

# تعیین ویژگی‌های سنگ‌ها با استفاده از تصویربرداری پزشکی

حسین ایزدی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران  
بهزاد مهرگینی، دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران  
حسین معماریان، استاد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران  
حمید سلطانیان‌زاده، استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

## چکیده

تصویربرداری پزشکی یکی از روش‌های غیرمخرب، ارزان و آسان و سریع به منظور مطالعه ساختار درونی اجسام و همچنین تهیه نمای سه بعدی از درون آنها است. استفاده از تصویربرداری پزشکی برای تعیین مقدار تخلخل و دیگر ویژگی‌های مغزه‌های حفاری و پلاگ‌های سنگی به دست آمده از حفاری‌های عمرانی، معدنی و مخازن نفتی، رویکردی است که امروزه مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، الگوریتمی بر مبنای روش‌های نوین تصویربرداری، پردازش تصاویر دیجیتال و برنامه نویسی هوشمند، به منظور تعیین مقدار تخلخل مؤثر و کل، که قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه‌های مغزه نمی‌باشد، و همچنین استخراج اطلاعات آماری در پلاگ‌های نفتی تهیه شده از یکی از میادین نفتی جنوب ایران، ارائه شده است. تصاویر مقطعی گرفته شده از این پلاگ‌ها، توسط یک دستگاه تصویربرداری توموگرافی پرتو ایکس پزشکی تهیه شده است. پس از تهیه تصاویر، ویژگی‌های ارزش هر پیکسل در تصاویر و همچنین هیستوگرام تصاویر به منظور تعیین مقدار تخلخل استفاده می‌شود. مقدار شدت هر پیکسل دارای رابطه مستقیم با میزان چگالی جسم است و هیستوگرام تصاویر نیز نشان دهنده میزان تغییرات فراوانی هر مقدار از پیکسل‌ها در تصاویر هستند. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، اطلاعات آماری و میزان تخلخل مؤثر موجود در تعداد ۱۹ پلاگ سنگی به دست آمده از حفاری‌های یک چاه نفت با درستی میانگین ۹۳/۱۳٪ در مقایسه با نتایج آزمایشگاه مغزه تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: ویژگی سنگ‌ها، تصویربرداری پزشکی، پردازش تصویر، سیستم هوشمند

## ۱- مقدمه

مستلزم هزینه و زمان زیاد هستند، با این حال داده‌ای در مورد هندسه فضای متخلخل ارائه نمی‌دهند. تصویربرداری پزشکی، روشی بر مبنای تابش پرتوهای انرژی به جسم است که قابلیت تهیه اطلاعات تصویری از درون اجسام را فراهم می‌آورد [۲]. تصویربرداری پزشکی یک روش غیرمخرب، ارزان، آسان و سریع برای مطالعه ساختار درونی اجسام و همچنین تهیه نمای سه بعدی از درون آنها است [۱۴-۲].

تاکنون تحقیقات زیادی در راستای تعیین میزان تخلخل از تصاویر پزشکی تهیه شده از پلاگ‌های به دست آمده از مخازن

مقدار تخلخل یک جسم از نسبت حجم فضای خالی به فضای کل آن جسم قابل محاسبه است [۱]. مقدار و همچنین هندسه فضای متخلخل<sup>(۱)</sup> نقش مهمی در مدیریت<sup>(۲)</sup>، بهره‌برداری<sup>(۳)</sup>، بررسی خصوصیات<sup>(۴)</sup> و ارزیابی<sup>(۵)</sup> نمونه‌های سنگی معدنی، ژئوتکنیکی و نفتی ایفا می‌کند. به عنوان مثال به منظور تعیین میزان تخلخل، روش‌های متعددی از قبیل تزریق جیوه<sup>(۶)</sup> و فشرده‌سازی یا انبساط گاز<sup>(۷)</sup> وجود دارد که امروزه در صنعت نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]، این روش‌ها گرچه

1-Porous media

2-Reservoir management

3-Reservoir production

4-Reservoir characterization

5-Reservoir evaluation

6-Mercury injection

7-Gas compression/expansion

نفی انجام شده است [۳، ۵، ۶، ۹-۱۴]. اکثر این تحقیقات، بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگی انجام گرفته و میزان تفکیک پذیری<sup>(۱)</sup> تصاویر تهیه شده توسط تحقیقات قبلی، در ابعاد ۵ تا ۲۰ میکرومتر است. از آنجا که مخازن نفتی ایران اکثراً کربناته و آهکی بوده، و فقط در کشور تنها دستگاه تصویربرداری پزشکی با تفکیک پذیری حدود ۲۰۰ میکرومتر وجود دارد، روش‌ها و راهکارهای پیشنهاد شده در مطالعات قبلی قابلیت اجرایی مناسبی برای مخازن ایران ندارد. بنابراین، مطالعه بر روی تصاویر گرفته شده از پلاگ‌های نفتی تهیه شده از مخازن هیدروکربوری کربناته و آهکی که دارای تفکیک پذیری ۲۰۰ میکرومتر هستند، در پیشبرد اهداف بلندمدت صنعت نفت کشور و به‌کارگیری روش‌های نوین، غیرمخرب، سریع و کم‌هزینه نقش مؤثری خواهد داشت.

در این مقاله، به منظور تعیین مقادیر تخلخل‌های مؤثر و کل، و همچنین تهیه‌ی نمای سه‌بعدی فضای متخلخل موجود در پلاگ‌های یکی از میادین نفتی جنوب ایران با استفاده از تصویربرداری پزشکی با تفکیک پذیری ۲۰۰ میکرومتر، الگوریتمی بر مبنای روش‌های نوین تصویربرداری، پردازش تصویر و برنامه‌نویسی هوشمند، ارائه شده است. برای استخراج اطلاعات از تصاویر به دست آمده از پلاگ‌ها، ابتدا ناحیه موردنظر تصویر (قسمتی از عکس که تصویر پلاگ در آنجا قرار دارد) به صورت هوشمند جداسازی شده و مقادیر پیکسل‌های آن ذخیره شده است. سپس، با ترسیم هیستوگرام تمامی تصاویر تهیه شده از هر پلاگ، و برقراری رابطه‌ی منطقی بین مقدار بیشینه هیستوگرام و مقدار تخلخل مؤثر گزارش داده شده توسط آزمایشگاه، مقدار تخلخل پلاگ‌ها تعیین شده است.

## ۲- تصویربرداری پزشکی

تصویربرداری پزشکی یکی از روش‌های غیرمخرب، ارزان، آسان و سریع است که قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی از درون اجسام را دارا است. تصاویر پزشکی به صورت قطاع‌هایی موازی تهیه می‌شوند. پرکاربردترین دستگاه‌های تصویربرداری پزشکی در علوم زمین، دستگاه توموگرافی پرتو ایکس<sup>(۲)</sup> و دستگاه

تصویربرداری تشدید مغناطیسی<sup>(۳)</sup> هستند [۳، ۷]. دستگاه توموگرافی پرتو ایکس تصاویر مقیاس خاکستری تولید می‌کند که مبنای اندازه‌گیری ضریب تضعیف<sup>(۴)</sup> پرتوهای ایکس حین عبور از جسم است [۳]. بنابراین، با توجه به چگالی جسم، تصاویر حاصل از توموگرافی پرتو ایکس دارای شدت روشنایی متفاوتی خواهند بود. هر چه جسم متراکم‌تر باشد، تصویر حاصل از توموگرافی پرتو ایکس به رنگ سفید نزدیک‌تر بوده، و هر چه تراکم کمتر باشد تصویر حاصل به رنگ سیاه نزدیک‌تر خواهد بود. بنابراین، ماتریکس سنگ‌ها در تصاویر توموگرافی پرتو ایکس، سفیدتر از فضای متخلخل خواهد بود (شکل ۱). تصاویر حاصل از توموگرافی پرتو ایکس، تخلخل کل موجود در نمونه شامل تخلخل‌های متصل و غیرمتصل را نشان می‌دهد. تصاویر حاصل از دستگاه تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) نیز در مقیاس خاکستری بوده، و بر مبنای اندازه‌گیری پاسخ یون هیدروژن موجود در اجسام است. بنابراین، تصویربرداری MRI در مواردی کاربرد دارد که درون جسم مورد نظر مقادیر زیادی آب یا چربی، که اشباع از یون هیدروژن هستند، وجود داشته باشد. تصویربرداری MRI بر روی نمونه‌هایی که آب دار شده و سیلاب زنی شده باشند قابل استفاده خواهد بود و در این حالت تنها قادر است تخلخل‌های متصل به هم را در تصاویر حاصله نشان دهد [۷]. در تصاویر حاصل از MRI، نواحی سفید رنگ نشان‌دهنده فضای متخلخل و نواحی تیره رنگ نشان‌دهنده ماتریکس سنگ هستند (شکل ۲) [۷].

## ۳- جمع‌آوری پایگاه داده‌ای

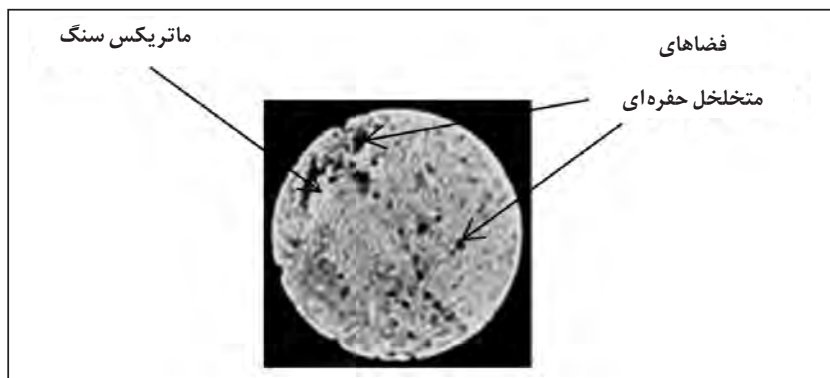
به منظور جمع‌آوری پلاگ‌های تهیه شده از مخازن نفتی و تصویربرداری از آنها با استفاده از ابزارهای تصویربرداری پزشکی، از تعداد ۱۹ پلاگ تهیه شده از یکی از مخازن نفتی جنوب ایران استفاده شده است. جنس پلاگ‌ها کربناته بوده و میزان تخلخل آنها بین ۱۱/۳۲٪ تا ۳۴/۹۲٪ است. پلاگ‌ها استوانه‌ای شده و قطر هر پلاگ ۱/۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۶ سانتی‌متر است. از هر پلاگ تعداد ۱۰۰ تصویر در امتداد عمود بر پلاک‌ها تهیه شده است. فاصله هر تصویر، برابر با ۶۰۰ میکرومتر است.

1-Resolution

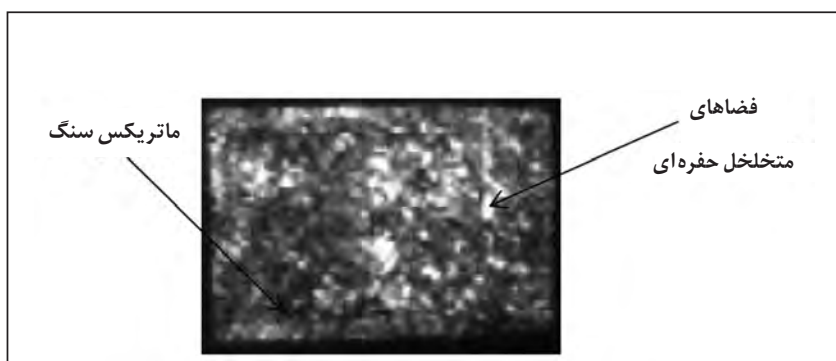
2-X-ray computed tomography

3-Magnetic resonance imaging (MRI)

4-Coefficient of attenuation



شکل ۱- تصویر مقطع عمود بر محور پلاگ حاصل از توموگرافی پرتو ایکس



شکل ۲- تصویر مقطعی در راستای محور پلاگ توسط تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI)

پلاگ‌های مورد بررسی را با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس بیان می‌کند.

#### ۴-۱- استخراج ناحیه مورد نظر

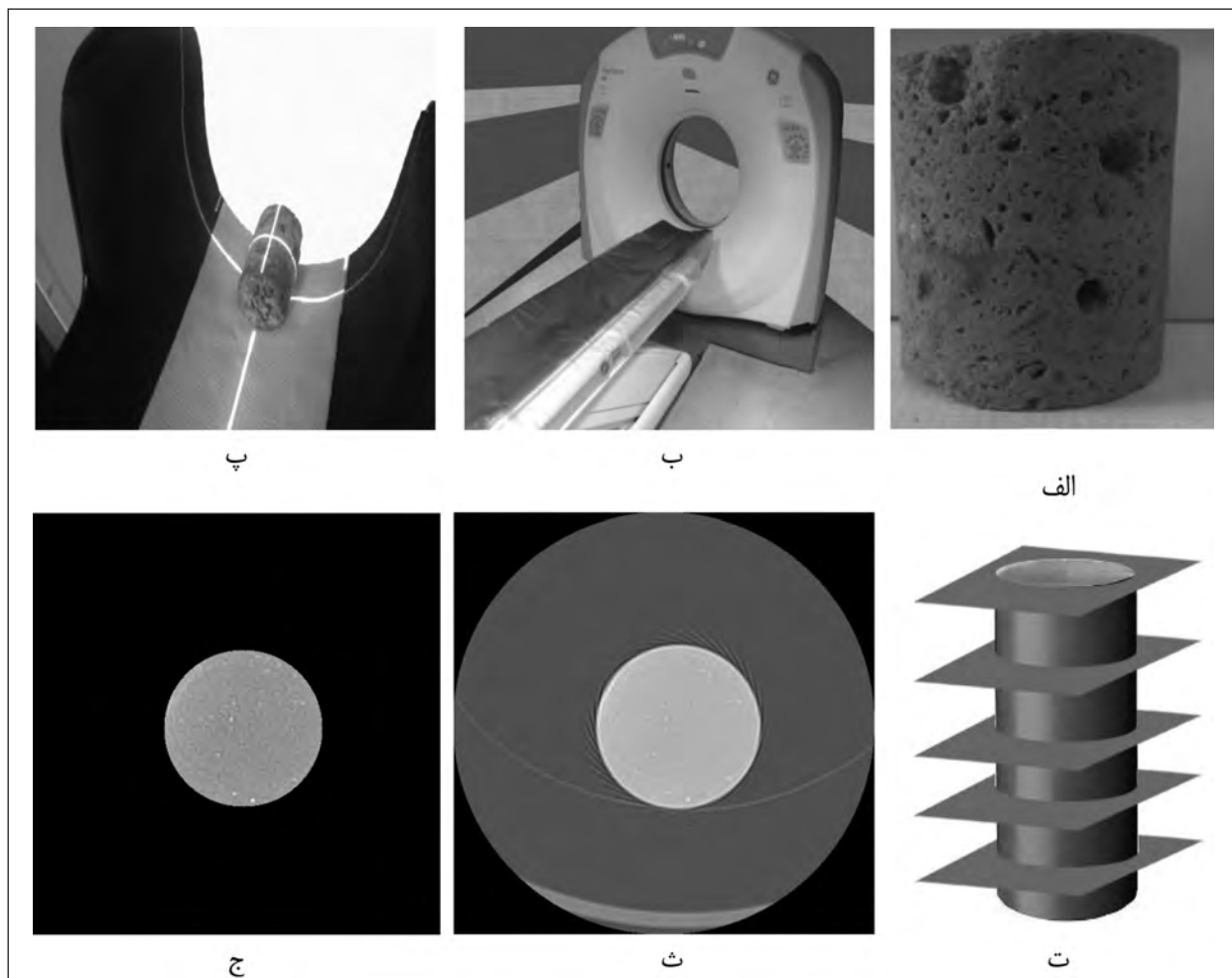
به منظور استخراج ناحیه مورد نظر از تصاویر، الگوریتم‌هایی بر مبنای باینری کردن تصویر و جداسازی ناحیه مورد نظر توسعه داده شد. در ابتدا، با تعیین یک حد آستانه بر اساس الگوریتم متداول اوتسو [۱۵] ناحیه مورد نظر به صورت یک دایره سفید جدا شده و سپس با ضرب این تصویر در تصویر اصلی، ناحیه مورد نظر استخراج شد (شکل ۵).

۴-۲- ترسیم هیستوگرام تمامی تصاویر تهیه شده برای هر پلاگ هیستوگرام تصاویر، همواره دارای اطلاعات ارزشمندی به منظور انجام پردازش‌های مختلف بر روی تصاویر هستند. از هیستوگرام‌ها همچنین می‌توان به منظور تعیین مقدار آستانه برای باینری کردن تصاویر تعیین مقدار تخلخل استفاده کرد. هیستوگرام یکی از پلاک‌های موجود در پایگاه داده‌ای با مقدار تخلخل موثر ۱۹/۵۳٪ در شکل ۶ نشان داده شده است.

میزان تفکیک پذیری تصاویر نیز برابر با ۲۰۰ میکرومتر می‌باشد. روند تهیه تصاویر از پلاگ‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۴- استخراج اطلاعات آماری و تعیین مقدار تخلخل

به منظور استخراج اطلاعات آماری و تعیین مقدار تخلخل پلاگ‌ها، الگوریتمی بر مبنای روش‌های نوین تصویربرداری، پردازش تصاویر دیجیتال و برنامه نویسی هوشمند با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس توسعه داده شد. به این منظور، ابتدا ناحیه مورد نظر از تصاویر حاصله جداسازی (شکل ۳-ج) و اطلاعات آماری شامل بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و مد برای هر قطاع و برای تمام قطاع‌ها استخراج شد. همچنین، هیستوگرام حاصله از تمامی تصاویر هر پلاگ رسم شد. هیستوگرام‌های رسم شده برای هر پلاگ، دارای رابطه منطقی با میزان تخلخل مؤثر گزارش شده توسط آزمایشگاه‌های مغزه برای آن پلاگ هستند. فلوچارت نشان داده شده در شکل ۴، مراحل استخراج اطلاعات آماری و تعیین مقدار تخلخل



شکل ۳- روند تهیه تصاویر از پلاگ‌ها توسط دستگاه توموگرافی پرتو ایکس و MRI پزشکی. الف) یکی از پلاگ‌های مورد بررسی؛ ب) دستگاه توموگرافی پرتو ایکس پزشکی؛ پ) قرار دادن پلاگ بر روی دستگاه به منظور تهیه تصویر توموگرافی پرتو ایکس؛ ت) تهیه تصاویر توموگرافی پرتو ایکس در راستای صفحات افقی عمود بر محور پلاگ؛ ث) یکی از تصاویر توموگرافی تهیه شده؛ ج: استخراج ناحیه مورد نظر از تصویر به دست آمده از تصویربرداری توموگرافی پرتو ایکس

#### ۴-۳- استخراج مقدار بیشینه فراوانی پیکسل‌ها و مقادیر

سی تی اسکن

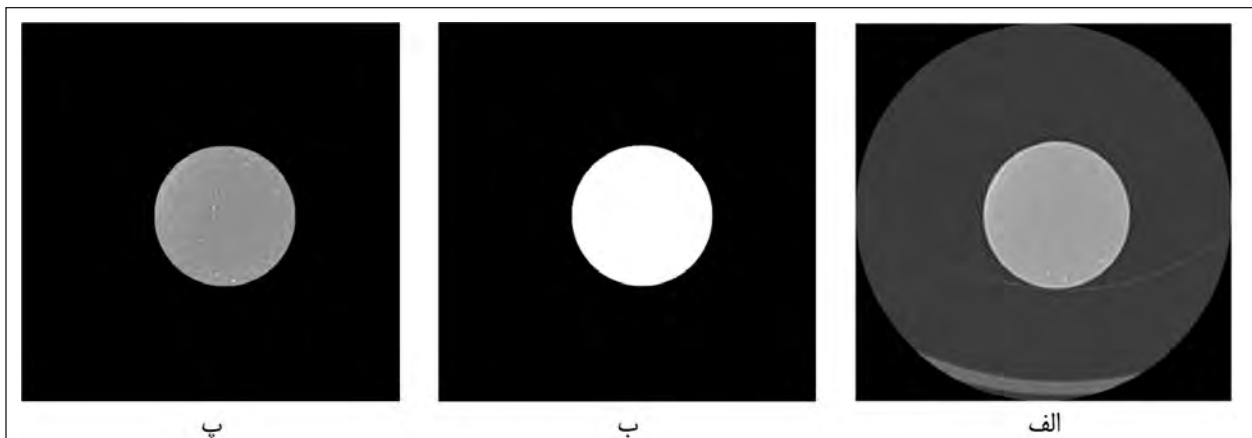
تصاویر تهیه شده به وسیله توموگرافی پرتو ایکس دارای رابطه مستقیم با چگالی جسم است. بنابراین، می‌توان رابطه‌ای بین مقدار تخلخل و مقادیر پیکسل‌های تصاویر تهیه شده به وسیله توموگرافی پرتو ایکس نیز به وجود آورد. یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌هایی که می‌توان از هیستوگرام تصاویر استخراج کرد، مقدار بیشینه و همچنین مقدار فراوانی بیشینه هیستوگرام است. همچنین از مقادیر سی تی اسکن می‌توان برای استخراج اطلاعات آماری تصاویر نیز بهره برد.

#### ۵- نتایج آزمایشگاهی

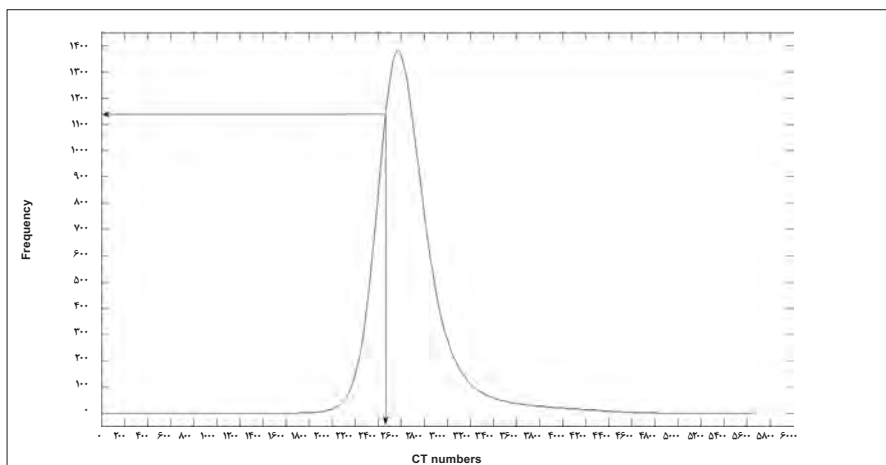
پس از استخراج اطلاعات آماری و هیستوگرام‌ها، و همچنین مقادیر بیشینه مقدار فراوانی بیشینه هیستوگرام‌ها برای هر پلاگ، رابطه‌ای مستقیم بین مقدار تخلخل گزارش شده توسط آزمایشگاه و مقادیر بیشینه استخراج شده از هیستوگرام‌ها مشاهده شد. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، به ازای مقدار سی تی ۲۴۶۶ و مقدار فراوانی ۱۱۴۰، مقدار تخلخل گزارش شده توسط برنامه هوشمند توسعه داده شده برابر با ۱۹/۴۶٪ و تخلخل کل ۲۰/۵۹٪ است. نمای سه بعدی فضای متخلخل پلاگ با هیستوگرام نشان داده شده در شکل ۶، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی به منظور استخراج اطلاعات آماری و تعیین مقدار تخلخل پلاک های مورد بررسی را با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتو ایکس



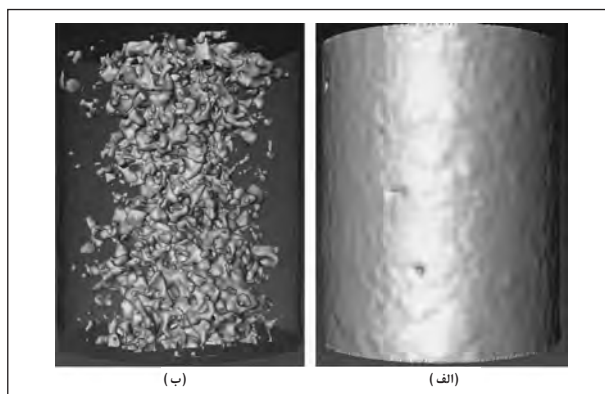
شکل ۵- استخراج ناحیه مورد نظر از تصویر اصلی. الف: تصویر اصلی؛ ب: تصویر باینری با استفاده از روش اوتسو؛ پ: حاصل ضرب تصویر باینری شده در تصویر اصلی



شکل ۶- هیستوگرام یکی از پلاک‌های موجود در پایگاه داده‌ای با مقدار تخلخل مؤثر ۱۹/۵۳٪ به ازای مقدار سی تی ۲۴۶۶ و مقدار فراوانی ۱۱۴۰، مقدار تخلخل گزارش شده توسط برنامه هوشمند توسعه داده شده برابر با ۱۹/۴۶٪ و تخلخل کل ۲۰/۵۹٪ است.

## ۶- نتیجه‌گیری

تعیین میزان تخلخل و همچنین تهیه نمای سه بعدی از فضای متخلخل، نقش مهمی در شناسایی ویژگی‌های سنگی و به ویژه مدیریت و ارزیابی مخازن نفتی ایفا می‌کند. در این مقاله، الگوریتمی بر مبنای روش‌های نوین تصویربرداری، پردازش تصویر و برنامه نویسی هوشمند، به منظور تعیین مقدار تخلخل مؤثر و کل و همچنین استخراج اطلاعات آماری از تصاویر توموگرافی پرتوایکس تهیه شده از پلاک‌های نفتی، معرفی شده است. الگوریتم پیشنهادی قابلیت جداسازی هوشمند ناحیه مورد نظر از تصویر خام توموگرافی پرتوایکس را دارا می‌باشد. پس از استخراج ناحیه مورد نظر، اطلاعات آماری تمامی تصاویر مربوط به هر پلاک، شامل بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و مد برای هر قطاع و برای تمام قطاع‌ها، استخراج و به عنوان خروجی ارائه شد. سپس، با ترسیم هیستوگرام برای هر پلاک و استخراج نقاط بیشینه و کمینه از نمودار، مقدار تخلخل مؤثر هر پلاک با استفاده از تصاویر توموگرافی پرتوایکس محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر تخلخل مؤثر، تخلخل‌های کل برای هر پلاک نیز تعیین شد. این در حالی است که مقدار تخلخل کل در آزمایشگاه‌های مغزه قابل اندازه‌گیری نیست. نمای سه بعدی فضای متخلخل نیز برای هر پلاک شبیه‌سازی شد. اعمال الگوریتم پیشنهادی برای مطالعه تصاویر توموگرافی پرتوایکس



شکل ۷- نمای سه بعدی از یک پلاک با تخلخل مؤثر برابر با ۱۹/۴۶٪ و تخلخل کل ۲۰/۵۹٪ الف: حالت کلی شبیه‌سازی شده پلاک؛ ب: فضای متخلخل درون پلاک

۱۹ پلاک تهیه شده از یکی از مخازن جنوب ایران، مقدار تخلخل مؤثر با درستی میانگین ۹۳/۱۳٪ را به دست داد. الگوریتم پیشنهادی به صورت کم هزینه‌تر و سریع‌تر نسبت به روش‌های متداول و همچنین با درستی بالا، قابلیت تعیین مقدار تخلخل مؤثر و کل، و همچنین استخراج اطلاعات آماری و تهیه نمای سه بعدی فضای متخلخل در پلاک‌های تهیه شده از مخازن نفتی را دارا است.

- [1] Tiab, D., Donaldson, E.C., 2004. *Petrophysics, theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf professional publishing (Elsevier).
- [2] Ketcham, R.A., Carlos, W.D., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomography imagery: applications to the geosciences. *Computers and Geosciences*, 27, 381-400.
- [3] Andrä, H., N, Combaret., J, Dvorkin., E, Glatt., J, Han., M, Kabel., Y, Keehm., F, Krzikalla., M, Lee., C, Madonna., M, Marsh., T, Mukerji., E.H, Saenger., R, Sain., N, Saxena., S, Ricker., A, Wiegmann., X, Zhan., 2013, Digital rock physics benchmarks-part I: Imaging and segmentation. *Computers and geosciences*, vol. 50, 25-32.
- [4] Campello, S.L., Dos samtos, W.P., Machado, V.F., Mota, C.C.B.O., Gomes, A.S.L., De souza, R.E., 2014, Micro structure information of porous materials by optical coherence tomography. *Microporous and mesoporous materials*, vol. 198, pp: 50-54.
- [5] Jia. L., Chen. M., Jin. Y., 2014, 3d imaging of fractures in carbonate rocks using X-ray computed tomography technology. *Carbonate evaporates*, vol. 29, pp: 147-153.
- [6] Kinney, J.H., M.C, Nichols., 1992, X-ray tomographic microscopy (XTM) using synchrotron radiation. *Annu. Rev. Mater. Sci.* vol. 22, 121–152.
- [7] Mitchell, J., Chandrasekera, T.C., Holland, D.J., Gladden, L.F., Fordham. E.J., 2013. Magnetic resonance imaging in laboratory petrophysical core analysis. *Physics reports*, vol. 526, pp: 165-225.
- [8] Machado, A.C., I, Lima., and R.T, Lopes., 2014, Effect of 3d computed microtomography on the reservoir rocks. *Radiation physics and chemistry*, vol. 95, 405-407.
- [9] Ojeda-Magaña, B., J, Quintanilla-Dominguez., R. Ruelas., A.M, Tarquis., L, Gómez-Barba., and D. Andina., 2014, Identification of pore spaces in 3D CT soil images using PFCM partition clustering. *Geoderma*, vol. 218, 90-101.
- [10] Rabbani, A., Jamshidi, S., Salehi, S., 2014, An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro tomography images. *Journal of petroleum science and engineering*, vol. 123, 164-171.
- [11] Sezgin, M., B, Sankur., 2004. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation, *journal of electronic imaging*, vol. 13, 146-165.
- [12] Taud, H., R, Martinez-Angeles., J.F, Parrot., and L, Hernandez-Escobedo., 2005. Porosity estimation method by X-ray computed tomography, *Journal of petroleum science and engineering*, vol. 47, 209-217.
- [13] Trong, E.L., O, Rozenbaum., J.L Rouet., and A., Bruand., 2008. A methodology to segment X-ray tomographic images of multiphase porous media: application to building stones, hal-00260435, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00260435>.
- [14] Wildwenschild, D., J.W, Hopmans., C.M.P, Vaz., M.L, Rivers., ,D. , Rikard., and B.S.B, Christensen., 2002, Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *Journal of hydrology*, vol. 267, 285-297.
- [15] Otsu, N, 1979. A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-9, no. 1, pp. 62–66.