

توسعه یک الگوریتم خودکار بر مبنای نشانگرهای لرزه‌ای و عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی برای آشکارسازی گنبد نمکی

سید سجاد حسینی جنبذی^۱؛ محمدرداد^{۲*} و امین روشندل کاهو^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: mraddad@shahroodut.ac.ir

چکیده

گنبدهای نمکی، به عنوان ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، با ایجاد الگوهای بازتابی آشفته در داده‌های لرزه‌ای، چالش‌های متعددی را در فرآیند تفسیر به وجود می‌آورند. از سوی دیگر، با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌های لرزه‌ای و زمانبر بودن تفسیر دستی آنها، توسعه روش‌هایی که توانایی ارائه خودکار یک مدل نهایی سه‌بعدی از گنبد نمکی را داشته باشند، جذاب و کاربردی است. این پژوهش با هدف توسعه روشی خودکار و کارآمد برای شناسایی مرز گنبدهای نمکی در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و تولید مدل سه‌بعدی از گنبد انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، الگوریتمی ترکیبی مبتنی بر تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای و عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی طراحی و پیاده‌سازی شده است. در مرحله اول، تحلیل نشانگری بر روی حجم داده لرزه‌ای و برای تشخیص بافت گنبد نمکی انجام می‌شود. سه نشانگر لرزه‌ای انرژی بافتی، بی‌نظمی بافتی و آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرحله بعد، حجم نشانگر پس از نرمال‌سازی به حجم باینری تبدیل می‌گردد. سپس، با اعمال توالی مناسبی از عملگرهای ریخت‌شناسی (شامل عملگرهای باز کردن و پر کردن حفره)، حجم نهایی پالایش شده گنبد نمکی با وضوح بالا استخراج می‌شود. الگوریتم بر روی یک حجم داده لرزه‌ای سه‌بعدی مربوط به تنگه هرمز ایران شامل ۲۸۰ خط گیرنده، ۳۱۱ خط چشمه و ۴۲۶ نمونه زمانی اعمال شده است. ارزیابی نتایج نشان داد که روش پیشنهادی نه تنها قادر است با دقتی خوب و نزدیک به تفسیر دستی عمل کند، بلکه این نتیجه را در بازه زمانی بسیار معقول و قابل قبول حدوداً ۳۰ ثانیه به دست می‌آورد. همچنین ارزیابی کمی نتایج نشان داد که در میان نشانگرهای لرزه‌ای استفاده شده، نشانگر انرژی بافتی بهترین عملکرد را با بالاترین مقدار معیار فاصله سطحی متقارن متوسط در شناسایی مرز گنبد نمکی داراست. مزیت اصلی این پژوهش، ارائه الگوریتمی خودکار است که در بازه زمانی بسیار معقول و قابل قبول، قادر به تولید مدل سه‌بعدی نهایی از گنبد نمکی می‌باشد. این قابلیت، وابستگی فرآیند تفسیر به قضاوت ذهنی مفسر را به حداقل رسانده و امکان پردازش کارآمد داده‌های حجیم لرزه‌ای در مقیاس صنعتی را فراهم می‌سازد.

واژگان کلیدی

گنبد نمکی
نشانگر لرزه‌ای
ریخت‌شناسی ریاضیاتی
الگوریتم خودکار
مدل سه‌بعدی

۱- مقدمه

حرکت نمک معمولاً منجر به شکل‌گیری ساختارهایی با شیب‌های تند و هندسه‌های پیچیده می‌شود که چالش‌های قابل‌توجهی در مدل‌سازی سرعت و مهاجرت داده‌های لرزه‌ای ایجاد می‌کند. هنگامی که نمک به‌صورت یک توده جریان می‌یابد، سرعت جریان آن به دلیل ناهمگنی‌های موضعی درون توده نمک و تغییرات ضخامت آن، متغیر است. این ناپایداری در جریان، موجب چین‌خوردگی لایه‌های نمکی می‌شود (Jones and Davison, 2014). زمانی که حجم قابل توجهی از سنگ‌های تبخیری در میان سنگ‌های رسوبی تجمع یابد، این سازه‌ها تحت عنوان گنبدهای نمکی شناخته می‌شوند (Wang, 2018). گنبدهای نمکی، به‌دلیل ویژگی نفوذناپذیری خود، به‌عنوان سد مؤثر عمل کرده و مانع مهاجرت هیدروکربن‌ها می‌شوند؛ در نتیجه محیطی ایده‌آل برای ایجاد تله و تجمع ذخایر نفت و گاز فراهم می‌کنند. بنابراین، شناسایی و مدل‌سازی دقیق این ساختارها در مطالعات زمین‌شناسی نفت، به‌ویژه برای توصیف مخازن هیدروکربنی زیرسطحی، از اهمیت بالایی برخوردار است (Wang, 2018; Schultz-Ela et al., 1993). این ساختارهای گنبدی در داده‌های لرزه‌ای مهاجرت‌یافته، بازتاب‌های نامنظم و آشفته‌ای از خود نشان می‌دهند که بافت لرزه‌ای متمایزی را نسبت به سایر ساختارهای زمین‌شناسی ایجاد می‌کند. مرز بالایی یک گنبد نمکی معمولاً در داده‌های لرزه‌ای به‌صورت نواحی با تباین امپدانس بالا و لبه‌های مشخص قابل تشخیص است. در مقابل، مرزهای جانبی گنبدهای نمکی غالباً فاقد چنین تباین بالایی هستند. علاوه بر این، محدودیت‌های فیزیکی ذاتی در فرآیند به تصویرکشیدن لرزه‌ای زیرسطحی، شناسایی دقیق این مرزهای جانبی را با دشواری بیشتری مواجه می‌سازد. با این حال، بازتاب‌های درونی نامنظم و پراکنده درون گنبد نمکی، بافت لرزه‌ای منحصربه‌فردی ایجاد می‌کند که آن را از نواحی غیرنمکی مجاور متمایز می‌سازد. بر این اساس، مفسران داده‌های لرزه‌ای می‌توانند موقعیت این مرزهای جانبی را عمدتاً از طریق تشخیص تغییرات ناگهانی در بافت لرزه‌ای بین مناطق نمکی و غیرنمکی، تعیین کنند. همچنین تغییرات انرژی و نیز شباهت در مرز گنبد نمکی می‌تواند معیاری برای شناسایی این ساختار باشد. بر این مبنای نشانگرهای مختلف لرزه‌ای وجود دارند که می‌توانند در این زمینه موفق باشند که از میان آنها می‌توان به انرژی، آشفستگی، بی‌نظمی، شباهت و همدوسی اشاره کرد (Jackson and Hudc, 2017).

در زمینه ترکیب و استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای در راستای تفسیر و شناسایی گنبدهای نمکی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. (Di and AlRegib, 2017) با استفاده از تکنیک‌های طبقه‌بندی مرزهای گنبدنمکی را به خوبی نمایش دادند و با تولید نشانگر برای مدل‌های طبقه‌بندی آموزشی به تطابق مناسب مرزهای نمک شناسایی شده و داده‌های لرزه‌ای اصلی دست یافتند. چمبری و همکاران (۱۳۹۷) روشی داده‌محور مبتنی بر GIS ارائه دادند که با استفاده از تلفیق نشانگرهای لرزه‌ای و روش فازی، بدون نیاز به داده‌های برچسب‌خورده قادر به آموزش مدل است. این الگوریتم با حداقل اطلاعات اولیه، نشانگرهای مختلف مبتنی بر GLCM را ترکیب می‌کند. روشندل کاهو و همکاران (۱۴۰۰)

از نشانگر گرادیان بافت سه‌بعدی برای تشخیص تغییرات بافتی استفاده کردند. بررسی‌های آن‌ها بر داده‌های لرزه‌ای و مدل‌های مصنوعی نشان داد که این روش می‌تواند جایگزین مؤثری برای تفکیک بافت‌های مختلف و تعیین محدوده گنبد نمکی باشد. (Tavakolizadeh and Bagheri, 2022) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی نظارت‌شده و بدون نظارت، داده‌های لرزه‌ای را برای شناسایی ساختارهای نمکی تحلیل کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که این روش‌ها تفکیک دقیق‌تری بین اجسام نمکی و پس‌زمینه ایجاد می‌کنند و همچنین بر اهمیت انتخاب نشانگرها در بهبود تکنیک‌های یادگیری ماشین تأکید دارد. (Lawal et al., 2021) با استفاده از مدل تشخیص برجستگی آگاه از زمینه (CAS)، روشی برای شناسایی گنبدهای نمکی در تصاویر لرزه‌ای ارائه کردند. آزمایش‌های انجام‌شده بر داده‌های واقعی نشان داد که این روش به‌طور دقیق ساختارهای نمکی را برجسته کرده و تشخیص می‌دهد، که به بهبود کارایی مدل‌سازی زمین‌شناسی، کاهش زمان پردازش، و تسهیل کار مفسران کمک می‌کند. (Khyer et al., 2022) بر اساس نظریه گراف ترکیبی از نشانگرهای لرزه‌ای را برای شناسایی گنبد نمکی در داده‌های لرزه‌ای بکار بردند. نتایج آنها در مقایسه با تکنیک MLP عملکرد بهتری نشان داد.

از آنجایی‌که تفسیر گنبدهای نمکی را می‌توان به‌عنوان یک مسئله تقسیم‌بندی ساختاری در زمینه پردازش تصویر نیز در نظر گرفت (Wang, 2018)، استفاده از روش‌های پردازش تصویر برای شناسایی و تفسیر گنبدهای نمکی امکان‌پذیر است. یکی از ابزارهای پردازش تصویر، ریخت‌شناسی ریاضیاتی است که برای استخراج اجزای تصویر و توصیف شکل‌های مختلف نظیر مرزها، اسکلت‌ها و ساختارهای خمیده استفاده می‌شود. عملکرد ریخت‌شناسی ریاضیاتی در زمینه پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای در تحقیقاتی نشان داده شده است. (Liu et al., 2019) با ارائه مفاهیم پایه‌ای ریخت‌شناسی ریاضیاتی و تعریف نقش آن در پردازش داده‌های لرزه‌ای، تأثیر مثبت آن را در جهت کاهش نویزهای همدوس و غیرهمدوس بررسی کردند که نتیجه آن بهبود نسبت سیگنال به نویز شد. (Mousavi et al., 2022) از الگوریتم فرسایش ریخت‌شناسی ریاضی برای تقویت تصاویر نشانگری گسل جهت استفاده در الگوریتم‌های لبه‌یابی استفاده کردند.

استفاده از ابزارهای شناسایی رویدادهای زمین‌شناسی مثل گنبد نمکی در داده‌های لرزه‌ای، علی‌رغم توانمندی آنها، با یک چالش نیز همراه است. حجم داده‌های لرزه‌ای عموماً بزرگ است و تفسیر بصری آنها به منظور مدل‌سازی توده زیرسطحی کاری زمانبر است. بنابراین توسعه روش‌هایی که توانمندی پیاده‌سازی خودکار داشته باشد و بتواند با یک دقت قابل قبول در نهایت یک مدل دوبعدی یا سه بعدی از رویداد زمین‌شناسی مورد نظر ارائه دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور رویکرد این مقاله این است که الگوریتمی پیشنهاد شود که بتواند در یک زمان اجرای معقول و با یک دقت قابل قبول، با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای و نیز عملگرهای ریخت‌شناسی، بصورت خودکار یک مدل سه‌بعدی از گنبد نمکی بدست دهد.

ساختار ادامه مقاله به این شرح است: بخش دوم، مبانی نظری

مشتقات مکانی را اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر ویژه آن بیانگر میزان و جهت‌داری بی‌نظمی محلی هستند. نشانگر آشفستگی که از نسبت این مقادیر ویژه به دست می‌آید، بنابراین یک کمیت سه‌بعدی است که توانایی تفکیک نواحی آشفته (مانند درون گنبد نمکی) از نواحی لایه‌ای منظم (سنگ‌های رسوبی) را داراست و اطلاعات جامعی درباره جهت‌دار بودن یا بی‌نظمی ساختارهای محلی در اختیار قرار می‌دهد (Hale, 2013). از دیدگاه زمین‌شناسی، مقادیر بالای آشفستگی معمولاً با نواحی دارای بی‌نظمی ساختاری بالا مرتبط هستند. نواحی در داده‌های لرزه‌ای که مقدار نشانگر آشفستگی زیاد باشد متناظر با الگوی آشفستگی داده‌ها (در اینجا ناحیه گنبد نمکی) است.

ماتریس هم رخداد سطح خاکستری (GLCM) و نشانگرهای مشتق‌شده از آن ابزارهایی برای طبقه‌بندی تصویر هستند که اساساً، GLCM میزان وقوع ترکیبات مختلف مقادیر روشنایی پیکسل‌ها را در یک تصویر اندازه‌گیری می‌کند. بیشتر کاربردهای GLCM تنها برای طبقه‌بندی تصاویر دوبعدی بوده‌اند اما امروزه بخش زیادی از داده‌های لرزه‌ای موجود سه‌بعدی هستند. بنابراین، برای طبقه‌بندی داده‌های لرزه‌ای لازم است محاسبه GLCM به گونه‌ای تنظیم شود که در فضای سه بعدی کار کند. در داده‌های لرزه‌ای از GLCM برای تحلیل ارتباط فضایی بین مقادیر دامنه لرزه‌ای استفاده می‌شود و بر این مبنا نشانگرهای مختلفی توسعه داده شده‌اند که می‌توان به عنوان مثال به انرژی، تباین، همبستگی، واریانس و بی‌نظمی اشاره کرد (Eichkitz et al., 2013). در این مقاله علاوه بر نشانگر آشفستگی که پیش‌تر توضیح داده شد، از نشانگرهای بافتی انرژی و بی‌نظمی نیز استفاده شده است. انرژی معیاری از همگنی و یک‌دستی بافت تصویر (در اینجا داده لرزه‌ای) می‌باشد و بی‌نظمی معیاری از تصادفی بودن و پیچیدگی بافت لرزه‌ای است. روابط (۲) و (۳) به ترتیب بیانگر نشانگرهای انرژی بافتی و بی‌نظمی بافتی است (Chopra and Alexeev, 2006):

$$GLCM_{energy} = \left(\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} M_{i,j}^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$GLCM_{entropy} = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} M_{i,j} \log M_{i,j} \quad (3)$$

که $M_{i,j}$ نشان‌دهنده مقدار ماتریس هم‌رویداد سطح خاکستری نرمالیزه شده در موقعیت i و j است و N_g تعداد سطوح خاکستری را مشخص می‌کند.

۲-۲- ریخت‌شناسی ریاضیاتی

ابزار دیگر مورد استفاده در این مقاله، پردازش تصویر و عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی است. فیلتر ریخت‌شناسی ریاضیاتی یک روش قدرتمند پردازش تصویر مبتنی بر نظریه مجموعه‌ها و عملیات منطقی است که بطور گسترده‌ای در دسته‌بندی تصاویر، کاهش نویز و

نشانگرهای لرزه‌ای و عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی به کار رفته را تشریح کرده و روش‌شناسی و نمودار الگوریتم پیشنهادی را تبیین می‌نماید. بخش سوم، نتایج تجربی حاصل از اعمال الگوریتم بر یک مجموعه داده لرزه‌ای سه‌بعدی را به همراه تفسیر آنها ارائه می‌دهد. در نهایت، بخش چهارم به بحث جامعی درباره یافته‌ها پرداخته و مقاله را به پایان می‌برد.

۲- تئوری

به منظور شناسایی گنبد نمکی در حجم داده لرزه‌ای و در نهایت تهیه مدل سه‌بعدی از گنبد، در این مقاله یک الگوریتم خودکار پیشنهاد می‌شود. فرایند کار شامل دو مرحله کلی تحلیل نشانگر لرزه‌ای و ریخت‌شناسی ریاضیاتی است. در مرحله تحلیل نشانگر لرزه‌ای، نشانگر مورد نظر (در اینجا نشانگرهای آشفستگی، انرژی بافتی و بی‌نظمی بافتی) از حجم داده لرزه‌ای محاسبه می‌شود. سپس در مرحله بعد، در یک فرایند پردازش تصویر بر روی حجم نشانگری برخی عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی در قالب یک الگوریتم معرفی شده اعمال می‌شود تا در نهایت مدل سه‌بعدی گنبد نمکی حاصل شود. در ادامه به ارائه مباحث تئوری این فرایندها و همچنین فلوچارت الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۲-۱- تحلیل نشانگر لرزه‌ای

نشانگر لرزه‌ای ابزاری محاسباتی و تحلیلی است که از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شود و به زمین‌شناسان و کارشناسان ژئوفیزیک کمک می‌کند تا ویژگی‌های زمین‌شناسی و مخزنی مورد نظر را شناسایی، تحلیل و بصری‌سازی کنند (روشن‌دل کاهو و همکاران، ۱۴۰۰). با توجه به ماهیت ساختاری و ویژگی‌های زمین‌شناسی و فیزیکی، برای شناسایی و تفسیر رویدادهای مختلف زیرسطحی در داده‌های لرزه‌ای نشانگرهای مختلفی توسعه داده شده‌اند. از نشانگرهای کارا در زمینه‌ی شناسایی گنبد نمکی و تعیین مرزهای آن، می‌توان به نشانگرهای بافتی، آشفستگی، انحنا، دامنه، شباهت و بی‌نظمی اشاره کرد. در این مقاله از نشانگرهای آشفستگی، انرژی بافتی و بی‌نظمی بافتی استفاده شده است که دو نشانگر اخیر از ماتریس هم رخداد سطح خاکستری (GLCM) مشتق می‌شوند (Chopra and Marfurt, 2007).

نشانگر آشفستگی معیاری از میزان به هم ریختگی و تصادفی بودن در داده لرزه‌ای است که در آن نواحی با انسجام کم معمولاً با الگوهای سیگنال آشفته مطابقت دارند. این نشانگر یک گزینه مناسب برای شناسایی بافت‌های آشفته مثل گنبدهای نمکی است و در سه بعد بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Eichkitz et al., 2013):

$$chaos = \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3} - 1 \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (1)$$

که در آن λ_i مقادیر ویژه ماتریس کواریانس تانسور ساختاری گرادیان داده لرزه‌ای می‌باشد. ماتریس کواریانس تانسور ساختاری گرادیان به صورت محلی (در یک پنجره همسایگی کوچک حول هر وکسل یا عنصر حجمی) و در هر سه راستای فضایی (خط چشمه، خط گیرنده و زمان/عمق) محاسبه می‌شود. این ماتریس 3×3 ، تغییرات مشترک

این روش معمولاً برای بازسازی بخش‌های از دست رفته یا پنهان، قطعه‌بندی اشیاء یا حذف نویز به کار می‌رود. این فرآیند شامل تغییرات پیوسته پیکسل‌ها بر اساس قوانین اتصال است، به گونه‌ای که یک ناحیه تعریف شده به طور سیستماتیک پر شود و در عین حال ساختار کلی تصویر حفظ گردد. در ریخت‌شناسی باینری، پر کردن ناحیه معمولاً از یک نقطه‌ای اولیه آغاز شده و به صورت تکراری با استفاده از عملیات اتساع گسترش می‌یابد، در حالی که محدودیت‌های مشخص (مانند اجتناب از مرزها) رعایت می‌شوند. در رابطه (۷) این عملیات را برای ناحیه پرشده X_i با عنصر ساختاری (S) نشان می‌دهد و B^c نیز مکمل تصویر اصلی (پس زمینه) است (Shih, 2017):

$$X_i = (X_{i-1} \oplus S) \cap B^c, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

که برای آخرین تکرار $H = X_i$

در مورد داده‌های لرزه‌ای از عملگرهای پردازش تصویر ارائه شده می‌توان در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. با توجه به رویکرد این مقاله که تفسیر داده‌های لرزه‌ای است، قابل ذکر است که جهت استفاده از عملگرهای ریخت‌شناسی، مقطع لرزه‌ای یا مقطع نشانگری (چه بصورت برش inline یا برش xline یا برش زمانی) می‌تواند در حکم تصویر به فرایند ریخت‌شناسی وارد شود. اما همانطور که هدف این مقاله نیز است، یک حجم سه بعدی (اینجا حجم‌های نشانگری) نیز می‌تواند بعنوان تصویر سه بعدی در فرایند ریخت‌شناسی وارد شود. نکته قابل ذکر دیگر این است که عملگرهای ریخت‌شناسی مانند فرسایش، اتساع، باز شدن و غیره همگی باید بر روی تصاویر سطح خاکستری یا تصاویر باینری شده اعمال شوند. در اینجا تصاویر باینری شده در فرایند ریخت‌شناسی وارد می‌شوند.

۲-۳- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی خودکار جهت شناسایی گنبد نمکی به این شرح است:

- پس از ورود حجم داده لرزه‌ای سه بعدی به فرایند، در مرحله اول نشانگر لرزه‌ای (در این مقاله نشانگرهای لرزه‌ای بافتی انرژی، بافتی بی‌نظمی و آشفتگی) محاسبه و وارد مرحله ریخت‌شناسی لرزه‌ای می‌شود.
- مرحله ریخت‌شناسی ریاضیاتی شامل چهار مرحله متوالی است: (۱) در مرحله اول حجم نشانگری A نرمال سازی می‌شود. نرمال سازی حجم نشانگری توسط رابطه (۸) می‌شود:

$$A_n = \frac{A - A_{min}}{A_{max} - A_{min}} \quad (8)$$

که A_{min} و A_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار در حجم نشانگری A هستند.

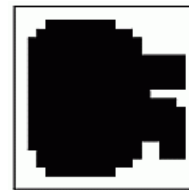
(۲) در مرحله دوم، حجم نرمالیزه شده A_n باینری می‌شود. فرایند باینری سازی توسط روش Otsu (1979) انجام می‌شود. این روش، یک روش آستانه گیری و یک الگوریتم خودکار برای یافتن آستانه بهینه در باینری سازی تصاویر سطح خاکستری است. این روش با تحلیل هیستوگرام، مقداری را به عنوان آستانه انتخاب می‌کند که واریانس بین گروهی (بین پیش زمینه و پس زمینه) را بیشینه و واریانس درون گروهی را کمینه نماید. هیستوگرام بر اساس شدت

تقسیم بندی تصویر کاربرد دارد و اولین بار توسط Wang (2005) در پردازش داده‌های لرزه‌ای معرفی و از آن برای کاهش دامنه‌های غیرعادی استفاده شد. این روش می‌تواند تصویر را با استفاده از یک عنصر ساختاری (S) با شکل خاص تغییر دهد، شکل مربوطه را در تصویر استخراج کند و سپس تصویر را ساده سازی کند (Huang et al., 2017). ریخت‌شناسی ریاضیاتی ابتدا برای تصاویر باینری (B) در فضای دوبعدی عدد صحیح $\mathbb{Z}^2$ توسعه یافت؛ اما بعدها به هر بُعد $\mathbb{Z}^d$ گسترش داده شد، که در آن d بعد تصویر است و برای تصویر سه بعدی (B) با ارتفاع r ، عرض s و عمق t بصورت $B(r, s, t) \subset \mathbb{Z}^3$ می‌باشد. عملگرهای اساسی که در پردازش تصاویر سه بعدی دخیل هستند شامل فرسایش (E) و اتساع (D) هستند که عملگر باز شدن (O) نیز با ترکیب آنها ساخته می‌شود. عملگر اتساع به کمک عنصر ساختاری (S) در رابطه (۴)، که در آن z نشان دهنده موقعیت‌های نسبی اجزا عنصر ساختاری است، باعث بزرگتر شدن تصویر یا به نوعی کاهش پس زمینه شده و فرسایش در رابطه (۵) دقیقاً برعکس عمل می‌کند. اگر دو عملگر فرسایش و اتساع به ترتیب و متوالی اجرا شوند، عملگر باز شدن ایجاد می‌شود که در کاهش نویز تصویر مفید است و رابطه (۶) به آن اشاره دارد (Shih, 2017; Soille, 1999). در شکل ۱(الف) یک تصویر باینری نمونه و به همراه آن نحوه عملکرد عملگرهای ریخت‌شناسی اتساع (شکل ۱(ب))، فرسایش (شکل ۱(ج)) و باز شدن (شکل ۱(د)) مشاهده می‌شود.

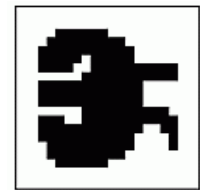
$$D = (B \oplus S) = \max_{z \in \mathbb{Z}} B((r, s, t) + z) \quad (4)$$

$$E = (B \ominus S) = \min_{z \in \mathbb{Z}} B((r, s, t) + z) \quad (5)$$

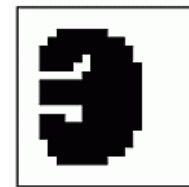
$$O = B \oslash S = (B \ominus S)(r, s, t) \oplus S(r, s, t) = E \oplus S(r, s, t) \quad (6)$$



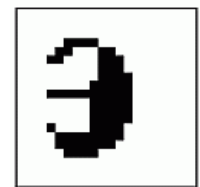
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

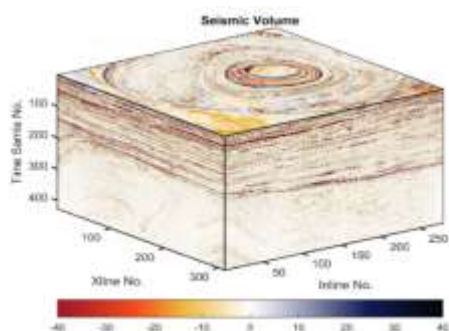
شکل ۱: عملکرد عملگرهای اتساع (ب)، فرسایش (ج) و باز شدن (د) بر روی تصویر باینری نمونه (الف) (Smith, 1997).

در این مقاله علاوه بر این عملگرها، یک عملگر دیگر تحت عنوان پر کردن حفره (H) نیز استفاده شده است که برای پر کردن یک ناحیه مشخص در یک تصویر باینری یا سطح خاکستری استفاده می‌شود.

مهم است که شامل امتداد زاگرس و کمربند چین‌خورده آن در شمال و شمال غرب، پلتفرم عربی در جنوب و جنوب غرب، حوزه رسوبی مکران در شمال شرق و کوه‌های عمان و شبه‌جزیره مزندام در جنوب می‌باشد (پازنگ و همکاران، ۱۳۹۴). حجم داده انتخاب شده از داده‌های لرزه‌ای این منطقه دارای ۲۸۰ خط گیرنده (Inline) و ۳۱۱ خط چشمه (Xline) و ۴۲۶ نمونه زمانی با گام نمونه‌برداری چهار میلی‌ثانیه است (شکل ۳ب). تحلیل نشانگری بر روی این حجم لرزه‌ای انجام شده و سه نشانگر آشفتگی، انرژی بافتی و بی‌نظمی بافتی محاسبه شدند. جهت بررسی عملکرد تحلیل نشانگری مقطع لرزه‌ای مربوط به خط گیرنده شماره ۱۴۲ منتخب از حجم لرزه‌ای (شکل ۴الف)) به همراه مقاطع نشانگری در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نشانگر انرژی بافتی (شکل ۴ب)) عملکرد بهتری از نشانگر بی‌نظمی بافتی (شکل ۴ج)) داشته است و مرز گنبد نمکی به صورت مشخص‌تری مشاهده می‌شود. همچنین نشانگر بی‌نظمی بافتی بهتر از نشانگر آشفتگی (شکل ۴د)) توانسته است که محدوده گنبد نمکی را به تصویر بکشد.

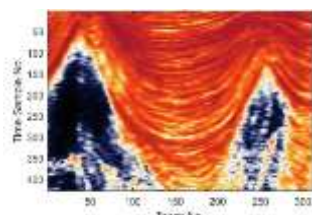


(الف)

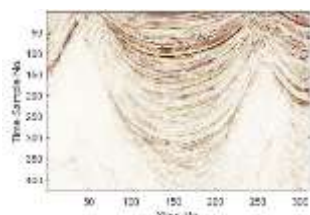


(ب)

شکل ۳: (الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر و پوشش داده-برداری لرزه‌ای در منطقه (پازنگ و همکاران، ۱۳۹۴). (ب) حجم داده لرزه‌ای مربوط به بلوک E واقع در جنوب ایران و در تنگه هرمز.

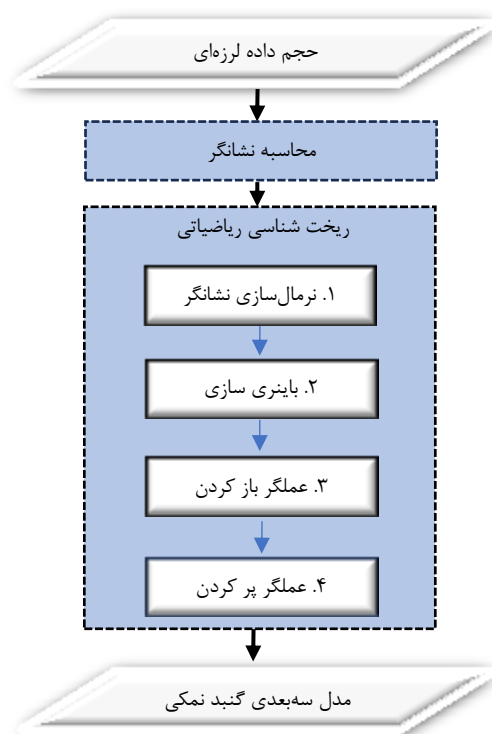


(ب)



(الف)

روشنایی و کسل‌ها (معادل سه‌بعدی پیکسل در تصویر) محاسبه می‌شود. تعداد سطوح خاکستری ۲۵۶ (از صفر برای سیاه تا ۲۵۵ برای سفید) است. این تکنیک به دلیل سادگی، سرعت بالا و عدم نیاز به تنظیم دستی پارامتر، یکی از پرکاربردترین روش‌های آستانه‌گیری خودکار در پردازش تصویر محسوب می‌شود. (۳) در مرحله سوم عملگر باز شدن جهت حذف نوفه‌های اضافی اطراف گنبد نمکی اعمال می‌شود. (۴) با توجه به وجود حفراتی درون بافت گنبد، در نهایت و در مرحله چهارم عملگر پر کردن حفره اعمال شده و شکل سه‌بعدی گنبد نمکی حاصل می‌شود. برای درک بهتر فرایند، فلوچارت الگوریتم توصیف شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



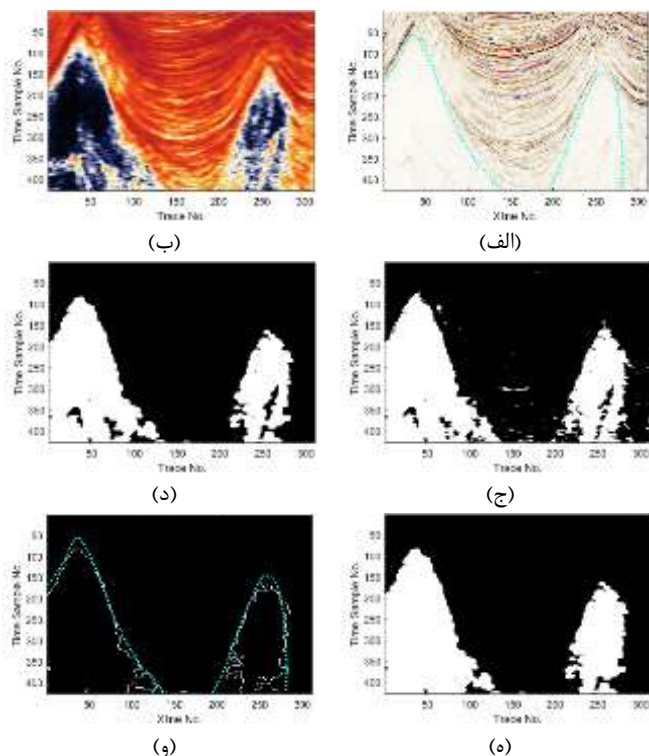
شکل ۲: الگوریتم پیشنهادی برای تفسیر و مدل‌سازی سه‌بعدی

گنبد نمکی.

۳- اعمال روش پیشنهادی بر روی داده لرزه‌ای

داده لرزه‌ای مورد مطالعه شامل یک گنبد نمکی از منطقه‌ای واقع در جنوب ایران و در تنگه هرمز تحت عنوان بلوک E، که با مختصات ۵۵° تا ۵۶° طول شرقی و ۲۵°۳۰' تا ۲۷° عرض شمالی شناخته شده است، می‌باشد (شکل ۳الف)). منطقه دیابیری هرمز واقع در تنگه هرمز در جنوب شرقی‌ترین بخش زاگرس، با ۸۴ دیابیر نمکی رخنمون یافته، گسترده‌ترین ناحیه تجمع نمکی در کمربند زاگرس محسوب می‌شود. تنگه هرمز در جنوب شرق استان هرمزگان و در حد فاصل خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد. این منطقه محل تلاقی چند پهنه زمین‌شناسی

معیار ASD میانگین فاصله هندسی بین مرز استخراج شده و مرز واقعی را در هر دو جهت اندازه‌گیری می‌کند (از مرز تشخیص داده شده به مرز واقعی و بالعکس). به طور متوسط، این معیار بیان می‌کند که مرز تشخیص داده شده چند پیکسل با مرز واقعی فاصله دارد. مقدار ASD برای بررسی کمی عملکرد هر سه نشانگر بکار رفته در الگوریتم محاسبه شد و نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتیجه عملکرد نشانگر انرژی از دو نشانگر دیگر بهتر است و نشانگر آشفتگی ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است.

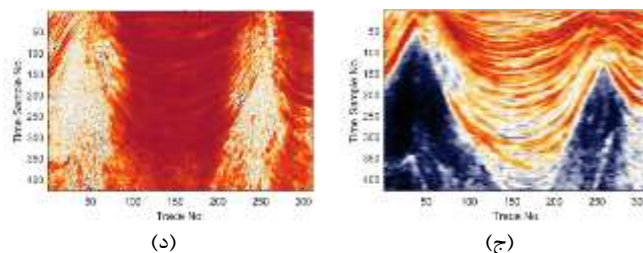


شکل ۵. (الف) مقطع لرزه‌ای مربوط به خط گیرنده شماره ۱۴۲ و مرز گنبد نمکی تفسیر شده توسط مفسر بر روی آن با رنگ فیروزه‌ای، (ب) نشانگر نرمالیز شده انرژی بافتی، (ج) نسخه باینری شده نشانگر، (د) نتیجه عملکرد باز شدن و (ه) نتیجه عملکرد پر کردن، که همان تصویر نهایی است، را نشان می‌دهند. (و) مقایسه مرزهای شناسایی شده به کمک الگوریتم پیشنهادی (خط سفید) و مرزهای تفسیر دستی (نقطه-چین فیروزه‌ای) دیده می‌شوند.

جدول ۱. فاصله سطحی متقارن متوسط برای هر یک از نشانگرهای استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی

نشانگر	فاصله سطحی متقارن متوسط
انرژی بافتی	۷/۵۱۹۲
بی‌نظمی بافتی	۸/۵۶۵۵
آشفتگی	۲۱/۳۸۰۶

همانطور که پیش‌تر بیان شده کلیه مراحل تحلیل نشانگری و ریخت‌شناسی ریاضیاتی به صورت سبدهای انجام می‌شود که توده‌ی سه-بعدی نهایی گنبد نمکی در شکل ۶ ارائه شده است. مدل سه‌بعدی نهایی



شکل ۴. (الف) مقطع لرزه‌ای مربوط به خط گیرنده شماره ۱۴۲ برگرفته از حجم لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۳ (ب)؛ (ب) نشانگر انرژی بافتی، (ج) نشانگر بی‌نظمی بافتی و (د) نشانگر آشفتگی.

اگرچه کلیه مراحل ریخت‌شناسی ریاضیاتی بصورت سبدهای و بر روی حجم‌های نشانگری انجام شدند، اما برای به تصویر کشیدن و درک بهتر مراحل الگوریتم پیشنهادی، تمامی فرایندهای انجام شده بر روی خط گیرنده شماره ۱۴۲ از حجم لرزه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در شکل ۵ (الف) مقطع لرزه‌ای به همراه نتیجه تفسیر دستی مرزهای گنبد نمکی که با نقطه‌چین فیروزه‌ای بر روی آن مشخص است، مشاهده می‌شود. نشانگر نرمالیزه شده انرژی بافتی مربوط به این مقطع لرزه‌ای در شکل ۵ (ب) و نسخه باینری شده نشانگر در شکل ۵ (ج) مشاهده می‌شود. نتیجه اعمال عملکرد باز شدن در شکل ۵ (د) و نتیجه اعمال عملکرد پر کردن حفره (تصویر نهایی) در شکل ۵ (ه) مشاهده می‌شود. پس از باینری کردن نشانگر نرمالیزه شده، برای شروع فرایند ریخت‌شناسی ریاضیاتی، در گام بعد به منظور بهبود تصویر گنبد نمکی عملکرد باز شدن اعمال می‌شود که همانطور که در شکل ۵ (د) مشاهده می‌شود تا حد قابل قبولی باعث حذف نویزهای اطراف بافت گنبد شده است. با این حال، همچنان داخل بافت گنبد نمکی حفراتی وجود دارد که برای حذف آنها از عملکرد پر کردن حفره استفاده شده است که نتیجه در شکل ۵ (ه) نمایش داده شده است. این مرحله تصویر نهایی را ارائه می‌کند. به منظور بررسی دقت تشخیص مرز گنبد نمکی با الگوریتم پیشنهادی، فیلتر لبه‌یابی کنی (Canny) بر روی تصویر نهایی اعمال شده و نتیجه در شکل ۵ (و) و با خط سفید نشان داده شده است. در شکل نتیجه تفسیر دستی نیز با نقطه‌چین فیروزه‌ای جهت مقایسه ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش خودکار پیشنهادی با دقت قابل قبولی محدوده گنبد نمکی را تشخیص داده است.

جهت ارزیابی کمی تشخیص مرز گنبد نمکی توسط الگوریتم پیشنهادی، در این مقاله از معیار فاصله سطحی متقارن متوسط (Average Symmetric Surface Distance, ASD) استفاده شد. اگر A نقاط روی مرز تشخیص داده شده توسط الگوریتم پیشنهادی و B نقاط روی مرز واقعی حاصل از تفسیر دستی باشد (مثلاً مرزهای نشان داده شده در شکل ۵ (و))، فاصله بین هر نقطه a روی A تا هر نقطه روی B ، و همچنین فاصله بین هر نقطه b روی B تا هر نقطه روی A محاسبه، جمع‌بندی و با تقسیم بر تعداد کل نقاط روی هر مرز میانگین-گیری می‌شود و متوسط این مقادیر بعنوان ASD از طریق رابطه (۹) بدست می‌آید (Heimann et al., 2009):

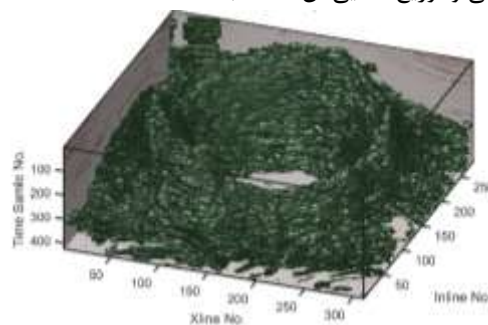
$$ASDD = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{a \in A} d(a, B)}{|A|} + \frac{\sum_{b \in B} d(b, A)}{|B|} \right). \quad (9)$$

زمان اجرای آن است. الگوریتم معرفی شده در این مقاله، همانطور که پیش‌تر بیان شد، شامل دو مرحله تحلیل نشانگری و ریخت‌شناسی ریاضیاتی است. در این پژوهش مرحله محاسبه نشانگر لرزه‌ای، در نرم‌افزار تجاری Petrel یا OpendTect انجام شده است که با توجه به نسخه نرم‌افزار و سیستم کامپیوتری مورد استفاده زمانی برای محاسبه نشانگرها صرف خواهد شد. اما مرحله ریخت‌شناسی ریاضیاتی الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB با نسخه ۲۰۲۳ و با یک لپ‌تاپ با پردازنده core i5 نسل دهم و حافظه RAM برابر با ۸ گیگابایت انجام شده است. زمان اجرای این فرایند ریخت‌شناسی ریاضیاتی، از ورود حجم نشانگری تا تهیه مدل سه‌بعدی نهایی گنبد نمکی، حدود ۳۰ ثانیه محاسبه شده است که برای حجم داده لرزه‌ای (۲۸۰ خط گیرنده، ۳۱۱ خط چشمه و ۴۲۶ نمونه زمانی) یک زمان معقول و قابل قبول محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که الگوریتم پیشنهادی که بصورت خودکار فرایند تهیه مدل گنبد نمکی را انجام می‌دهد، با توجه به زمان اجرای مطلوب می‌تواند برای استفاده در صنعت جذابیت داشته باشد.

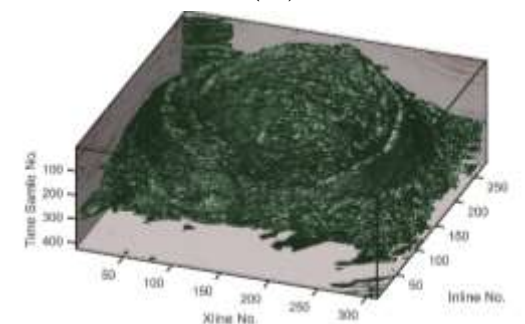
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از ترکیب نشانگرهای لرزه‌ای و عملگرهای ریخت‌شناسی ریاضیاتی، الگوریتمی خودکار جهت مدل‌سازی سه بعدی گنبد نمکی معرفی شد. تفسیر و شناسایی دستی گنبد نمکی توسط کاربر، نیاز به تلاش زیاد و زمان اجرای قابل ملاحظه‌ای دارد. در این پژوهش نشان داده شد که اگر حجم نشانگری لرزه‌ای وارد یک فرایند ریخت‌شناسی ریاضیاتی شود، در نهایت در یک زمان مطلوب یک مدل سه بعدی از گنبد نمکی حاصل خواهد شد. در رابطه با دقت تعیین مرز گنبد نمکی مشاهده شد که روش پیشنهادی در مقایسه با تفسیر دستی، با وجود کمی تفاوت، دقت خوبی دارد. البته با توجه به خودکار بودن الگوریتم پیشنهادی این میزان کم اختلاف در دقت، قابل توجیه خواهد بود. هرچند شاید بتوان در پژوهش‌های بعدی با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی و روش‌های یادگیری ماشین، بتوان الگوریتم را توسعه داد و دقت آنرا نیز افزایش داد. ارزیابی کیفی و همچنین کمی دلالت بر این دارد که از میان سه نشانگر انرژی بافتی، بی‌نظمی بافتی و آشفستگی، بهترین عملکرد مربوط به نشانگر انرژی بافتی و ضعیف‌ترین نتیجه مربوط به نشانگر آشفستگی است. این نتیجه بیانگر این موضوع است که نوع نشانگر بکار رفته در الگوریتم و عملکرد آن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتیجه نهایی شناسایی گنبد نمکی دارد. در مجموع، یافته‌های این تحقیق مؤید کارایی چارچوب پیشنهادی در غلبه بر چالش‌های تفسیر ساختارهای پیچیده‌ای مانند گنبدهای نمکی است. از طرف دیگر توسعه روش برای شناسایی پدیده‌های دیگر زیرسطحی در داده‌های لرزه‌ای مانند کانال مدفون می‌تواند موضوع تحقیق جذابی باشد. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده و مزایای فنی الگوریتم پیشنهادی، می‌توان یک ماژول یا بسته نرم‌افزاری کاربرپسند در محیط‌های رایج تفسیر لرزه‌ای (مانند Petrel یا OpendTect) توسعه داد که مفسران بتوانند به سادگی از این

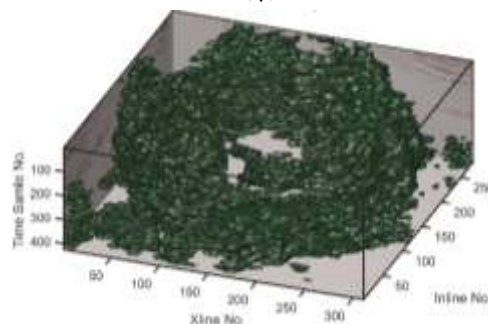
برای سه نشانگر انرژی بافتی، بی‌نظمی بافتی و آشفستگی به ترتیب در شکل‌های ۶(الف)، ۶(ب) و ۶(ج) مشاهده می‌شود. با مقایسه نتیجه سه مدل می‌توان نتیجه گرفت که مدل حاصل از نشانگر انرژی بافتی، نتیجه بهتری نسبت به دو نشانگر دیگر ارائه داده است و مدل سه بعدی مربوط به نشانگر آشفستگی دقت پایین‌تری نسبت به دو نشانگر دیگر دارد. قطعاً دلیل تفاوت کیفیت مدل سه‌بعدی گنبد نمکی، عملکرد نشانگرها در شناسایی اولیه محدوده گنبد نمکی است که بعنوان ورودی فرایند پردازش تصویر، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مدل سه‌بعدی این امکان را به مفسر می‌دهد که بتواند یک بررسی همه جانبه در جهت‌های مختلف از گنبد نمکی و توزیع فضایی آن داشته باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. نمایش سه بعدی گنبد نمکی بدست آمده با روش تفسیر پیشنهادی. سه نشانگر (الف) انرژی بافتی، (ب) بی‌نظمی بافتی و (ج) آشفستگی که روی آن عملگرهای ریخت‌شناسی اعمال شده‌اند.

از آنجا که معمولاً داده‌های لرزه‌ای حجم بسیار بزرگی دارند و بدیهی است که برای تحلیل و تفسیر آنها ممکن است زمان زیادی صرف شود، بنابراین یکی از معیارهای بسیار مهم یک الگوریتم تفسیر لرزه‌ای،

الگوریتم به عنوان یک ابزار کمکی استفاده کنند.

۵- منابع

- پاژنگ، س.، کدخدایی، ع.، زمانی، ب.، برگریزان، م. و یوسف پور، م.، ۱۳۹۴، معرفی ۱۷ گنبد نمکی مدفون و غیرمدفون براساس داده‌های لرزه‌ای در تنگه هرمز (بلوک E)، پژوهش نفت، ۲۵ (۸۴)، ۱۵۰-۱۶۰.
- چمبری، ر.، روشندل کاهو، ا.، یوسفی، م. و سلیمانی منفرد، م.، ۱۳۹۷، شناسایی مرز گنبد نمکی با استفاده از تلفیق نشانگرهای لرزه‌ای در محیط GIS، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۴ (۲)، ۲۷۷-۲۹۲.
- روشندل کاهو، ا.، سلیمانی منفرد، م. و رداد، م.، ۱۴۰۰، شناسایی و مدل‌سازی گنبد نمکی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از گرادیان بافت سه‌بعدی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵ (۱)، ۱۹-۳۳.
- Chopra, S., and Alexeev, V., 2006, Applications of texture attribute analysis to 3D seismic data, *The Leading Edge*, 25 (8), 934-940.
- Chopra, S., and Marfurt, K. J., 2007, Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization, *SEG Geophysical Developments Series No. 11*.
- Di, H., and AlRegib, G., 2017, Seismic multi-attribute classification for salt boundary detection-a comparison, 79th EAGE Conference and Exhibition.
- Eichkitz, C. G., Amtmann, J., and Schreilechner, M. G., 2013, Calculation of grey level co-occurrence matrix-based seismic attributes in three dimensions, *Computers & Geosciences*, 60, 176-183.
- Hale, D. 2013, Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images, *Geophysics*, 78(2), O33-O43.
- Heimann, T., Van Ginneken, B., Styner, M.A., Arzhaeva, Y., Aurich, V., Bauer, C., Beck, A., Becker, C., Beichel, R., Bekes, G. and Bello, F., 2009, Comparison and evaluation of methods for liver segmentation from CT datasets, *IEEE transactions on medical imaging*, 28 (8), 1251-1265.
- Huang, W., Wang, R., Zhang, D., Zhou, Y., Yang, W., and Chen, Y., 2017, Mathematical morphological filtering for linear noise attenuation of seismic data, *Geophysics*, 82 (6), V369-V384.
- Jackson, M. P., and Hudec, M. R. 2017, *Salt Tectonics: Principles and Practice*, Cambridge University Press.
- Jones, I. F., and Davison, I., 2014, Seismic imaging in and around salt bodies, *Interpretation*, 2 (4), SL1-SL20.
- Khayer, K., Roshandel Kahoo, A., Soleimani Monfared, M. and Kavoosi, K., 2022, Combination of seismic attributes using graph-based methods to identify the salt dome boundary, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215, 110625.
- Lawal, A., Mayyala, Q., Zerguine, A., and Beghdadi, A. 2021, Salt dome detection using context-aware saliency, 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 1906-1910.
- Liu, Z., Wheaton, D., and Wang, B., 2019, Seismic data denoising with mathematical morphological filters, *SEG International Exposition and Annual Meeting*.
- Mousavi, J., Radad, M., Soleimani Monfared, M., and Roshandel Kahoo, A. 2022, Fault enhancement in seismic images by introducing a novel strategy integrating attributes and image analysis techniques, *Pure and Applied Geophysics*, 179 (5), 1645-1660.
- Otsu, N., 1979, A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11, 285-296.
- Schultz-Ela, D. D., Jackson, M. P., and Vendeville, B. C., 1993, Mechanics of active salt diapirism, *Tectonophysics*, 228 (3-4), 275-312.
- Shih, F. Y., 2017, *Image processing and mathematical morphology: fundamentals and applications*. CRC press.
- Smith, S. W., 1997, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Pub.
- Soille, P., 1999, *Morphological image analysis: principles and applications*, Springer Berlin, Heidelberg.
- Tavakolizadeh, N., and Bagheri, M., 2022, Multi-attribute selection for salt dome detection based on SVM and MLP machine learning techniques, *Natural Resources Research*, 31 (1), 353-370.
- Wang, R., 2005, Noise-eliminated method by morphologic filtering in seismic data processing, *Oil Geophysical Prospecting*, 40 (3), 277.
- Wang, Z., 2018, *Computational seismic interpretation using geometric representation and tensor-based texture analysis*, PhD. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.