف

با هدف بهبود عملکرد الگوریتم CCSIM در بازسازی فضاهای خالی در سنگ های کربناته با ناهمگنی بالا که در آن فضاهای خالی در طیف گسترده ای از اندازه دیده می شود، سه کلاس به نام های میکرو¹ (کوچکتر از ۱۰۰ پیکسل)، مزو⁷ (بین ۱۲۰ تا ۰۰۰ پیکسل) و ماکرو⁷ (بزرگتر از ۰۰۰ پیکسل) تعریف شد. این مقادیر با توجه به درجه تفکیک مدل CI (سµ ۲۹) محاسبه شده و در آن قطر دایره معادل با فضاهای کلاس میکرو⁷ کوچکتر از ۳۵ میکرون، کلاس مزو⁴ بین ۳۵ تا ۰۰ میکرون و کلاس ماکرو⁷ بزرگتر از ۰۰ میکرون خواهد بود. این مقادیر بر اساس میانگین مقادیری است که لونوی^۷ ماکرو⁷ بزرگتر از ۰۰ میکرون خواهد بود. این مقادیر بر اساس میانگین مقادیری است که لونوی^۷ فضاهای خالی در یک تصویر می توان در حد آستانه بازه فوق تغییراتی ایجاد نمود. بر اساس این نعریف تصویر اولیه باینری به سه زیرتصویر تقسیم می شود؛ به نحوی که هر تصویر دربرگیرنده فقط یک کلاس از فضاهای خالی خواهد بود. شکل ۶–۲۶ یک نمونه تصویر باینری و سه زیرتصویر استخراج شده را نشان می دهد. فرآیند بازسازی فضای متخلخل برای این سه زیرتصویر به صورت جداگانه و با شده را نشان می دهد. فرآیند بازسازی فضای متخلخل برای این سه زیرتصویر به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن اندازه شابلون و ناحیه همپوشانی متفاوت انجام گرفت که مقادیر آنها در جدول ۶–۳

- ¹ Micropores
- ² Mesopores
- ³ Macropores
- ⁴ Micropores
- ⁵ Mesopores ⁶ Macropores
- ^v Lonov
- Lono

جدول ۶-۳- اندازه شابلون اسکن کننده و ناحیه همپوشانی برای بازسازی زیرمدل های C1

ناحيه همپوشانی	شابلون اسكن كننده	مدل
١٢	۳۶	ميكرو
74	54	مزو
۴.	17.	ماكرو



شکل ۶-۲۶- نمایش (الف) یک تصویر باینری ار مدل دیجیتالی C1 که فضاهای خالی در آن به سه کلاس (ب) ماکرو، (ج) مزو و (د) میکرو تفکیک شده اند.

از آنجاییکه هریک از مدلهای سه بعدی بدست آمده صرفا در برگیرنده یک طیف از فضاهای خالی است، لازم است تا سه مدل با هم ترکیب شوند تا مدل سه بعدی جامعی که در برگیرنده تمام فضاهای خالی باشد، ایجاد گردد. لذا مدل های سه بعدی بازسازی شده از زیرتصاویر سه گانه با استفاده از یک عملگر انطباقی^۱ با یکدیگر ترکیب شده اند. در صورتیکه مقدار یک وکسل در تمامی مدل های سه گانه صفر باشد، آنگاه مقدار آن وکسل در مدل جامع نیز صفر خواهد بود؛ در غیر اینصورت مقدار وکسل یک و به معنی وجود فضای خالی است. رابطه (۶–۱۰) فرآیند ترکیب مدل ها را مشخص می نماید.

$$Voxel value = \omega_{micro} + \omega_{meso} + \omega_{macro} = 0 = 0 + 0 + 0$$

$$Pore = \omega_{micro}^{rock} + \omega_{meso}^{rock} + \omega_{macro}^{rock} = 1 = 1 + 0 + 0$$

$$Pore = \omega_{micro}^{rock} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{rock} = 1 = 0 + 1 + 0$$

$$Pore = \omega_{micro}^{rock} + \omega_{meso}^{rock} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 0 + 0 + 1$$

$$Pore = \omega_{micro}^{pore} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 1 + 1 + 0$$

$$Pore = \omega_{micro}^{pore} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 1 + 0 + 1$$

$$Pore = \omega_{micro}^{pore} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 1 + 0 + 1$$

$$Pore = \omega_{micro}^{pore} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 0 + 1 + 1$$

$$Pore = \omega_{micro}^{pore} + \omega_{meso}^{pore} + \omega_{macro}^{pore} = 1 = 0 + 1 + 1$$

شکل ۶-۲۷ نمای بیرونی از زیرمدلهای بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM و مدل جامع آنها را نمایش می دهد. از آنجاییکه این مدل ها بر اساس تصویر لایه اول نمونه C1 و در راستای صفحه Y2 تهیه شده اند، با شبیه سازی حرکت سیال در آنها تراوایی در راستای X بدست میآید. این فرآیند برای لایه های اول C1 در راستای YX و XZ نیز انجام و مدل جامع آنها بدست آمد. شبیه سازی حرکت سیال برای سه مدل انجام و تراوایی در راستای محور X، Y و Z بترتیب Tm T سازی حرکت سیال برای سه مدل انجام و تراوایی در راستای محور X، Y و Z بترتیب Tm T mD ۴۰۸ mD تفکیک فضاهای خالی انجام شده، حکایت از بهبود دقت در پیش بینی تراوایی دارد. اگر چه استراتژی تفکیک فضاهای خالی انجام شده، حکایت از بهبود دقت در پیش بینی تراوایی دارد. اگر چه استراتژی تفکیک فضاهای خالی تا حدی به بهبود پیش بینی کمک کرد، ولی باز هم نتایج بدست آمده با واقعیت تفاوت معناداری دارد. این مهم نشان می دهد که الگوریتم CSIM علارغم عملکرد قابل قبول در نمونه های ماسه سنگی ولی در نمونه های کربناته که فضای خالی آنها ناهمگنی بالایی دارد،

¹ Superposition (SP) operator

نمی تواند بازسازی قابل اعتمادی را ارائه دهد. به نظر نویسنده الگوریتم CCSIM در مرحله استخراج رویدادهای داده و الگوهای موجود در تصویر آموزشی ضعف ندارد ولی وجود الگوهای پیچیده هندسی فضاهای خالی در سنگ های کربناته باعث می شود تا الگوریتم نتواند در مرحله بازآفرینی این الگوها عملکرد خوبی داشته باشد. این مهم نیز از آنجا ناشی می شود که الگوریتم MCCSIM بصورت الگویی شروع به بازسازی لایه های جدید می نماید (الگوهای برداشت شده از تصویر آموزشی در مرحله بازسازی عینا جایگزین و چندین پیکسل در هر مرحله بازسازی می شود). به علت وجود پیچیدگی بالای فضاهای خالی در راستای بازسازی، باعث به بیراهه رفتن آن می شود.



شکل ۶-۲۷- نمایش شماتیک از نمای بیرونی از زیرمدلهای بازسازی شده با استفاده از الگوریتم CCSIM و مدل جامع آنها

ضعف الگوریتم CCSIM نویسنده را بر آن داشت تا توانایی الگوریتم بازسازی دیگری را مورد ارزیابی قرار دهد و برای این منظور الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو انتخاب شد. تفاوت اصلی این الگوریتم با الگوریتم CCSIM در مرحله بازآفرینی لایه های جدید است؛ بطوریکه یک لایه بصورت پیکسلی بازسازی می شود (الگوهای برداشت شده از تصویر آموزشی برای تخمین مقدار یک پیکسل استفاده می شوند).

P-8- بازسازی فضای متخلخل با استفاده از الگوریتم MCMC

در این مطالعه از الگوریتم MCMC نیز برای بازسازی فضای متخلخل نمونه های کربناته استفاده شد. این الگوریتم از دو منظر متفاوت از الگوریتم CCSIM است. اول اینکه بر خلاف الگوریتم CCSIM فقط یک تصویر به عنوان ورودی دریافت می کند و طبعا مدل بازسازی شده فقط توزیع فضاهای خالی در یک راستا را نشان میدهد؛ در الگوریتم MCMC سه تصویر که از سه راستای YZ، XY و XZ در یک راستا را نشان میدهد؛ در الگوریتم MCMC سه تصویر که از سه راستای YZ، که توزیع فضاهای خالی میه شده اند بصورت توامان به عنوان تصاویر آموزشی به مدل معرفی میشوند. از آنجاییکه توزیع فضاهای خالی میده شده اند برسی می شود، انتظار میدهد؛ در الگوریتم محلول یه معنوان تصاویر آموزشی به مدل معرفی میشوند. از آنجاییکه توزیع فضاهای خالی در یک راستا را نشان میدهد؛ در الگوریتم محلف از سنگ تهیه شده اند بررسی می شود، انتظار می وضاهای خالی در سه تصویر که از راستاهای مختلف از سنگ تهیه شده اند برسی می شود، انتظار می وفاهای خالی در سه محلول ناهمگنی بالاتری دارند، می تواند مفید باشد. تفاوت دوم در سازو کار بازسازی فضاهای خالی است. در الگوریتم MCMC یک تصویر بصورت الگویی بازسازی می شود؛ در الگوریتم معمولا ناهمگنی بالاتری دارند، می تواند مفید باشد. تفاوت دوم در سازو کار بازسازی فضاهای خالی است. در الگوریتم MCMC بازسازی داشته باشد. این مهم در سنگ های کربناته می رود بالوی بازسازی می شود؛ در دادهای خالی می شود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC بازسازی بصورت الگویی بازسازی می شود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC بازسازی بصورت الگویی بازسازی می شود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC بازسازی بصورت الگویی بازسازی می شود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC بازسازی بصورت الگویی بازسازی می شود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC بازسازی بازسازی استه در ادامه از تصاویر برداشت شده از لایه های اول نمونه کربناته CCS (شکل محرون بازسازی انده باز در الگوریتم معمولا ناهمگنی بالاتری دارند، می تود در در الگوریتم می شود؛ در حالیکه در حالیکه در الگوریتم می مود؛ در حالیکه در الگوریتم MCMC

۶-۶-۱- عملکرد الگوریتم MCMC در بازسازی فضای متخلخل نمونه کربناته C1 در الگوریتم MCMC ابتدا توزیع احتمالات در همسایگی های مختلف بر اساس آنچه در فصل سوم آمده و تخلخل هر تصویر محاسبه و فرآیند متوقف می شود. در مرحله دوم کد ابعاد مدل سه بعدی (P)، مقدار پارامتر α و خطای توقف را از کاربر می خواهد. خطای توقف به اختلاف تخلخل مدل سه
بعدی بازسازی شده و میانگین تخلخل سه تصویر ورودی گفته می شود و در این مطالعه مقدار آن ۱ ٪ در نظر گرفته شده است. در صورتیکه بعد از بازسازی مدل سه بعدی، مقدار اختلاف تخلخل آن با میانگین تخلخل سه تصویر ورودی بیشتر از ۱ $ilde{}$ باشد، فرآیند بازسازی با تغییر جزئی در lpha تکرار خواهد شد، تا این فرض برآورده شود. بررسی ها نشان می دهد که کد نوشته شده حداقل پنج بار بازسازی مدل را تکرار میکند تا بر اساس مقدار خطای تعریف شده به همگرایی برسد. بر اساس اندازه تعريف شده براي مدل سه بعدي يک ماتريس با ابعاد P×P×P ايجاد مي شود؛ مقدار اوليه مقادير تمام آرایه های این ماتریس صفر است و بر اساس الگوریتم زنجیره مارکو مونته کارلو مقدار تمام وکسل های مدل محاسبه و در ماتریس سه بعدی جایگذاری می شود. کد نوشته شده این قابلیت را دارد تا صرف نظر از اندازه تصاویر ورودی، مدل سه بعدی با ابعاد دلخواه کاربر ایجاد نماید. اگرچه با افزایش ابعاد مدل سه بعدی کیفیت ساختاری و درجه تفکیک فضای متخلخل بهتر می شود (که در توزیع و ارتباط گلوگاه ها بسیار موثر است) ولی رشد تصاعدی زمان بازسازی مدل و متعاقبا شبیه سازی حرکت سیال را به همراه خواهد داشت. این افزایش به حدی است که در مدل با ۴۰۰×۴۰۰+۴۰۰ وکسل، زمان بازسازی فضای متخلخل در یک کامپیوتر با پردازنده core i7 7700 سری Kabylake با سرعت و فرکانس پردازش ۲/۸ گیگاهرتز و حافظه رم ۱۶ گیگابایت تا ۵ ساعت خواهد رسید. البته بهترین حالت بازسازی به نحوی است که ابعاد مدل سه بعدی با ابعاد تصاویر آموزشی یکسان باشد ولى بالا بودن زمان محاسبات (حتى با وجود استفاده از سيستم هاى با كانفيگ بالا) باعث كم كردن ارزش الگوریتم MCMC میشود. لذا در مطالعه حاضر مدل هایی با ابعاد ۳۲، ۶۴، ۱۲۸ و ۲۵۶ نیز بازسازی شد و با بررسی مقدار تراوایی هریک از آنها، ابعاد بهینه مدل به نحوی که هم تخمین قابل قبولی از تراوایی بدست آید و هم زمان محاسبه کاربردی باشد، مشخص شد. مدل نهایی با دو فرمت mat و raw ذخیره می شود. از فرمت mat برای انجام محاسبات در نرم افزار متلب و از فرمت mat برای شبیه سازی حرکت سیال استفاده خواهد شد. شکل ۶-۲۸ نمای بیرونی مدل بازسازی شده برای نمونه کربناته C1 را نمایش می دهد.



شکل ۶-۲۸- نمای بیرونی مدل بازسازی شده از نمونه کربناته C1

۶-۶-۲ انتخاب مدل سه بعدی با ابعاد بهینه

در مطالعه حاضر مدل هایی با ابعاد ۳۲، ۶۴، ۲۸ و ۲۵۶ از نمونه کربناته Cl بازسازی شد و سپس شبیه سازی حرکت سیال برای هریک انجام و مقدار تراوایی در سه راستا برای هر مدل محاسبه گردید که نتایج بدست آمده در جدول ۶–۴ نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که مدل با ابعاد ۴۰۰ نزدیک ترین پاسخ به مقادیر نمونه واقعی را داشته است. با کوچکتر شدن ابعاد مدل نتایج از واقعیت فاصله می گرد به نحوی که در مدل های با ابعاد ۳۲ و ۶۴ حتی تفاوتی در تراوایی سه راستا را نیز مشاهده نمی شود. مدل با ابعاد ۱۲۸ در زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه بازسازی شده و نتایج شبیه سازی حرکت سیال در آن نیز از منظر کیفی شناخت خوبی از سنگ ارائه می دهد.

مدل	$K_X(mD)$	K _Y (mD)	$K_Z(mD)$	زمان بازسازی (Sec)
بازسازی با ابعاد ۳۲	47	۲۷	54	٨
بازسازی با ابعاد ۶۴	440	47.	479	١١٢
بازسازی با ابعاد ۱۲۸	۷۷۱	1.22	٨٠١	۵۹۱
بازسازی با ابعاد ۲۵۶	V94	۱۱۰۵	٨٨٧	4877
بازسازی با ابعاد ۴۰۰	801	١١٣۵	٩٠٧	١٧٧٨٧
CT اسکن با ابعاد ۴۰۰	۷۸۵	1489	1.04	

جدول ۶-۴- مقادیر تخمینی تراوایی در سه راستا و زمان بازسازی در مدل های با ابعاد مختلف

۶-۶-۳-۱٫زیابی عملکرد الگوریتم MCMC در حفظ پیوستگی فضاهای خالی

یکی از مهمترین پارامترهایی که یک الگوریتم بازسازی را به روشی کاربردی تبدیل می کند حفظ ارتباط و پیوستگی فضاهای خالی در دو بعد (در یک مقطع) و سه بعد (راستای محور Z) است. اگرچه الگوریتم CCSIM عملکرد خوبی در حفظ پیوستگی فضاها در دو بعد داشت ولی تخمین تراوایی در مدل های سه بعدی و بدست آمدن نتایج دور از واقعیت حاکی از آن بود که ارتباط فضاهای خالی در راستای محور Z حفظ نشده است. الگوریتم MCMC ساز و کار خاصی برای حفظ ارتباط بین فضاهای خالی در دو بعد ندارد. البته از آنجاییکه یک تصویر با نگاه آماری بازسازی می شود نمی توان خرده ای به این موضوع گرفت. اگرچه نتایج بدست آمده از شبیه سازی حرکت سیال حاکی از وجود ارتباط در راستای محور Z نیز دارد ولی در این بخش با بررسی لایه های متوالی از مدل سه بعدی به بررسی راستای محور Z نیز دارد ولی در این بخش با بررسی لایه های متوالی از مدل سه بعدی به بررسی راستای محور Z نیز دارد ولی در این بخش با بررسی لایه های متوالی از مدل سه بعدی به بررسی کیفی این موضوع پرداخته شده است. شکل ۶–۲۹، شکل ۶–۳۰ و شکل ۶–۳۵ لایه های اول تا چهارم از مدل بازسازی شده ID بترتیب در راستای صفحه XY، ZY و XX را نمایش می دهد.



شکل ۶-۲۹- چهار لایه متوالی، (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم، در راستای محور Z از مدل بازسازی شده C1 با استفاده از الگوریتم MCMC



شکل ۶-۳۰- چهار لایه متوالی، (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم، در راستای محور X از مدل بازسازی شده C1 با استفاده از الگوریتم MCMC



شکل ۶–۳۱- چهار لایه متوالی، (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم، در راستای محور Y از مدل بازسازی شده C1 با استفاده از الگوریتم MCMC

در تصاویر مربوط به لایه های بازسازی شده سه ناحیه با رنگ آبی، قرمز و سبز مشخص شده اند. در ناحیه قرمز توزیع فضاهای خالی ناچیز، در ناحیه آبی متوسط و در ناحیه سبز زیاد است. دنبال کردن روند تغییرات از لایه اول تا لایه چهارم نشان می دهد که الگوریتم با لحاظ کردن احتمالات همسایگی در هر نقطه روند تغییرات از لایه اول تا لایه چهارم نشان می دهد که الگوریتم با لحاظ کردن احتمالات همسایگی در هر نقطه روند تغییرات از لایه اول تا زیاد بوده، این را بصورت منطقی ادامه داده است. به عنوان مثال در فضاهایی که توزیع فضای خالی زیاد بوده، این روند در هر چهار تصویر با اعمال یکسری تغییرات قابل مشاهده است. این مهم حاکی از حفظ ارتباط فضاهای خالی در راستای ایجاد لایه های جدید و البته مشاهده است. این مهم حاکی از حفظ ارتباط فضاهای خالی در راستای ایجاد لایه های جدید و البته مشاهده است. این مهم حاکی از حفظ ارتباط فضاهای خالی در راستای ایجاد لایه های جدید و البته مشاهده است. این مهم حاکی از حفظ ارتباط فضاهای خالی در راستای ایجاد در مای که در تصاویر T

با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از شبیه سازی حرکت سیال در مدل های بازسازی شده با الگوریتم MCMC و بررسی پیوستگی فضاهای خالی در راستای تولید لایه های جدید می توان گفت این الگوریتم روند منطقی و قابل قبولی برای نمونه کربناته C1 داشته است. لذا در ادامه از این الگوریتم برای بازسازی فضای متخلخل نمونه های دو سازند کنگان و دالان استفاده خواهد شد.

۶–۷– تخمین تخلخل و تراوایی در نمونه های سازندهای کنگان و دالان

در این بخش از تصاویر مقاطع نازک برای بازسازی فضای متخلخل سنگ با استفاده از الگوریتم MCMC و تخمین مقدار تخلخل و تراوایی استفاده شده است. استراتژی تفکیک فضاهای خالی و ایجاد زیرتصویر بر روی تصاویر اعمال شده و برای هر نمونه سنگ سه زیرمدل سه بعدی (میکرو، مزو و ماکرو) دو مدل جامع سه بعدی (انطباقی و غیرانطباقی) ایجاد شده است. در پایان برای تخمین تراوایی از الگوریتم شبکه بولتزمن برای شبیه سازی حرکت سیال در زیرمدل های مربوط به کلاس های سه گانه فضاهای خالی و مدلهای جامع استفاده شد و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه مقایسه گردیده است.

۶-۷-۱ بازسازی فضای متخلخل در تصاویر سازندهای کنگان و دالان

از پنج نمونه سنگ متعلق به سازندهای کنگان و دالان در راستای صفحه XX، XX و XZ مقطع تهیه (شکل ۶–۳۳) و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان از آنها تصویربرداری شده است. شکل ۶–۳۳ تصاویر گرفته شده از مقاطع نازک نمونه های مورد بررسی در راستای صفحه XZ را نمایش می دهد. در انتخاب این نقاط به دو مهم توجه شده است. اول اینکه مقدار تخلخل و تراوایی نمونه های واقعی آنها در آزمایشگاه محاسبه شده باشد که این اطلاعات با همکاری شرکت نفت و گاز پارس در اختیار قرار گرفته است. نکته دومی که مدنظر بوده مربوط به بافت های مختلف کربناته است. تلاش شد تا از هریک از بافتهای کربناته دانهام یک نمونه وجود داشته باشد. همچنین نمونه های که حالات بسیار نادر یا خاص بودند و از نگاه زمین شناسی جای بحث داشت، انتخاب نشده است. بزرگنمایی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ برابر برای تهیه تصاویر بررسی شد و نتایج نشان می دهد که بزرگنمایی ۱۰ مقدار بهینه است. بزرگنمایی ۲۵ و ۴۰ به سبب تمرکز بیش از اندازه بر روی یک بخش کوچک تصویر باعث نادیده گرفتن تاثیر بعضی از فضاهای خالی و یا میزان ارتباط آنها با یکدیگر می شود. همچنین با توجه به تاثیر مثبتی که استراتژی تفکیک فضاهای خالی در فرآیند بازسازی دارد، ابتدا فضاهای خالی در سه کلاس میکرو، مزو و ماکرو در هر تصویر جدا و هر تصویر مقطع نازک به سه زیرتصویر تبدیل گردید. از آنجاییکه الگوریتم سه تصویر به عنوان ورودی نیاز دارد زیرتصویرهای دربرگیرنده کلاس های یکسان ۹-۳۴ نمای بیرونی و درونی از زیر مدلهای بازسازی شده برای نمونه 6246 را نمایش می دهد. ابعاد تمامی این مدل ها یکسان (۱۲۸×۱۲۸×۱۲۸) در نظر گرفته شده تا در ادامه برای ترکیب آنها مشکلی ایجاد نشود.



شکل ۶-۳۲- نمایش شماتیک از پلاگ مغزه و نحوه تهیه مقاطع نازک در سه راستای عمود بر هم



شکل ۶–۳۳– تصاویر مقاطع نازک که برای بازسازی سه بعدی فضای متخلخل استفاده شده اند (الف) نمونه S246 با بافت گرینستونی، (ب) نمونه S288 با بافت گرینستونی، (ج) نمونه S372 با بافت مادستونی، (د) نمونه S676 با بافت وکستونی، (و) نمونه S685 با بافت پکستونی



شکل ۶–۳۴- نمای بیرونی و داخلی از زیرمدلهای بازسازی شده با استفاده از (الف-ب) میکروتخلخل ها، (ج-د) مزوتخلخلها و (و-ه) ماکروتخلخل ها.

در مرحله بعد با استفاده از عملگر انطباقی زیر مدلهای سه بعدی با یکدیگر ترکیب شده اند که در ادامه از مدل بدست آمده با نام مدل جامع انطباقی یاد خواهد شد. شکل ۶-۳۵ (الف) و (ب) نمای بیرونی و داخلی یک مدل جامع انطباقی را که بر اساس زیرمدلهای سه گانه ساخته شده نشان می دهد. این مدل بیانگر وضعیت کاملی از ساختار فضای متخلخل در سنگ است. علاوه بر روش مرحله ای فوق الذکر که مبتنی بر تفکیک فضاهای خالی است، مدل سه بعدی دیگری از سنگ نیز بدون جداسازی فضاهای خالی ایجاد شد. برای ایجاد این مدل تصاویر مقاطع نازک بدون اعمال پیش پردازش با الگوریتم MCMC داده شدند و مدل سه بعدی سنگ بازسازی شد که در ادامه از آن با نام مدل جامع یاد خواهد شد. شکل ۶–۳۵ (ج) و (د) نمای بیرونی و داخلی از مدل جامع را نشان می دهد. فرآیند بازسازی فضای متخلخل برای پنج نمونه سنگ متعلق به سازندهای کنگان و دالان با استفاده از دو روش انطباقی و غیرانطباقی انجام شد و مقدار میانگین خطای مطلق ابرای مشخصه تخلخل محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که تفاوت معناداری بین تخلخل مدل های جامع انطباقی و مدل جامع وجود ندارد و مقدار میانگین خطای مطلق در نمونه های جامع انطباقی برابر ۱/۴۵ ٪ است که تنها ۰/۱ ٪ در مقایسه با نمونه های جامع غیر انطباقی بهبود یافته است. تقریبا همانگونه که انتظار میرفت تفکیک فضاهای خالی و بازسازی مدل بصورت مرحلهای تاثیر قابل ملاحظه ای در بهبود تخلخل مدلها ندارد. با توجه به اینکه ابعاد مدل های بازسازی شده ۱۲۸×۱۲۸×۱۲۸ در نظر گرفته شده لذا تعداد کل وکسل های هر مدل ۲۰۹۷۱۵۲ است. برای محاسبه تخلخل هر مدل تعداد وکسل های مربوط به فضای خالی بر تعداد کل وکسلها تقسیم می شود. در جدول ۶–۵ تخلخل مربوط به هر مدل نمایش داده شده است. همچنین فراوانی تخلخل در اسلایسهای دو بعدی تشکیل دهنده هر مدل نیز مورد بررسی قرار گرفت. بررسی مقدار تخلخل اسلایس های دو بعدی هر مدل کمک می کند تا صحت عملكرد الگوريتم MCMC بررسی شود. در صورتيكه مقدار تخلخل در يكی از اسلايس ها

¹ Mean absolute error

تفاوت قابل ملاحظه ای با تخلخل کل مدل سه بعدی داشته باشد، آنگاه مدل بازسازی شده بایستی مورد تجدید نظر قرار بگیرد.

نمونه	$(\%) arphi_{\scriptscriptstyle micro}$	$(\%) \varphi_{meso}$	$(\%) \varphi_{\scriptscriptstyle macro}$	$(\%)\varphi_{SP}$	$(\%)\varphi_{\scriptscriptstyle NP}$	(%) $\varphi_{\scriptscriptstyle laboratory}$
S246H	٣/۶٣	4/93	14/89	۲۱/۸۴	22/22	22/26
S288H	۵/۲۱	۸/۴۳	٨/•۵	۱٩/٩۶	۲۱/۳۳	17/93
S372H	۱/۵۵	١/٨١	7/47	۳۳/۲	۲/۰۴	٣/١٨
S676H	१/९۶	١/• ٩	۵/۵۵	۱۱/۰۹	17/00	۱۳/۹
S685H	۵/YA	۵/۵۶	۱۳۱	11/87	۱۱/۰۸	۱۲/۷۶

جدول ۶-۵: مقدار تخلخل کل در مدل های سه بعدی بازسازی شده و نتیجه بدست آمده در آزمایشگاه (در این جدول SP و NP معرف مدل جامع انطباقی و غیرانطباقی هستند)

شکل ۶-۳۳ فراوانی تخلخل در اسلایس های پنج مدل بازسازی شده با استفاده از تصویر مقطع نازک نمونه S246H را نشان می دهد. در هر شکل مقدار تخلخل کل مدل بصورت یک نقطه قرمز رنگ مشخص شده است. همانطور که مشخص است در تمامی مدل ها، تغییرات تخلخل در اسلایسها در محدوده قابل قبولی از تخلخل کل مدل سه بعدی و میانگین تخلخل نوری تصاویر آموزشی قرار داشته و این مهم موید این نکته است که مدل MCMC توانسته مدل هایی بازسازی کند که از نظر توزیع فضای خالی بیشترین تشابه را با تصاویر ورودی اولیه داشته باشد. شکل ۶-۳۶ (د) نشان می دهد که بیشترین توزیع تخلخل در اسلایس های مدل جامع انطباقی در محدوده ۱/۲ ٪ بوده است که به تخلخل کل آن (۲۱/۸۲ ٪) نزدیک است. در مقابل بیشترین توزیع تخلخل در اسلایس های مدل جامع در محدوده ۲۰ ٪ تا ۲۴ ٪ بوده است. این نکته بیانگر تفاوت در ساختار فضای خالی دو مدل است. به نظر می رسد با توجه به اینکه تغییرات توزیع تخلخل در مدل جامع انطباقی به بازه کوچکتری محدود شده، فضای متخلخل این مدل هموژنتی بیشتری داشته باشد و بتواند تعریف بهتری از واقعیت سنگ ارائه دهد چراکه اتفاق افتادن تغییرات زیاد تخلخل در این فاصله کوچک از بهتری از واقعیت سنگ ارائه دهد چراکه اتفاق افتادن تغییرات زیاد تخلخل در این فاصله کوچک از بر تراوایی به بررسی تراوایی در زیر مدل های میکرو، مزو و ماکرو و تاثیر انواع مختلف فضاهای خالی در تراوایی کل سنگ پرداخته شده است.



شکل ۶-۳۵- مدل های سه بعدی بازسازی شده با استفاده از الگوریتم MCMC. (الف) و (ب) بترتیب نمای بیرونی و داخلی مدل جامع انطباقی (ج) و (د) به ترتیب نمای بیرونی و داخلی مدل جامع را نمایش می دهد.



(ادامه دارد)



شکل ۶-۳۶- توزیع مقدار تخلخل در اسلایس های دو بعدی مدل های بازسازی شده برای (الف) مدل میکرو تخلخل، (ب) مدل مزوتخلخل، (ج) مدل ماکروتخلخل، (د) مدل جامع انطباقی و (و) مدل جامع

۶-۷-۶ شبیه سازی حرکت سیال در زیرمدل ها و مدل های جامع

برای بررسی سهم کلاسهای مختلف فضاهای خالی و همچنین تخمین تراوایی در مدلهای جامع بازسازی شده، شبیه سازی حرکت سیال با استفاده از الگوریتم شبکه بولتزمن انجام شده است. شبیه سازی حرکت سیال در زیرمدلهای میکرو، مزو و ماکرو تاثیر و سهم کلاسهای مختلف فضاهای خالی را در تراوایی کل سنگ مشخص مینماید. همچنین مقایسه نتایج دو مدل جامع انطباقی و غیرانطباقی نیز تاثیر استراتژی تفکیک فضاهای خالی پیش از بازسازی را در بهبود تراوایی کل مشخص میکند. K_z و K_y ،K_x مقدام و مقدار شده و تاثیر و تاثیر و مدور مدار جامع انطباقی و غیرانطباق

محاسبه و میانگین تراوایی در جهت x و y به عنوان تراوایی افقی (K_H) و مقدار K_z به عنوان تراوایی عمودی (Kv) در نظر گرفته شده است. جدول ۶-۶ تراوایی افقی و عمودی تخمینی در پنج نمونه بررسی شده و زیرمدلهای مربوط به آنها و شکل ۶–۳۷ میزان سهم هریک از کلاسهای فضاهای خالی (میکرو، مزو و ماکرو) را در تخلخل و تراوایی کل مدل جامع انطباقی نمایش میدهد. در این شکل رنگ سبز، قرمز و آبی به ترتیب سهم فضاهای میکرو، مزو و ماکرو را مشخص میکند. همانطور که مشخص است هرچه مقدار تخلخل ماکرو یک مدل بیشتر باشد، رشد تراوایی بهبود نشان داده است. به عنوان مثال در نمونه S676 اگرچه مقدار میکروتخلخل بالا بوده و تقریبا برابر با ماکروتخلخل است ولى به ترتيب ٢٧٪ و ١٧٪ از تراوايي افقى و عمودي توسط ميكروتخلخلها ايجاد شده است. فضاهای خالی میکرو به دلیل کوچک بودن در فضای سنگ بصورت پراکنده و با فاصله از یکدیگر رشد کرده اند و به تنهایی ارتباط مشخصی با هم ندارند و نمی توانند سیال را از خود عبور دهند. در هریک از شکلها، بخش زرد رنگ بیانگر اختلاف تراوایی مدل جامع انطباقی و مجموع تراوایی بدست آمده از زيرمدلها را نشان مي دهد. مجموع تراوايي زيرمدلها همواره كمتر از تراوايي مدل جامع انطباقي بوده است. این مهم نشان می دهد که کنار هم قرار گرفتن فضاهای خالی در مدل جامع انطباقی باعث ایجاد گلوگاه های ارتباطی جدیدی در مدل شده که تراوایی کل را افزایش داده است. مقدار میانگین خطای مطلق ۲ تراوایی افقی پنج نمونه بررسی شده در مقایسه با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه برای مدل جامع انطباقی و مدل جامع بترتیب برابر ۱۲/۷۷ و ۱۸/۸۹ میلی دارسی است. همچنین میانگین خطای مطلق برای مدل جامع انطباقی و مدل جامع در تراوایی عمودی بترتیب ۴/۶۹ و ۶/۹۲ میلی دارسی بوده است. نتایج بدست آمده برای مدل جامع انطباقی در تراوایی افقی و عمودی به واقعیت نزدیکتر بوده است. شکل ۶–۳۸ مقادیر بدست آمده برای تراوایی مطلق بعد از شبیه سازی حرکت سیال در مدل های دیجیتالی و مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه را با یکدیگر مقایسه کرده است. با

¹ Mean absolute error (MAE)

توجه به شکل ۶-۳۸ مشخص است که برای تمامی نمونه ها تراوایی تخمینی از مدل جامع انطباقی که با خط سبز مشخص است به تراوایی مغزه نزدیکتر بوده است.



شکل ۶-۳۷- نمودارهای دایره ای میزان سهم هریک از فضاهای خالی شامل میکرو، مزو و ماکرو را در تخلخل و تراوایی کل سنگ نمایش می دهند.



شکل ۶–۳۸- مقایسه روند تغییرتراوایی در نمونه های بررسی شده (الف) تراوایی افقی و (ب) تراوایی عمودی.

جدول ۶-۶- نتایج بدست آمده از شبیه سازی حرکت سیال با روش شبکه بولتزمن در مدل های دیجیتالی												
نمونه	مدل	ميكرو	كرومدل مزومدل		ماكرو	مدل جامع		مدل جامع		آزمایشگاه		
							اقى	انطب	لباقى	غيرانع		
	K_{H}	K_{V}	K _H	K_{V}	K _H	K_V	K_{H}	K_V	K_{H}	K_{V}	K_{H}	K_V
S246	١/٠٣	1/•1	11/17	٣/٢۵	٧٢/٠١	۱۵/۸۱	۹۵/۳۶	Y • /۵۵	1.0/22	١٩/١٧	74/74	T. 101
S288	١/٣٧	١/٠٢	26/12	11/•7	22/01	14/41	84/VI	31/14	54/14	40/V1	٩٣/٢۵	22/22
S372	۰/۰ X	•/• ۴	•/11	۰/۰ ۲	•/۴٩	٠/٢٢	۰/۸۵	۰/۵۵	۲/۱۳	٠/٠٣	۰/۷۶۲	۶۷۱/۰
S676	٣١/٦	•/41	١/٧١	•/11	٨/٣٣	١/٣۴	22/28	7/44	19/11	۱/۵۵	341/21	Υ/Υλ
S685	۲/۲۵	٣/٠ ٨	۲/۱۲	7/74	١/٨٢	• /VA	٧/۵۴	٨/٨٨	11/10	14/01	1/14	۵/۱۹

فصل هفتم

بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل هفتم: نتيجه گيري و پيشنهادات

۷–۱– مقدمه

در این مطالعه تلاش شد تا با تکیه به اطلاعات نهفته در تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه های مغزه به پیش بینی دو مشخصه پتروفیزیکی سنگ مخازن کربناته شامل تخلخل به عنوان یک مشخصه استاتیک و تراوایی به عنوان یک مشخصه دینامیک پرداخته شود. برای این منظور دو دیدگاه متفاوت مد نظر قرار گرفت. در دیدگاه اول یکسری اطلاعات پتروگرافی و مشخصه های هندسی فضاهای خالی از تصاویر مقاطع نازک استخراج شد. در این مسیر از قابلیتهای روش پردازش و آنالیز تصویر استفاده شد. اطلاعات استخراج شده به عنوان ورودی های الگوریتم های داده کاوی استفاده شد. در دیدگاه دوم تصویر بدست آمده از مقاطع نازک به عنوان ابزاری برای بازسازی فضای سه بعدی شد. در دیدگاه دوم تصویر بدست آمده از مقاطع نازک به عنوان ابزاری برای بازسازی فضای سه بعدی افزار متلب پیاده سازی شدند. سپس در نمونه های بازسازی شده شبیه سازی حرکت سیال انجام افزار متلب پیاده سازی شدند. سپس در نمونه های بازسازی شده شبیه سازی حرکت سیال انجام گرفت و مقدار تراوایی تخمین زده شد. در ادامه به نتایج بدست آمده به تفکیک دیدگاه پرداخته شده است.

۲-۷- نتایج بخش الگوریتمهای داده کاوی

از شاخصه های پتروگرافی استخراج شده از تصاویر مقاطع نازک و پارامترهای هندسی فضاهای خالی برای پیش بینی تراوایی نمونه های سازندهای کنگان و دالان استفاده شد. در وهله اول تلاش نگارنده بر آن بود تا مقدار عددی تراوایی را با استفاده از این ورودی ها و با تکیه به توانایی های مدل های هوشمندی مانند شبکه عصبی و مدل منطق فازی پیش بینی نماید؛ ولی بررسی ها نشان داد که نتایج تخمین زده شده تفاوت چشمگیری با مقدار تراوایی مغزه (که به عنوان ابزاری برای سنجش عملکرد فرض شده بود) داشت. به عبارت دیگر یک پیش بینی کمی برای تراوایی با تکیه به این ورودی ها امکان پذیر نیست و یا با دقت پایین انجام میشود. به نظر میرسد یکی از دلایل این مهم تعداد محدود مقاطع در دسترس برای ایجاد ماتریس آموزشی مدلهای هوشمند است. لذا تصمیم بر آن شد تا ارزیابی مدل های طبقه بندی داده برای بدست آوردن یک شناخت کیفی از سنگ مخزن مورد بررسی قرار بگیرد. نتایج نشان داد مدل های طبقه بندی داده و بویژه مدل های ترکیبی عملکرد قابل قبولی برای ارائه یک شناخت کیفی از سنگ مخازن کربناته در مواردی که دسترسی به داده های آموزشی محدود است، دارند.

۷–۳– نتایج بخش بازسازی فضای خالی و شبیه سازی حرکت سیال

نتایج حاصل از بازسازی فضای خالی در یک نمونه ماسه سنگی و یک نمونه کربناته نشان می دهد که الگوریتم CCSIM عملکرد خوبی در بازسازی فضای متخلخل نمونه ماسه سنگی دارد و در مقابل نتوانست ساختار نمونه کربناته را به درستی بازسازی نماید. اگرچه الگوریتم CCSIM با بهره گیری از استراتژی ناحیه همپوشانی توانسته در بازسازی لایه های جدید به حفظ پیوستگی و ارتباط فضاهای خالی در دو بعد (برای نمونه ماسه سنگی و هم برای نمونه کربناته) برسد ولی شبیه سازی حرکت سیال در مدل سه بعدی بازسازی شده کربناته نشان داد علارغم استفاده از استراتژی تفکیک فضاهای خالی و تغییر اندازه شابلون و ناحیه همپوشانی برای فضاهای خالی با اندازه متفاوت، نتایج بدست آمده برای تراوایی به واقعیت نزدیک نبود و بازتاب مناسبی از رفتار حرکت سیال در فضای متخلخل سنگ بدست نیامد. علت این موضوع را میتوان در انتخاب تصادفی قطعه اول در فرآیند بازسازی جستجو کرد.وقتی این قطعه متناسب با قطعه متناظر آن در تصویر آموزشی انتخاب نشود، سایر قطعات نیز متناسب با قطعات متناظرشان انتخاب نخواهند شد و این امر باعث می شود در انتهای بازسازی تصویری بدست آید که به صورت قانون مند تناظری بین بخش های آن وجود نداشته باشد. این ضعف در نمونه های کربناته که پیچیدگی فضاهای خالی در آن بالاست، نمود بیشتری پیدا می در انتهای بازسازی

در مقابل الگوریتم MCMC عملکرد دقیقی در بازسازی فضای متخلخل نمونه کربناته ارائه نمود. ارزیابی پیوستگی فضاهای خالی در راستای بازسازی نشان می دهد این الگوریتم به شکل منطقی ارتباط فضاهای خالی در سه بعد حفظ می کند و مطابق با روالی که در واقعیت می توان در واقعیت هم اتفاق بیوفتد در توزیع و شکل فضاهای خالی تغییراتی ایجاد می کند. بالا بودن زمان محاسبات که البته به دلیل ماهیت عملکردی آن در تخمین پیکسلی است را می توان از ضعفهای الگوریتم MCMC برشمرد. عدم ایجاد الگوهای مشابه با آنچه در تصاویر آموزشی دیده می شود را می توان نکته منفی دوم برای این الگوریتم دانست. به عبارت دیگر تصویر بازسازی شده از نظر ظاهری هیچ شباهتی به یک تصویر فضای متخلخل ندارد؛ البته شبیه سازی حرکت سیال با استفاده از الگوریتم شبکه بولتزمن نشان داد که نمونه های بازسازی شده با این الگوریتم از نظر ساختاری و از نگاه آماری و نحوه توزیع پیکسلهای متخلخل از تصویر آموزشی تبعیت کرده و نهایتا خواص پتروفیزیکی دینامیک آن (تراوایی) مشابه با نمونه های واقعی است.

از الگوریتم MCMC برای بازسازی فضای متخلخل ۵ نمونه گرفته شده از سازندهای کنگان و دالان استفاده شد. با بکارگیری استراتژی تفکیک فضاهای خالی شناخت مناسبی از تاثیر انواع مختلف فضاهای خالی در تراوایی سنگ بدست میاید. همچنین زیرمدلهای بازسازی شده با یک عملگر انطباقی با هم ترکیب شدند و نتایج نشان می دهد مدل بازسازی شده با عملگر انطباقی تراوایی نزدیک تر به واقعیت در مقایسه با مدل غیرانطباقی ارائه می نماید.

۷-۴- نوآوری تحقیق

شناسایی فضاهای خالی دارد. خروجی این الگوریتم یک تصویر باینری است که میتواند نقش ورودی الگوریتم تفکیک کننده فضاهای خالی و الگوریتم ساختار شبکهای تخلخل را داشته باشد.

- ۲- با دنبال کردن یک روند تشخیص الگو، الگوریتمی طراحی شد که می تواند برای تشخیص پنج نوع فضای خالی در تصاویر مقاطع ناز ک استفاده شود. همچنین این الگوریتم می تواند مقدار تخلخل مفید و غیر مفید را نیز مشخص نماید. از قابلیت های این الگوریتم برای استخراج مشخصه های هندسی فضاهای خالی که به عنوان ورودی مدل های داده کاوی استفاده شد، بهره گرفتیم.
- ۳- از آنجاییکه توزیع اندازه فضاهای خالی و نحوه و میزان ارتباط آنها با گلوگاهها نقش بسزایی در ارزیابی پتروفیزیکی سنگ دارد، با استفاده از قابلیتهای پردازش تصویر الگوریتمی طراحی شد که می تواند مشخصه های ساختار شبکه ای فضای متخلخل را استخراج نماید. این الگوریتم شناخت کمّی از فراوانی فضاهای خالی با ابعاد مختلف، قطر و طول گلوگاه های ارتباطی و فراوانی همسایگی فضاهای خالی در اطراف هر خلل و فرج ارائه می کند. از قابلیت های این الگوریتم برای تحلیل و ارزیابی لایه های بازسازی شده توسط الگوریتم OCSIM سنجش عملکرد آن استفاده شد.
- ۴- دو الگوریتم MCMC و MCOSI که سابق بر این بترتیب برای بازسازی فضای متخلخل در نمونه های خاک و نمونه های ماسه سنگی استفاده شده بودند، بعد از پیاده سازی در نرم افزار متلب برای بازسازی فضای متخلخل در نمونه های کربناته استفاده شدند. با در نظر گرفتن پیچیدگی فضاهای خالی در نمونه های کربناته و به فراخور نیاز بازسازی بروزرسانی-هایی در الگوریتم ها لحاظ شد. با توجه به زمانبر بودن بازسازی در الگوریتم MCMC، کد نوشته شده این قابلیت را دارد تا فضای متخلخلی مستقل از اندازه تصویر ورودی ایجاد نماید.

عنوان تصویر آموزشی به الگوریتم داد و نهایتا اندازه مدل به دلخواه کاربر تعیین شود. در حالیکه در الگوریتم اولیه MCMC ضروریست تا ابعاد تصویر ورودی و مدل نهایی یکسان باشد. در الگوریتم CCSIM تیز تاثیر اندازه شابلون اسکن کننده و ناحیه همپوشانی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تایید این مهم که این دو پارامتر تاثیر بسزایی در خروجی نهایی دارند و بایستی اندازه بهینه آنها با در نظر گرفتن فراوانی اندازه فضاهای خالی به مدل داده شود، تلاش شد تا راهکاری برای حل این نقصان ارائه شود. لذا استراتژی تفکیک فضاهای خالی و ایجاد سه زیرتصویر از هر تصویر ورودی مد نظر قرار گرفت. اگرچه این استراتژی در تصاویر مربوط به نمونه کربناته را رفع کند. در ادامه این استراتژی در الگوریتم MCMC استفاده شد و نتایج نشان داد که مدل بازسازی شده شباهت بیشتری با نمونه واقعی سنگ

- ۷-۵- پیشنهادات برای مطالعات آینده
- ۱- در الگوریتم تفکیک کننده فضاهای خالی می توان با بررسی انواع دیگر فضاهای خالی و استخراج مشخصه های هندسی آنها، توانایی های مدل را گسترش داد و الگوریتمی ایجاد کرد که تعداد بیشتری از فضاهای خالی را بتواند از هم تفکیک کند.
- ۲- از اطلاعات بدست آمده از ساختار شبکه ای فضای خالی در تصاویر دو بعدی می توان به عنوان ورودی های مدل های هوشمند استفاده کرد. با توجه به تاثیر مستقیم این پارامترها در تراوایی سنگ، شاید بتوان ارتباطی منطقی بین پارامترهای ساختار شبکه ای و تراوایی سنگ ایجاد نمود.
- ۳- در این مطالعه استراتژی تفکیک فضاهای خالی بر اساس اندازه برای ایجاد زیرتصویر معرفی
 شد. به کمک این استراتژی می توان سهم فضاهای خالی با ابعاد مختلف را در مشخصه های

پتروفیزیکی سنگ بررسی نمود. به نظر میرسد می توان با اتخاذ استراتژی مشابه در خصوص تفکیک فضاهای خالی و اینبار بر اساس نوع آنها، سهم تیپهای مختلف فضاهای خالی را در تراوایی سنگ بررسی نمود.

- ۴- در این مطالعه امکان دسترسی به میکروسکوپ الکترونی وجود نداشت و پارامترهای پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتهاند. از آنجایی که مطالعه بسیاری از ویژگیهای سنگ شناسی مانند مقدار و درصد انواع رسها و ریزتخلخلها با این قبیل میکروسکوپها با دقت بالایی قابل انجام است، لذا استفاده از اطلاعات حاصل از میکروسکوپ الکترونی میتواند تاثیر مثبتی در افزایش دقت پیش بینی تخلخل و تراوایی داشته باشد.
- ۵- در این مطالعه صرفا شبیه سازی تک فازی حرکت سیال در فضای متخلخل برای اندازه گیری تراوایی مطلق انجام شده است. با استفاده از شبیه سازی دو و چند فازی در نمونه های بازسازی شده می توان تراوایی نسبی و نمودارهای فشار مویینگی را نیز برای این نمونه ها اندازه گیری نمود. البته بایستی این نکته را مدنظر قرار داد که شبیه سازی تک فازی سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن در مدل های با ابعاد متوسط نیز گاهی بسیار زمانبر است که نیازمند دسترسی به سیستم های با قدرت پردازش بالا است. با در نظر گرفتن این نکته پر واضح است که یک شبیه سازی دو یا چند فازی چند مرتبه سخت و زمانبر تر خواهد بود.
- ۶- یکی از ضعف های الگوریتم MCMC و الگوریتم شبکه بولتزمن که برای شبیه سازی حرکت سیال استفاده شد، زمان بالای محاسبات است. امروزه استفاده از پردازندههای محاسبات موازی محبوبیت بالایی یافته و میتوان با استفاده از قابلیتهای این پردازندهها و الگوریتم های موازی و در بستر پردازنده گرافیکی و معماری کودا^۱ محاسبات را از پردازنده مرکزی

¹ CUDA (Compute Unified Device Architecture)

سیستم کامپیوتری به پردازنده های گرافیکی^۱ انتقال داد. یکی از مزیتهای روش شبکه بولتزمن قابلیت بالایی آن در موازی سازی است که می توان با بهرهگیری از این قابلیت محاسبات سنگین را در کامپیوترهایی نیمه حرفهای انجام داد. محققینی که علاقه به کار در زمینه شبیه سازی چندفازی حرکت سیال در مدلهای سه بعدی با ابعاد بزرگ هستند، کمک گرفتن از این قابلیت اجتناب ناپذیر است.

۷-۶- محدودیتها و ضعفهای مطالعه حاضر

استخراج شاخصه های پتروگرافی، کمی سازی آنها با اسفاده از آنالیز تصویر و بازسازی فضای متخلخل با استفاده از تصاویر دو بعدی مقاطع نازک با وجود مزایای متعددی که دارد، دارای محدودیتها و ضعف هایی نیز است که در این قسمت در مورد آنها بحث خواهد شد.

ضخامت یک مقطع نازک در حالت استاندارد ۳۰ میکرون است. وقتی در یک مقطع نازک شکل هندسی فضاهای خالی و پیچیدگی آنها بررسی می شود قاعدتا اطلاعات بدست آمده نماینده یک قطعه سنگ نخواهد بود. به عنوان مثال یک پلاگ مغزه معمولا ۲/۵ تا ۳ اینچ ضخامت دارد و این امکان وجود دارد که به دلیل ناهمگنی بالای سنگ پراکندگی فضاهای خالی از ابتدا تا انتهای پلاگ تغییر داشته باشد. در این حالت بهتر است برای وصول نتایج دقیق تر چندین مقطع و در فواصل کم از سنگ زده شود و طبعا با بررسی تمام این مقاطع ارزیابی بهتر و به واقعیت نزدیک تری از مشخصه پتروگرافی بدست میآید. این مهم در بازسازی فضای متخلخل نیز نمود پیدا میکند و وقتی با استفاده از یک تصویر دو بعدی فضای متخلخل سه بعدی بازسازی می شود، نمی توان با قوت این فضای بازسازی شده را مشابه فضای سه بعدی پلاگ مغزه دانست. معمولا استفاده از رویکرد بازسازی سریالی یکی از راهکارهایی است که در بازسازی فضای متخلخل برای کاهش خطا و افزایش شباهت

¹ GPU (Graphic Processing Unit)

بالا باشد تاثیر بسزایی در بهبود نتایج بدست آمده دارد. علاوه بر راهکار استفاده از چندین مقطع نازک بایستی به فرض همگن بودن فضای متخلخل سه بعدی در محدوده بازسازی نیز توجه داشت. بایستی در نظر گرفت که مدل های بازسازی شده معمولا نماینده کوچکی از سنگ با ابعاد کمتر از یک سانتیمتر هستند و معمولا در این ابعاد کوچک شاخصه های پتروفیزیکی تغییرات شدیدی ندارد. برای شناخت بهتر از سنگ پیشنهاد میشود که با استفاده از چندین تصویر بازسازی انجام شود و از نتایج بدست آمده میانگین گیری انجام شود. فصل هشتم

پيوست

فصل هشتم: پیوست الف: الگوریتم استخراج کننده پارامترهای ساختار شبکهای فضاهای خالی و گلوگاه های متصل کننده آنها

۸–۱– مقدمه

در این مطالعه به منظور مقایسه و سنجش شباهت لایه ها در یک مدل سه بعدی از پارامترهایی نظیر اندازه فضاهای خالی، چگونگی ارتباط فضاهای خالی، طول و قطر گلوگاه ها استفاده شده است. برای این منظور از قابلیتهای پردازش و آنالیز تصویر استفاده شد و الگوریتمی خودکاری طراحی شده که بعد از اعمال یکسری فیلترها میتواند پارامترهای مربوط به ساختار شبکه ای فضاهای خالی را در تصاویر دو بعدی استخراج نماید. در این بخش جزئیات مربوط به طراحی این الگوریتم بیان شده است.

۸-۲- بخش بندی تصویر با استفاده از الگوریتم بخش بندی آب پخشان

به منظور استخراج پارامترهای ساختاری شبکه تخلخل، از الگوریتم بخش بندی آب پخشان استفاده شد. این روش برای بخش بندی نقشه فاصله^۲ در تصاویر خاکستری محیط متخلخل، جهت جدا سازی فضاهای خالی استفاده شده است (شپارد^۳ و همکاران، ۲۰۰۴). نقشه فاصله تصویر دودویی اشاره به فاصله هر پیکسل، در داخل فضای سفید، به نزدیک ترین نقطه روی مرز فضای سفید دارد.

ابتدا تصویر مقطع نازک به یک تصویر باینری تبدیل و سپس الگوریتم بخش بندی آب پخشان بر روی آن اعمال می شود. شکل ۸-۱ یک تصویر مقطع نازک (الف) که بعد از باینری شدن (ب)، حذف فضاهای مرزی (ج)، پردازش با فیلتر مدیان^۴ با همسایگی ۳ پیکسل (د) الگوریتم بخش بندی آب پخشان بر روی آن اعمال شده (و) را نمایش می دهد. فضاهایی که در بخش های مرزی تصویر قرار گرفته اند و تنها بخشی از تصویر گرفته شده مشخص است در بررسی ساختار شبکهای فضاهای خالی

³ Sheppard

¹ Watershed Segmentation Algorithm

² Distance map

⁴ Median

۸–۳– مساحت فضاهای خالی

از تصویر باینری که فضاهای مرزی آن حذف شدهاند و با فیلتر مدیان پردازش شده (شکل ۸–۱(د)) برای محاسبه مساحت کل و مساحت میانگین فضاهای خالی، مساحت بزرگترین و کوچکترین فضاهای خالی استفاده می شود. این فرآیند با شمارش پیکسلهای سفید رنگ انجام شد.

۸-۴-۸ محاسبه متوسط قطر فضاهای خالی

برای این منظور از مفهوم دوایر معادل که مساحتی برابر با مساحت هریک از فضاهای خالی دارد، استفاده میشود. با اتصال مراکز دوایر معادل فضاهای خالی جدا شده با الگوریتم آب پخشان، شبکه دو بعدی فضای خالی ایجاد میشود. شکل ۸-۲ دوایر معادل و شبکه دو بعدی فضای خالی را نمایش می دهد.

۸-۵- محاسبه قطر و طول گلوگاه ها و عدد تناسب'

گذرگاهی که دو فضای خالی را به یکدیگر متصل می کند را گلوگاه^۲ فضای خالی مینامند. قطر گلوگاهها به ضخامت گذرگاه اتصال دهنده دو فضای خالی مجاور بستگی دارد. تعداد پیکسلهای مجاور در دو فضایی که با الگوریتم آب پخشان از هم جدا شدهاند، معادل قطر گلوگاه (شکل ۸–۳) و تعداد پیکسهای خط متصل کننده مرکز دو دایره معادل به عنوان طول گلوگاه در نظر گرفته شده است. برای یافتن مرکز فضاهای خالی از مفهوم دایره محیطی استفاده شده است. دایره محیطی بزرگترین دایرهای است که می توان در هر فضای خالی ایجاد کرد بطوریکه تمام آن در داخل فضای خالی قرار بگیرد. برای این منظور ابتدا لبه تمام فضاهای خالی با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه استخراج شده اند (شکل ۸–۴(الف)). تشخیص لبه متداول ترین روش برای تشخیص ناپیوستگی های معنیدار مقادیر شدت هستند. این ناپیوستگی ها توسط مشتق های مرتبه اول و دوم تشخیص داده

¹ Coordination number

۲ Throat

در نظر گرفته شد. همچنین با شمارش تعداد فضای خالی که به یک فضای خالی منفرد متصل شده اند، عدد تناسب هر فضای خالی محاسبه میشود. بعد از اندازه گیری قطر و طول تمام گلوگاهها و عدد تناسب فضاهای خالی، مقدار میانگین هریک از این پارامترها در هر تصویر محاسبه شده است. شکل ۸-۵ فراوانی قطر و طول گلوگاهها و فراوانی عدد تناسب و شعاع فضاهای خالی شناسایی شده در شکل ۸-۱(الف) را نمایش می دهد. همچنین جدول ۸-۱ مقدار بدست آمده تمام پارامترهای فوق الذکر شامل مساحت کل فضاهای خالی، میانگین مساحت فضاهای خالی، مساحت بزرگترین و کوچکترین فضای خالی، میانگین قطر و طول گلوگاهها و میانگین عدد تناسب فضاهای خالی در شکل ۸-۱(الف) را نمایش میدهد.

میانگین عدد	ميانگين طول	ميانگين قطر	مساحت	مساحت	ميانگين	مساحت کل
تناسب	گلوگاهها	گلوگاهها	كوچكترين	بزرگترين	مساحت فضاها	فضاها
	(μm)	(μm)	(µm²)	(µm²)	(µm²)	(µm²)
۰/۰۹	114	44	۲۱	186890	17418	419611

جدول ۸-۱- مقدار پارامترهای ساختار شبکهای فضای متخلخل



شکل ۸-۱- نمایش (الف) تصویر مقطع نازک که (ب) باینری شده، (ج) حذف فضاهای مرزی، (د) پردازش با فیلتر مدیان ^۱ با همسایگی ۳ پیکسل، (و) الگوریتم بخش بندی آب پخشان بر روی آن اعمال شده است.

[\] Median



شکل ۸-۲- نمایش شماتیک از دوایر معادل و شبکه دو بعدی فضای خالی



شکل ۸-۳- نمایش شماتیک از قطر گلوگاه های متصل کننده فضاهای خالی
\bigtriangledown 200 0 er of the second s 300 632 00 \Diamond 5 (P) 325 C) 50 3 ᢧᠷ Ð 3 ی ت ت الف \bigcirc

شکل ۸-۴- نمایش شماتیک از (الف) جدایش لبه فضاهای خالی و (ب) مراکز فضاهای خالی



شکل ۸-۵- فراوانی قطر و طول گلوگاهها و فراوانی عدد تناسب و شعاع فضاهای خالی تصویر نمونه در شکل ۸-۱(الف)

منابع

منابع فارسى

- شمسنیا ا، (۱۳۸۵)، پایان نامه ارشد: "اثر هندسه منافذ روی کیفیت مخزنی سازندهای کنگان و دالان"، دانشکده علوم، دانشگاه تهران. منابع لاتین
- Adhikari S., Friswell M. I. (2010) "Distributed parameter model updating using the Karhunen–Loève expansion" Mech. Syst. Signal Pr., 24, pp 326–339.
- Ali M. and Chawathe A. (2000) "Using artificial intelligence to predict permeability from petrographic data" Comput. Geosci., 26, pp 915-925.
- Altman S. N. (**1992**) "An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression" **Am. Stat., 46**, pp **175-186**.
- Anselmetti F. S., Luthi S. and Eberli G. P. (**1998**) "Quantitative characterization of carbonate pore systems by digital image analysis" **AAPG Bull.**, **82**, pp **1815-1836**.
- Baykan N. A. and Yilmaz N. (2010) "Mineral Identification Using Color Spaces and Artificial Neural Networks" Comput. Geosci., 36, pp 91-97.
- Berrezueta E., Gonzalez-Menendez L., Ordonez-Casado B. and Olaya P. (**2015**) "Pore network quantification of sandstones under experimental CO2 injection using image analysis" **Comput. Geosci.**, 77, pp **97-110**.
- Beutel J., Kundel H. L. and Van Metter R. L. (2000) "Handbook of medical imaging" Vol. 1-Physics and psychophysics. 1st ed. Bellingham, Wash. SPIE Press.
- Boek E. S. and Venturoli M. (2010) "Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries" Comput. Math. Appl., 7, pp 2305–2314.
- Breiman L. (1996) "Bagging Predictors" Mach. Learn., 24, pp 123–140.
- Budinski L., Fabian J. and Stipić M. (2015) "Lattice Boltzmann method for groundwater flow in non-orthogonal structured lattices" Comput. Math. Appl., 10, pp 2601–2615.
- Churcher P. L., French P. R., Shaw J.C. and Schramm L. L. (1991) "Rock properties of Berea sandstone" Baker dolomite, and Indiane limestone, paper SPE 21044.
 Proceedings of the 1991 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Anaheim.

- Choquette P. W. and Pray L. C. (1970) "Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates" AAPG Bull., 2, pp 207-250.
- Cnudde V., Boone M., Dewanckele J., Dierick, M., Van Hoorebeke L. and Jacobs P. (2011) "3D characterization of sandstone by means of X-ray computed tomography" Geol. Soc. Am., 7, pp 54-61.
- Cortes C. and Vapnik V. (1995) "Support-Vector Networks" Mach. Learn., 20, pp 273-297.
- Cover T. and Hart P. (1967). "Nearest neighbor pattern classification" Trans. Inform. Theory, 13, pp 21-27.
- Dee Bell J., Eruteya O. and Oono O. (2012) "Application of Petrographic Image Analysis and Multivariate Statistical Techniques for Textural Studies of Oil Sand Samples" AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California.
- Dey S., Debbarma C., Sarkar P. and Aris Marfai M. (2011) "Experiment on visualizing micro-level surface characters of sediment sections: a methodological approach to reflectance-based alternative petrographic image analysis" Arab. J. Geosci., 5, pp 899-906.
- Dong H. (2007) "Micro-CT Imaging and Pore Network Extraction" PhD Thesis at The Department of earth Science and Engineering of Imperial College London.
- Ehrlich R., Crabtree S. J., Horkowite K. O. and Horkowitz J. P. (1991) "Petrography and Reservoir Physics I: Objective Classification of Reservoir Porosity" Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 75, 10, pp 1547-1562.
- Esmaeil Zadeh A, Doulati Ardejani F, Ziaii M, Mohammado Khorasani M. (2010) "Investigation of salt plugs intrusion into Dehnow anticline using image processing and geophysical magnetotelluric methods" **Russ. J. Earth. Sci.**, 11, 1-9.
- Freund Y. and Schapire R. E. (**1996**) "Experiments with a new boosting algorithm" In Machine Learning: Proceedings of the Thirteenth International Conference.148-156.
- Ghazban F. (2007) "Petroleum Geology of the Persian Gulf" Tehran University Publication. pp.707.
- Ghiasi-Freez J., Kadkhodaie-Ilkhchi A., Ziaii M. (2012) "The Application Of Committee Machine With Intelligent Systems to the Prediction of Permeability From Petrographic Image Analysis and Well Logs Data: A Case Study From the South" Petrol. Sci.Technol., 20, pp 2122-2136.

- Ghiasi-Freez J., Soleymanpour I., Kadkhodaie-Ilkhchi A., Ziaii M. and Hatampour A.
 (2012) "Semi-automated Porosity Identification from Thin Section Images Using Image Analysis and Intelligent Discriminant Classifiers" Comput. Geosci., 45, pp 36-45.
- Ghiasi-Freez J., Honarmand-fard S. and Ziaii M. (2014) "The Automated Dunham Classification of Carbonate Rocks Through Image Processing And Intelligent Model" Petrol. Sci.Technol., 1, pp 100–107.
- Gong W., Chen Sh. and Yan Y. (2017) "A thermal immiscible multiphase flow simulation by lattice Boltzmann method" Int. Commun. Heat Mass, 88, pp 136–138.
- Hajizadeh A., Safekordi A. and Farhadpour F. A. (2011) "A multiple-point statistics algorithm for 3D pore space reconstruction from 2D images" Adv. Water Resour., 34, pp 1256–1267.
- Haines T. J., Neilson J. E. (2015) "The impact of carbonate texture on the quantification of total porosity by image analysis" Comput. Geosci., 85, pp 112-125.
- Holmstrom L. and Koistinen P. (2010) "Pattern recognition" Comp. Stat., 2, pp 404-413.
- Hosa A. Curtis A. and Wood R. (2016) "Calibrating Lattice Boltzmann flow simulations and estimating uncertainty in the permeability of complex porous media" Adv. Water Resour., 94, pp 60–74.
- Image Pro Plus, (2006). Software Program of Media Cybernetics Inc.
- Ishikawa S. T. and GulickV. C. (2013) "An automated mineral classifier using Raman spectra" Comput. Geosci., 54, pp 259-268.
- Jerram D. A., Mock A., Davis G. R., Field M. and Brown R. J. (2009) "3D crystal size distributions: a case study on quantifying olivine populations in kimberlites" Lithos, 112, 1, pp 223–235.
- Jiang Z., Chen W. and Burkhart C. (2013) "Efficient 3D porous microstructure reconstruction via Gaussian random field and hybrid optimization" J. Microsc., 252, 2, pp 135–148.
- Kang Q., Lichtner P. C. and Janecky D. R. (2010) "Lattice Boltzmann Method for Reacting Flows in Porous Media" Adv. Appl. Math. Mech., 5, pp 545–563.
- Kim F. H., Moylan S. P., Garboczi E. J. and Slotwinski J. A. (2017) "Investigation of pore structure in cobalt chrome additively manufactured parts using X-ray computed tomography and three-dimensional image analysis" Addit. Manuf., 17, pp 23-38.

- Kuncheva L. I., Charles J. J., Miles N., Collins A., Wells B. and Lim I. S. (2008)
 "Automated Kerogen Classication in Microscope Images of Dispersed Kerogen Preparation" J. Math. Geol., 40, pp 639-652.
- Lai P. and Krevor S. (2014) "Pore scale heterogeneity in the mineral distribution and surface area of Berea sandstone" Energy Procedia, 63, pp 3582-3588.
- Lacasta A., Juez C., Murillo J. and García-Navarro P. (2015) "An efficient solution for hazardous geophysical flows simulation using GPUs" Comput. Geosci., 78, pp 63–72.
- Lázaro J. M., Navarro J. A. S., García Gil A. and Romero V. E. (2014) "3D-geological structures with digital elevation models using GPU programming" Comput. Geosci., 70, pp 138–146.
- Leclaire S., Pellerin N., Reggio M. and Trépanier J. Y. (2016) "A multiphase lattice Boltzmann method for simulating immiscible liquid-liquid interface dynamics" Appl. Math. Model., 14, pp 6376–6394.
- Lesher C. E., Wang Y. B., Gaudio S., Clark A., Nishiyama N. and Rivers M. (2009) "Volumetric properties of magnesium silicate glasses and supercooled liquid at high pressure by X-ray microtomography" **Phys. Earth Planet. Inter.**, 4, pp 292-301.
- Lonoy A. (2006) "Making sence of carbonate pore systems" AAPG Bull., 9, pp 1381-1405.
- Lucia F. J. (**1995**) "Rock-fabric petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization" **AAPG Bull.**, **79**, pp **1275–1300**.
- Ma W. J., A. Martian J. R., Banavar and Koplik J. (1992) "Dynamics of phase separation of binaryfluids" Phys. Rev., 45, pp 5347-5350.
- McNamara G. and Zanetti G. (1988) "Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata" Phys. Rev. Let., 61, pp 2332-2335.
- Marmo R., Amodio S., Tagliaferri R., Ferreri V. and Longo G. (2005) "Textural identification of carbonate rocks by image processing and neural network: Methodology proposal and examples" **Comput. Geosci., 31**, pp **649-659**.
- Marschall D. et al. (1995) "Method for Correlating NMR Relaxometry and Mercury Injection Data" SCA International Symposium Proceedings, Paper SCA 9511, Houston.
- Peternell M. and Kruhl J. H. (2009) "Automation of pattern recognition and fractalgeometry-based pattern quantification, exemplified by mineral-phase distribution patterns in igneous rocks" Comput. Geosci., 35, pp 1415–1426.

- Puscas T. M., Signorini M., Molinari A. and Straffelini G. (2001) "Image analysis investigation of the effect of the process variables on the porosity of sintered chromium steels" Mater. Charact., 50, pp 1–10.
- Quartapelle L. (**1993**), "**Numerical solution of the Incompressible Navier-Stokes Equations**" Birkhauser Verlag, Switzerland. pp. **312**.
- Quiblier J. A. (1984) "A new three-dimensional modeling technique for studying porous media" J. Colloid Interface Sci., 98, pp 84-102.
- Remeysen K. and Swennen R. (2008) "Application of microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations" Mar. Pet. Geol., 6, pp 486-499.
- Ribeiro J. L. B., Quelroz J. C., Lopes R. T., Anjos M. J., Blanco L. C. B., D'Almeida A. R. and Campos E. F. (2007b) "New methodology for analysis of performance for diverting agents in unconsolidated sandstones in real time with physical simulator using computed tomography" Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 1, pp 481-485.
- Rivers M. L., Wang Y. B. and Uchida T. (2004) "Microtomography at GeoSoilEnviroCARS. In: U. Bonse, Developments in X-Ray Tomography" IV. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie). pp 783-791, Bellingham.
- Roberts A. P. and Garboczi E. J. (1999) "Elastic properties of a tungsten–silver composite by reconstruction and computation" J. Mech. Phys. Sol., 47, pp 2029-2055.
- Sangani A. S. and Acrivos A. (1982) "Slow flow through a periodic array of spheres" Int. J. Multiphase Flow, 4, pp 343–360.
- Sarkar P., Kumar A., Singh K. H., Ghosh R. and NathSingh T. (2018) "Pore system, microstructure and porosity characterization of Gondwana shale of Eastern India using laboratory experiment and watershed image segmentation algorithm" Mar. Pet. Geol., 94, pp 246-260.
- Sauzet O., Cammas C., MarcGilliot J., Bajard M. and Montagne D. (2017) "Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections" Geoderma, 292, pp 135-148.
- Schlimberger, (1989). Log Interpretation Principles-Applications, Eighth Printing.,
 Scblumberger Press, pp. 241.

- Sharkey A. J. C. (1996) "On combining artificial neural networks" Connect. Sci., 8, pp 299-314.
- Sheppard A. P., Sok R. M. and Averdunk H. (2004) "Techniques for image enhancement and segmentation of tomographic images of porous materials" Phys. A: Stat. Mech. Appl., 339, 1, pp 145-151.
- Smith J. V. and Beermann E. (2007) "Image analysis of plagioclase crystals in rock thin sections using grey level homogeneity recognition of discrete areas" **Comput.** Geosci., 33, pp 335-356.
- StatSoft, Inc., (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com
- Sullivan S. P., Gladden L. F. and Johns M. L. (2006) "Simulation of power-law fluid flow through porous media using lattice Boltzmann techniques" J. Non Newton. Fluid. Mech., 3, pp 91–98.
- Susilowati Y., Rahyuwibowo H. and Mengko T. R. (2002) "Characteristic of interference color in rock forming mineral images" IEEE Asia-Pacific conference on circuits and systems, 28-31 October, Bali, Indonesia.
- Tahmasebi P. and Sahimi (2012) "Reconstruction of three-dimensional porous media using a single thin section" Phys. Rev., 85, 066709.
- Tartakovsky A. M., Meakin P., Scheibe T. D. and Wood B. D. (2007) "A smoothed particle hydrodynamics model for reactive transport and mineral precipitation in porous and fractured porous media" Water Resour. Res., 43, doi: 10.1029/2005WR004770.
- Thungsuntonkhun W. and Engler T. W. (2004) "Applying NMR-Hydraulic Flow Unit Technique to Estimate J-Function and Capillary Pressure" SPWLA 45th Annual Logging Symposium, Netherlands.
- Tiab D. and Donaldson E. C. (2004), "Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties" Elsevier Press, Oxford, pp. 971.
- Van den Berg E. H., Meesters A. G., Kenter, J. A. M. and Schlager W. (2002)
 "Automated separation of touching grains in digital images of thin sections" Comput. Geosci., 28, pp 179-190.

- Wu K. J., VanDijke M. I. J., Couples G. D., Jiang Z. Y., Ma J. S., Sorbie K. S. and Zhang X.X. (2006) "3D stochastic modelling of heterogeneous porous media: Applications to reservoir rocks" Transp. Porous Med., 3, pp 443–467.
- Yehya A., Naji H. and Sukop M. C. (2015) "Simulating flows in multi-layered and spatially-variable permeability media via a new Gray Lattice Boltzmann model" Comput. Geotech., 70, pp 150-158.
- Yeong C. L. Y. and Torquato S. (1998) "Reconstructing random media" Phys. Rev., 57, pp 495–506.
- Zhang G., Ranjith P. G. and et al. (**2018**) "Characterization of coal porosity and permeability evolution by demineralization using image processing techniques: A micro-computed tomography study" **J. Nat. Gas Sci. Eng.**, **56**, pp **384-396**.
- Zaza A., Awotunde A. A., Fairag F. A. and Al-Mouhamed M. A. (2016) "A CUDA based parallel multi-phase oil reservoir simulator" Comput. Phys. Commun., 206, pp 2–16.

Abstract

An accurate reservoir characterization is a crucial task for the development of quantitative geological models and reservoir simulation. In the present thesis, the advantages of thin section images were employed to predict porosity and permeability of carbonate reservoir rocks. Two approaches were used to predict the permeability. First, several static characteristics of thin section images, including distribution of pore spaces, cement percentage, geometrical shape and complexity of pore spaces, were extracted and used as inputs of classification models, including decision trees, discriminate function, support vector machine, K-nearest neighbors and two ensemble algorithms, named boosting and bagging strategies. The models classified the reservoir rock intervals into four groups qualitatively. The obtained results showed that the bagging decision tree model delivering the best performance among the models and improveing the accuracy of simple models up to 7.7% compared with the best single classifier. In the second approach, the thin section images were used as training images of two porous media reconstruction algorithms, named Markov Chain Monte Carlo (MCMC) and Cross Correlation Simulation (CCSIM) algorithm. The output of these models is a 3D digital model, which are suitable to simulate the fluid flow simulation using Lattice Boltzmann Method (LMB). The results introduced the CCSIM as an unreliable algorithm for reconstruction of carbonate media inspit of its acceptable performance in sandstone samples. Lack of connection and relationship of pore spaces in the third dimension are the main drawback of CCSIM algorithm. From the other hand, the MCMC algorithm reconstructed the porous media accurately. The results of fluid flow simulation in the reconstructed models of Kangan and Dalan formations confirm this fact. In addition, the strategy of pore space differentiation and development of sub-models, named micro-model, meso-model and macro model for each thin section facilitated the study of different pore space contribution in the absolute permeability. The porous media of five samples taken from Kangan and Dalan formations were reconstructed using the MCMC algorithm. The fluid flow was simulated in the reconstructed samples and the absolute permeability was estimated. The results show: 1- the macro-porosity has the highest contribution in the absolute permeability; 2- High abundance of micro-porosity does not guarantee the high permeability. The reconstructed sub-models for each sample were integrated through a superposition operator. Fluid flow simulation in the superposition model shows that micro pores improve the throat distribution of macro pores. The mean values of absolute error of horizontal permeability versus the laboratory measurements for the superposition and simple models are 12.77 and 18.89 mD, respectively. In addition, the mean values of absolute error for the vertical permeability in the aforementioned models are 4.69 and 6.92 mD, respectively.

Keywords: Reservoir rock characterization, Data mining algorithms, Markov Chain Monte Carlo algorithm, Cross Correlation simulation algorithm, Lattice Boltzmann, Kangan and Dalan formations.



Shahrood University of Technology FACULTY OF MINING, PETROLEUM AND GEOPHYSICS

PhD Thesis Proposal

Estimation of Static and Dynamic Petrophysical Properties of Carbonate Reservoir Rocks Using Thin Section Image Analysis and Simulation of Fluid Flow in Porous Media

By

Javad Ghiasi-Freez

Supervisors

Dr. Mansour Ziaii Dr. Ali Moradzadeh

September 2018