

معرفی نشانگر بافتی جدید بر اساس شاخص ناهمسانگردی، مطالعه موردی: گنبد نمکی

محمد رضا موسوی نژاد^۱؛ امین روشندل کاهو^{۲*} و محمد رداد^۳

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

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

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

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

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

واژگان کلیدی

نشانگر بافتی

تانسور ساختار گرادیان

شاخص ناهمسانگردی

گنبد نمکی

لرزه‌شناسی

چکیده

شناسایی دقیق ساختارهای زیرسطحی مانند گنبد‌های نمکی از اهمیت بالایی در اکتشاف منابع هیدروکربنی برخوردار است. روش‌های مرسوم پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای از جمله نشانگرهای لرزه‌ای متداول نظیر هم‌دوسی، انحنا و آشفتگی، با وجود ارائه اطلاعات مفید، در تفکیک دقیق مرز ساختارهای زمین‌شناسی مانند گنبد نمکی محدودیت‌هایی دارند. یکی از رویکردهای نوین برای غلبه بر این چالش، بهره‌گیری از تحلیل بافت داده‌های لرزه‌ای با هدف شناسایی ساختارها به کمک تباین ویژگی‌های بافتی ناحیه مورد مطالعه است. بافت لرزه‌ای می‌تواند اطلاعاتی درباره رخساره‌های رسوبی، ساختارهای مخزنی و ناهمگنی‌های زمین‌شناسی فراهم آورد. در این پژوهش، با الهام از مفهوم ناهمسانگردی در محیط‌های لایه‌ای و همسانگردی نسبی گنبد‌های نمکی، نشانگر بافتی جدیدی با عنوان «شاخص ناهمسانگردی تانسور گرادیان» معرفی شده است. این نشانگر بر پایه تحلیل آماری مقادیر ویژه تانسور ساختار گرادیان محلی توسعه یافته و هدف آن تمایز میان نواحی با جهت‌داری مشخص (لایه‌بندی) و نواحی بدون جهت‌گیری غالب (همچون گنبد نمکی) است. به منظور ارزیابی عملکرد این شاخص، از داده لرزه‌ای دوبعدی مربوط به گنبد نمکی در تنگه هرمز استفاده شده و نتایج آن با نشانگرهای متداول آنتروپی و آشفتگی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شاخص ناهمسانگردی پیشنهادی، توانایی بالایی در تفکیک دقیق مرزهای گنبد نمکی دارد و به‌ویژه در ابعاد پنجره مناسب، همخوانی بیشتری با تفسیر مفسران انسانی ارائه می‌دهد. این نشانگر در برابر نوفه، پایدارتر بوده و همچنین مستقل از محاسبه شیب عمل می‌کند. بنابراین، خطای محاسباتی کمتری دارد. همچنین، به دلیل ماهیت ساختارگرایی آن، از بهره‌وری محاسباتی بالاتری نسبت به روش‌های سنتی برخوردار است. در نهایت، شاخص ناهمسانگردی تانسور گرادیان می‌تواند به‌عنوان ابزاری دقیق و مؤثر در تحلیل بافتی مقاطع لرزه‌ای در جهت نیل به هدف تفسیر خودکار ساختارهای زیرسطحی به‌ویژه گنبد‌های نمکی مورد استفاده قرار گیرد.

۱- مقدمه

به دلیل نقش مهم ساختارهای زیرسطحی در تجمع منابع هیدروکربنی، روش‌های متنوعی برای شناسایی آن‌ها به کار گرفته می‌شوند. اهمیت اقتصادی این منابع، ضرورت استفاده از روش‌های اکتشافی سریع، کم‌هزینه و مؤثر را افزایش داده است. از آنجا که ساختارهایی مانند تاقدیس، گنبد نمکی و گلفشان‌ها در اعماق زمین قرار دارند، نمی‌توان آن‌ها را فقط با بررسی‌های سطحی شناسایی کرد. بنابراین، روش‌های غیرمستقیم مانند ژئوفیزیک، به‌ویژه لرزه‌نگاری بازتابی با توانایی تصویرسازی و مدل‌سازی، کاربرد گسترده‌ای در اکتشاف این ساختارها دارد (Barnes, 2016; Kalaneh et al., 2023). در سال‌های اخیر، برای ارتقای دقت و سرعت در فرآیند تفسیر داده‌های لرزه‌ای، استفاده از روش‌های هوشمند و رایانه‌محور در هر دو حوزه صنعت و پژوهش گسترش یافته است (Hegazy and AlRegib, 2014). نشانگرهای لرزه‌ای، ابزاری برای تفسیر کمی و کیفی داده‌های لرزه‌ای هستند که با تکیه بر روابط ریاضی و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی زیرسطح، اطلاعات پنهان موجود در داده‌های لرزه‌ای بازتابی را استخراج می‌کنند و شناسایی دقیق‌تر ساختارها و پدیده‌های زمین‌شناسی زیرسطحی را تسهیل می‌کنند (Chopra and Marfurt, 2007; Iske and Randen, 2005; Kalaneh et al., 2023). تفسیر داده‌های لرزه‌ای، سه رویکرد اصلی شامل تفسیر دستی، نیمه‌خودکار و خودکار به کار گرفته می‌شود که هر یک بر اساس میزان دخالت انسان و اتکا به پردازش الگوریتمی از یکدیگر متمایز می‌شوند. در تفسیر دستی، تحلیل‌گر با تکیه بر تخصص، تجربه و درک مفهومی خود از داده‌ها به شناسایی و تبیین الگوها و ویژگی‌ها می‌پردازد. این روش اگرچه زمان‌بر است، اما معمولاً بالاترین سطح دقت و صحت تفسیر را ارائه می‌دهد. در مقابل، تفسیر نیمه‌خودکار با بهره‌گیری همزمان از قضاوت انسانی و توان محاسباتی الگوریتم‌ها، توازنی میان دقت و کارایی ایجاد می‌کند. تفسیر خودکار به‌طور کامل بر پایه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پردازش تصویر استوار است و امکان تحلیل سریع و گسترده داده‌ها را فراهم می‌سازد؛ با این حال ممکن است از درک شهودی و ظرافت‌های معنایی داده‌ها که حاصل قضاوت انسانی است، غافل بماند. همان‌گونه که ایلماز تأکید می‌کند تفسیر یک هنر است، حتی در پیشرفته‌ترین سیستم‌های خودکار نیز، نقش تحلیل‌گر انسانی در درک زمینه، تفسیر مفهومی و اعتبار سنجی نتایج همچنان اساسی و غیرقابل جایگزین باقی می‌ماند (Yilmaz, 2001). به‌منظور فراهم‌سازی امکان تفسیر خودکار، تحلیل بافت داده‌های لرزه‌ای به‌عنوان روشی کارآمد برای شناسایی ساختارهای زیر سطحی همانند گنبد نمکی توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد

شده است (Khayer et al., 2022). در حالی که نشانگرهای لرزه‌ای رایج مانند ردلرزه مختلط، همدوسی، انحنا و تجزیه طیفی با استفاده از روابط ریاضی به ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اهداف زیرسطحی می‌پردازند (Barnes, 2016)، نشانگرهای بافتی رویکرد متفاوتی دارند. این دسته از نشانگرها تمرکز خود را بر تحلیل الگوهای فضایی و نحوه پراکندگی دامنه‌ها در میان نمونه‌های مجاور قرار می‌دهند و اطلاعاتی درباره ساختارهای سنگی، رخساره‌های رسوبی و ویژگی‌های مخزنی ارائه می‌کنند (Gao, 2011). در علم پردازش تصویر، روش‌های استخراج ویژگی‌های بافتی از تصاویر را می‌توان در هفت گروه اصلی طبقه‌بندی کرد که شامل روش‌های آماری، ساختاری، مبتنی بر تبدیل، مدل‌محور، گراف‌محور، مبتنی بر یادگیری و همچنین روش‌های مبتنی بر آنتروپی می‌باشند (Humeau-Heurtier, 2019). در سال‌های اخیر، محققان روش‌های متنوعی را با الهام از درک بصری مفسران زمین‌شناسی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی توسعه داده‌اند. به‌طور خاص، مطالعات بسیاری به شناسایی گنبد‌های نمکی اختصاص یافته که در آن‌ها از رویکردهایی مانند نظریه گراف، تشخیص لبه، تحلیل بافت، منحنی‌های تراز فعال (ACM) و همچنین روش‌های گوناگون پردازش تصویر استفاده شده است (Aqrabi et al., 2011; Asjad and Mohamed, 2015; Berthelot et al., 2013; Felzenszwalb and Huttenlocher, 2004; Lomask et al., 2007; Shafiq et al., 2015; Shi and Malik, 2000; Wang et al., 2015; Zhang and Halpert, 2012). در بخش‌بندی تصویر، گراف روشی است که در آن پیکسل‌ها یا ناحیه‌ها به‌صورت گره و شباهت میان آن‌ها به‌صورت یال نمایش داده می‌شود تا با تقسیم گراف، مرز بی‌هنجاری‌ها شناسایی گردد (Khayer et al., 2022). مدل منحنی‌های تراز فعال روشی در بخش‌بندی تصویر است که با استفاده از یک منحنی اولیه، مرز بی‌هنجاری‌ها را با حفظ همواری و بر اساس ویژگی‌های تصویر مانند لبه‌ها به‌طور خودکار دنبال و شناسایی می‌کند (Lomask et al., 2004). در تحلیل بافت داده‌های لرزه‌ای، نشانگرهای متنوعی توسعه یافته‌اند که هر یک ویژگی خاصی از بافت را برجسته می‌کنند. نشانگر آشفتگی (Iske and Randen, 2005)، نشانگرهای مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری (Eichkitz et al., 2013)، نشانگرهای بافتی مبتنی بر گرادیان (Farrokhnia et al., 2018)، نشانگرهای مبتنی بر هیستوگرام گرادیان جهتی (Hosseini-Fard et al., 2022) و نشانگرهای مبتنی بر ماتریس‌های مختلف سطح خاکستری (Soltani et al., 2023) از جمله نشانگرهای بافتی لرزه‌ای هستند که اغلب آن‌ها از توسعه ابزارهای پردازش تصویر برای تحلیل بافت مقاطع لرزه‌ای بدست آمده‌اند. متداول‌ترین این روش‌ها، استفاده از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری است که

در گذشته، مفهوم بافت عمدتاً برای مشخص کردن نواحی با ویژگی‌های مشابه سیگنال در مقاطع لرزه‌ای به کار می‌رفت، اما امروزه رویکردهای دقیق‌تری بر پایه تحلیل آماری معرفی شده‌اند که امکان طبقه‌بندی دقیق‌تر نواحی مختلف را فراهم می‌کنند. یکی از معیارهای کمی برای تفکیک و طبقه‌بندی بافت‌های مختلف به خصوص گنبد نمکی نسبت به ساختار رسوبی در برگیرنده آن، ناهمسانگردی می‌باشد. در محیط‌های لایه‌ای رسوبی به دلیل وجود گرادیان شدید دامنه در جهت عمود بر راستای لایه‌بندی میزان ناهمسانگردی بسیار زیاد است؛ در صورتی که در گنبد نمکی، گرادیان دامنه نسبت به لایه‌بندی بسیار کمتر است به طوریکه می‌توان از آن صرف نظر کرد. در حالت کلی تغییرات دامنه در یک نقطه در جهات مختلف در گنبد نمکی نسبت به محیط لایه‌بندی ناچیز است و می‌توان گفت که همسانگردی نسبی در گنبد نمکی نسبت به لایه‌بندی وجود دارد (Soltani et al., 2023). در این مقاله، با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه تانسور ساختار گرادیان، معیار کمی برای محاسبه میزان همسانگردی معرفی می‌گردد. از این معیار برای تحلیل بافتی مقاطع لرزه‌ای به منظور شناسایی رویدادهای نظیر گنبد نمکی استفاده می‌شود.

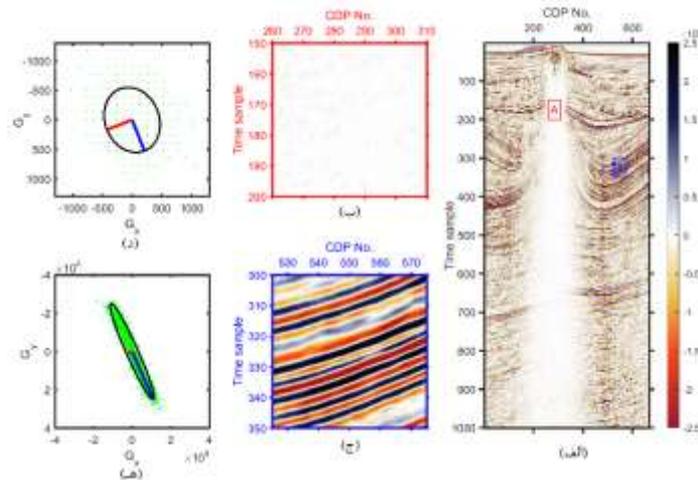
۲- روش‌شناسی تحقیق

همسانگردی به صورت عدم وابستگی خواص (فیزیکی، هندسی و یا زمین‌شناسی) در یک نقطه خاص به جهت اندازه‌گیری اطلاق می‌گردد. مفهوم همسانگردی در تحلیل بافتی تصاویر را می‌توان به صورت عدم تغییر شدت روشنایی پیکسل در جهات مختلف تعریف نمود. از آنجایی که بردار گرادیان، تغییرات شدت روشنایی در هر پیکسل به صورت کمی بیان می‌کند، می‌تواند در محاسبه شاخص ناهمسانگردی مورد استفاده قرار بگیرد. به منظور استفاده از این ابزار در تحلیل بافتی داده‌های لرزه‌ای کافی است که مقطع لرزه‌ای به عنوان یک تصویر فرض شود که تغییرات دامنه لرزه‌ای معادل تغییرات شدت روشنایی پیکسل در تصویر است. در مقاطع لرزه‌ای به عبارت دیگر همسانگردی می‌تواند به عنوان یک ویژگی بافتی برای تحلیل مقاطع لرزه‌ای در نظر گرفته شود. به‌منظور درک دقیق‌تر مفهوم تحلیل بافتی مبتنی بر شاخص ناهمسانگردی بر پایه بردار گرادیان، بخشی از داده لرزه‌ای دو بعدی

به‌وسیله آن می‌توان الگوهای بافتی را بر اساس روابط آماری بین پیکسل‌ها یا وکسل‌ها ارزیابی کرد. در این تحلیل، شاخص‌هایی مانند انرژی، آنتروپی، کنتراست و همگنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chopra and Marfurt, 2007). برتلوت و همکاران (۲۰۱۲، ۲۰۱۳) از مجموعه‌ای از ویژگی‌های بافتی برای تشخیص نمک استفاده کرده‌اند. برتلوت و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نشانگرهای بافتی مانند GLCM، ویژگی‌های فرکانسی، شیب و تشابه، توانستند دقت شناسایی ساختارهای نمکی را در چارچوب طبقه‌بندی بیزی (Bayesian classification) افزایش دهند. این روش‌ها با کاهش وابستگی به تفسیر دستی و افزایش پایداری، امکان تفسیر نیمه‌خودکار ساختارهای نمکی را فراهم می‌کنند. حجازی و الرجیب (۲۰۱۴) روشی کم‌هزینه و محاسباتی برای شناسایی گنبد‌های نمکی معرفی کردند که بر پایه سه نشانگر بافتی مبتنی بر گرادیان شامل جهت‌داری، یکنواختی و محتوای لبه است. این روش با دقت مناسب مرزهای گنبد نمکی را به‌خوبی شناسایی می‌کند. وانگ و همکاران (۲۰۱۵) روشی مبتنی بر یادگیری زیرفضای تانسوری برای بهبود شناسایی مرزهای گنبد‌های نمکی ارائه دادند. با استفاده از طبقه‌بندی پنجره‌های کوچک از تصویر و استخراج ویژگی‌های بافتی تانسوری، مرزها با دقت و پایداری بیشتری نسبت به روش‌های قبلی ردیابی شدند. این رویکرد تلفیقی، گامی مؤثر در تفسیر ساختارهای پیچیده لرزه‌ای محسوب می‌شود. وانگ و همکاران (۲۰۱۶) روشی دقیق‌تر برای شناسایی مرز گنبد‌های نمکی ارائه دادند که با استخراج ویژگی‌های بافتی از نواحی مرزی و استفاده از نگاشت گرادیان بافت، مرزها را به‌طور بهینه ردیابی و بازسازی می‌کند. این روش نسبت به روش‌های پیشین دقت و پایداری بیشتری دارد. روشندل کاهو و همکاران (۲۰۲۱) با معرفی نشانگر گرادیان بافت، توانستند مرزهای تغییرات بافتی میان گنبد نمکی و رسوبات اطراف را با دقت بالاتری نسبت به نشانگرهای آشفستگی و واریانس شناسایی کنند. این روش در برابر نوفه تصادفی پایداری بیشتری داشته و عملکرد بهتری در تفکیک ساختار گنبد نمکی از لایه‌بندی نشان داده است. سلطانی و همکاران (۲۰۲۳) به‌منظور افزایش دقت در تعیین مرز گنبد‌های نمکی، نشانگرهای بافتی جدیدی بر پایه ماتریس‌های سطح خاکستری GLRLM، GLSZM، GLDM و NGLDM معرفی کرده‌اند. این نشانگرها نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر GLCM، وابستگی کمتری به شیب ساختارها داشته و از دقت بالاتری برخوردارند. نتایج روی داده‌های واقعی نشان دادند که نشانگرهای پیشنهادی در شناسایی دقیق‌تر گنبد نمکی مؤثرتر عمل کرده‌اند.

بزرگ‌نمایی شده نمایش داده شده‌اند. به منظور بررسی ناهمسانگردی بر مبنای بردار گرادیان، گرادیان‌های افقی و قائم برای هر یک از این پنجره‌ها محاسبه شد. در شکل‌های ۱-۱ (د) و ۱-۱ (ه) به ترتیب نمودار تقاطعی گرادیان قائم برحسب گرادیان افقی برای دو پنجره‌ی A و B نشان داده شده‌اند.

دریایی از منطقه تنگه هرمز انتخاب شد. این مقطع لرزه‌ای که در شکل ۱-۱ (الف) نشان داده شده است، شامل ۱۰۰۱ نمونه زمانی و ۶۶۸ ردلرزه بوده و گنبد نمکی مشخصی را در بر دارد که شرایط مناسبی برای بررسی رفتار بافتی در ناحیه هدف فراهم می‌سازد. دو پنجره‌ی A و B به ترتیب از نواحی مربوط به گنبد نمکی و لایه‌بندی انتخاب شده‌اند که در شکل‌های ۱-۱ (ب) و ۱-۱ (ج) به صورت



شکل ۱: مفهوم تحلیل بافتی مبتنی بر شاخص ناهمسانگردی بر پایه بردار گرادیان. (الف) مقطع لرزه‌ای دو بعدی و دو پنجره منتخب از (ب) گنبد نمکی و (ج) رسوبات لایه‌ای. نمودار تقاطعی گرادیان قائم بر حسب گرادیان افقی برای (د) پنجره گنبد نمکی و (ه) پنجره رسوبات لایه‌ای.

بدست آورد (Mousavi Nezhad et al., 2025):

$$C = \begin{bmatrix} \sum_W g_x^2 & \sum_W g_x g_y \\ \sum_W g_y g_x & \sum_W g_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ماتریس کوواریانس بردارهای گرادیان که پایه محاسبه این مؤلفه‌ها است، در منابع به‌عنوان تانسور ساختار گرادیان نیز شناخته می‌شود. از آنجایی که ماتریس کوواریانس یک ماتریس مربعی 2×2 می‌باشد، دارای دو مقدار ویژه λ_1 و λ_2 است. اگر فرض شود که $\lambda_1 > \lambda_2$ باشد، مطابق شکل ۱ اختلاف مقدار آن‌ها می‌تواند معیاری برای ناهمسانگردی باشد. چنانچه به ترتیب با λ_1 قطر آبی و λ_2 قطر قرمز نمایش داده شده‌اند که طول هر بردار متناسب با مقدار ویژه متناظر آن است (Mousavi Nezhad et al., 2025).

همانطور که در شکل ۱-۱ (د) مشاهده می‌شود، بیضی محاط بر توزیع داده‌ها به دلیل همسانگردی به صورت متقارن و نزدیک به دایره (ابر کره) می‌باشد که طول دو قطر اصلی آن با یکدیگر برابر هستند. در صورتی که در شکل ۱-۱ (ه) بیضی محاط بر توزیع داده‌ها به دلیل ناهمسانگردی در جهت مولفه اصلی کشیدگی بیشتری نسبت به جهت عمود بر آن دارد و طول قطر اصلی آن به مراتب از قطر فرعی آن بزرگتر است. بنابراین، می‌توان شاخص ناهمسانگردی را با

همانطور که مشاهده می‌شود، در پنجره B به دلیل رفتار متناوب ناشی از رسوبات لایه‌ای، تغییرات دامنه در یک جهت (عمود بر لایه‌بندی) غالب می‌باشد. وجود گرادیان شدید دامنه در یک جهت خاص باعث می‌شود که در نمودار تقاطعی گرادیان‌های افقی و قائم یک توزیع ناهمسانگرد مشاهده شود که بیانگر جهت‌داری بافت در ساختارهای لایه‌ای است. در مقابل، در پنجره A که درون گنبد نمکی انتخاب شده است، به دلیل آشفتگی ساختاری و نبود جهت‌گیری مشخص در بافت، هیچ گرادیان شدید دامنه مشاهده نمی‌شود و در نمودار تقاطعی گرادیان‌های افقی و قائم مربوط به آن یک توزیع همسانگرد مشاهده می‌شود و نمی‌توان جهت‌داری خاصی برای آن در نظر گرفت. به منظور محاسبه کمی همسانگردی در شکل‌های ۱-۱ (د) و ۱-۱ (ه) از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) بردارهای گرادیان قائم و افقی استفاده می‌شود.

بیضی به رنگ سیاه در نمودارهای تقاطعی ترسیم شده است، بیضی سطح اعتماد است که محدوده پراکندگی توزیع گرادیان‌های قائم بر حسب افقی را نشان می‌دهد. طبق تئوری تحلیل مولفه‌های اصلی، اندازه قطرهای اصلی بیضی سطح اعتماد برابر با مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس گرادیان‌های افقی و قائم می‌باشد. اگر گرادیان‌های افقی و قائم پنجره W به ترتیب با g_x و g_y نشان داده شود، ماتریس کوواریانس آن‌ها را می‌توان مطابق رابطه (۱)

AI	λ_2	λ_1	
0.29	5.21×10^4	7.95×10^4	پنجره A
0.99	2.36×10^6	1.87×10^8	پنجره B

تمامی کدنویسی‌ها، تحلیل‌ها و نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، به همراه ترسیم شکل‌ها به‌طور کامل در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) پیاده‌سازی و اجرا شده است.

۳- نتایج داده واقعی

برای محاسبه نشانگر شاخص ناهمسانگردی، از یک پنجره محلی متحرک بر روی داده لرزه‌ای استفاده گردید. مقدار شاخص ناهمسانگردی محاسبه شده در هر پنجره به مرکز پنجره نسبت داده می‌شود. در نهایت، با توجه به حرکت و همپوشانی پنجره‌ها، روش پیشنهادی برای تمام نمونه‌های داده لرزه‌ای به دست می‌آید. در تحلیل داده‌های لرزه‌ای، انتخاب پنجره‌های کوچک برای شناسایی جزئیات دقیق مناسب هستند، ولی نتایج حاصل از پنجره‌های با ابعاد کوچک در برابر نوفه حساس می‌باشند. در مقابل، انتخاب پنجره‌های بزرگ برای بررسی روندهای کلی و ساختارهای بزرگ مؤثرتر هستند، اما ابعاد بزرگ پنجره سبب کاهش دقت در جزئیات و افزایش هزینه محاسبات می‌شود. به طور کلی، انتخاب اندازه پنجره وابسته به ابعاد هدف و کیفیت داده است.

به منظور ارزیابی عملکرد نشانگر معرفی شده در داده‌های لرزه‌ای واقعی، شاخص ناهمسانگردی تانسور گرادیان بر روی مقطع لرزه‌ای مربوط به گنبد نمکی واقع در تنگه هرمز شکل ۱-الف اعمال شده و نتایج حاصل از تحلیل آن با ابعاد مختلف پنجره از 3×3 تا 17×17 به ترتیب در شکل‌های ۲-الف تا ۲-ح نمایش داده شده است. منحنی بسته به رنگ سیاه که روی نشانگرها ترسیم شده است، محدوده گنبد نمکی تفسیر شده توسط ۳ مفسر حرفه‌ای داده‌های لرزه‌ای است که برای ارزیابی عملکرد این روش استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج روش پیشنهادی به خصوص در پنجره‌های با ابعاد مناسب، همخوانی بسیار زیادی با تفسیر مفسر انسانی دارد.

استفاده از مقادیر ویژه مطابق رابطه (۲) معرفی کرد:

$$AI = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} + \varepsilon} \quad (2)$$

پارامتر ε یک مقدار مثبت و بسیار کوچکی است که برای جلوگیری از ناپایداری عددی و تقسیم بر صفر در محاسبات به کار می‌رود. نرمال‌سازی اقلیدسی در شاخص ناهمسانگردی با استفاده از $\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$ حساسیت شاخص را نسبت به شدت سیگنال و نوفه کاهش داده و آن را تنها به شدت تغییرات ساختاری وابسته می‌کند (Aytekin et al., 2018). این رویکرد باعث افزایش دقت، پایداری بهتر به نسبت سیگنال به نوفه و تفکیک پذیری بهتر می‌شود.

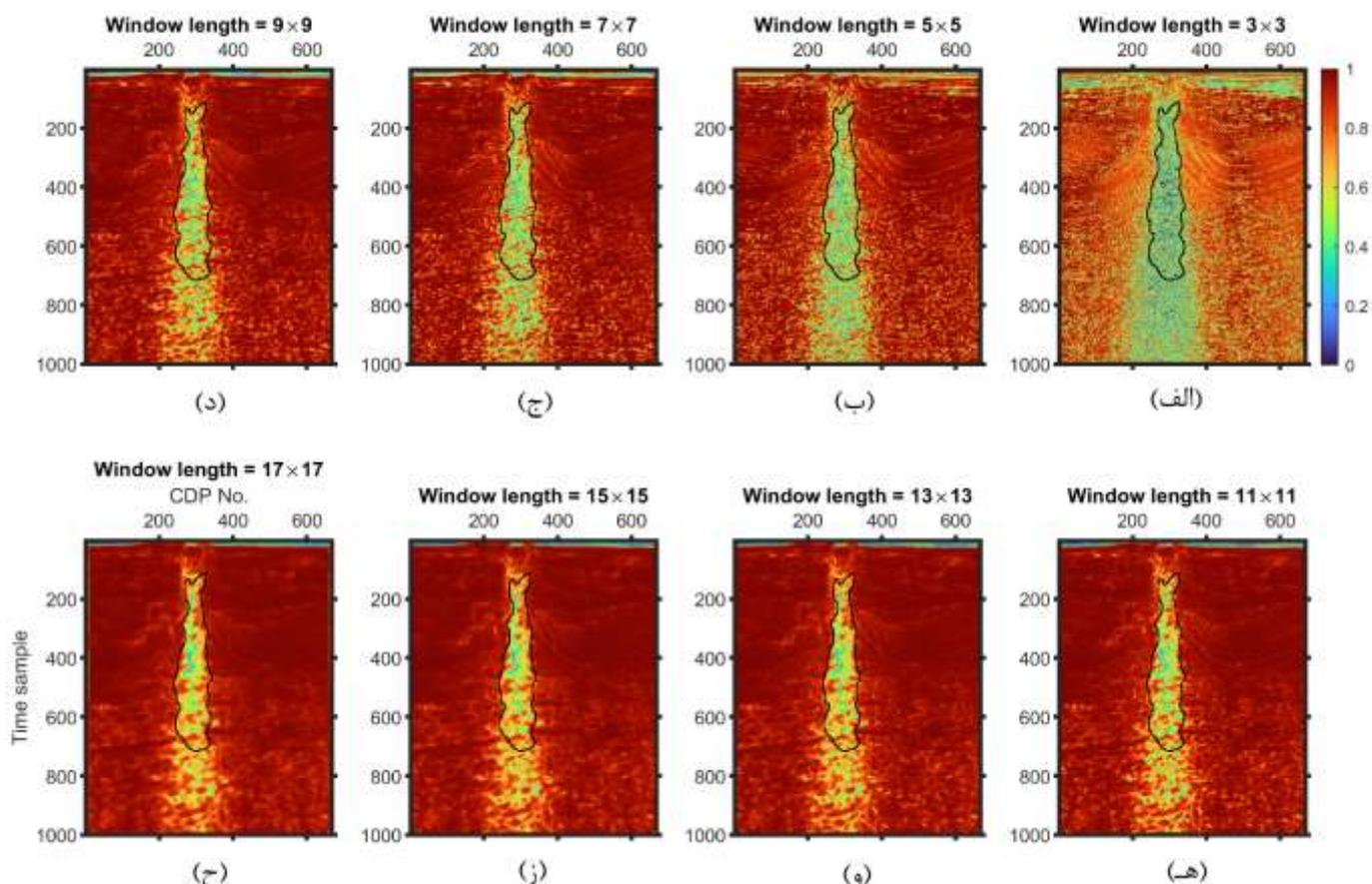
شاخص ناهمسانگردی تانسور ساختار گرادیان بر پایه اختلاف بین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس تعریف می‌شود. این معیار کمی برای سنجش ناهمسانگردی، مقداری بین یک تا صفر تولید می‌کند. در شرایط همسانگرد مانند گنبد نمکی، تقریباً $\lambda_1 \approx \lambda_2$ است که باعث می‌شود شاخص ناهمسانگردی $AI \approx 0$ بشود؛ در صورتی که در شرایط ناهمسانگرد مانند لایه‌بندی، اختلاف مقادیر ویژه بسیار زیاد است، به عبارت دیگر $\lambda_1 \gg \lambda_2$ در چنین شرایطی، $AI \approx 1$ می‌شود. تانسور ساختار گرادیان پنجره‌های A و B برای مثال شکل ۱ به ترتیب در رابطه (۳) آورده شده است. مقادیر ویژه و شاخص ناهمسانگردی محاسبه شده برای هر یک از پنجره‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار شاخص ناهمسانگردی در پنجره A مربوط به گنبد نمکی از شاخص ناهمسانگردی در پنجره B مربوط به لایه‌بندی کمتر است. بنابراین، روش پیشنهادی را می‌توان به عنوان یک نشانگر برای تفکیک بافت‌های مختلف به خصوص لایه‌بندی از گنبد نمکی استفاده نمود.

$$C_A = \begin{bmatrix} 5.58 \times 10^4 & 9.37 \times 10^3 \\ 9.37 \times 10^3 & 7.58 \times 10^4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_B = \begin{bmatrix} 3.24 \times 10^7 & 6.81 \times 10^7 \\ 6.81 \times 10^7 & 1.57 \times 10^8 \end{bmatrix}$$

جدول ۱: مقادیر ویژه و شاخص ناهمسانگردی برای پنجره‌های منتخب

شکل ۱.



شکل ۲: نشانگر شاخص ناهمسانگردی برای داده لرزه‌ای شکل ۱ با استفاده از ابعاد پنجره (الف) 3×3 ، (ب) 5×5 ، (ج) 7×7 ، (د) 9×9 ، (ه) 11×11 ، (و) 13×13 ، (ز) 15×15 ، (ح) 17×17 .

گنبد نمکی را با مقادیر پایین‌تر از رسوبات در بر گیرنده مشخص می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، نشانگر آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری، محدوده گنبد نمکی را در تمام ابعاد پنجره تحلیل بزرگ‌تر از محدوده تفسیر دستی (منحنی سفید) شناسایی کرده است.

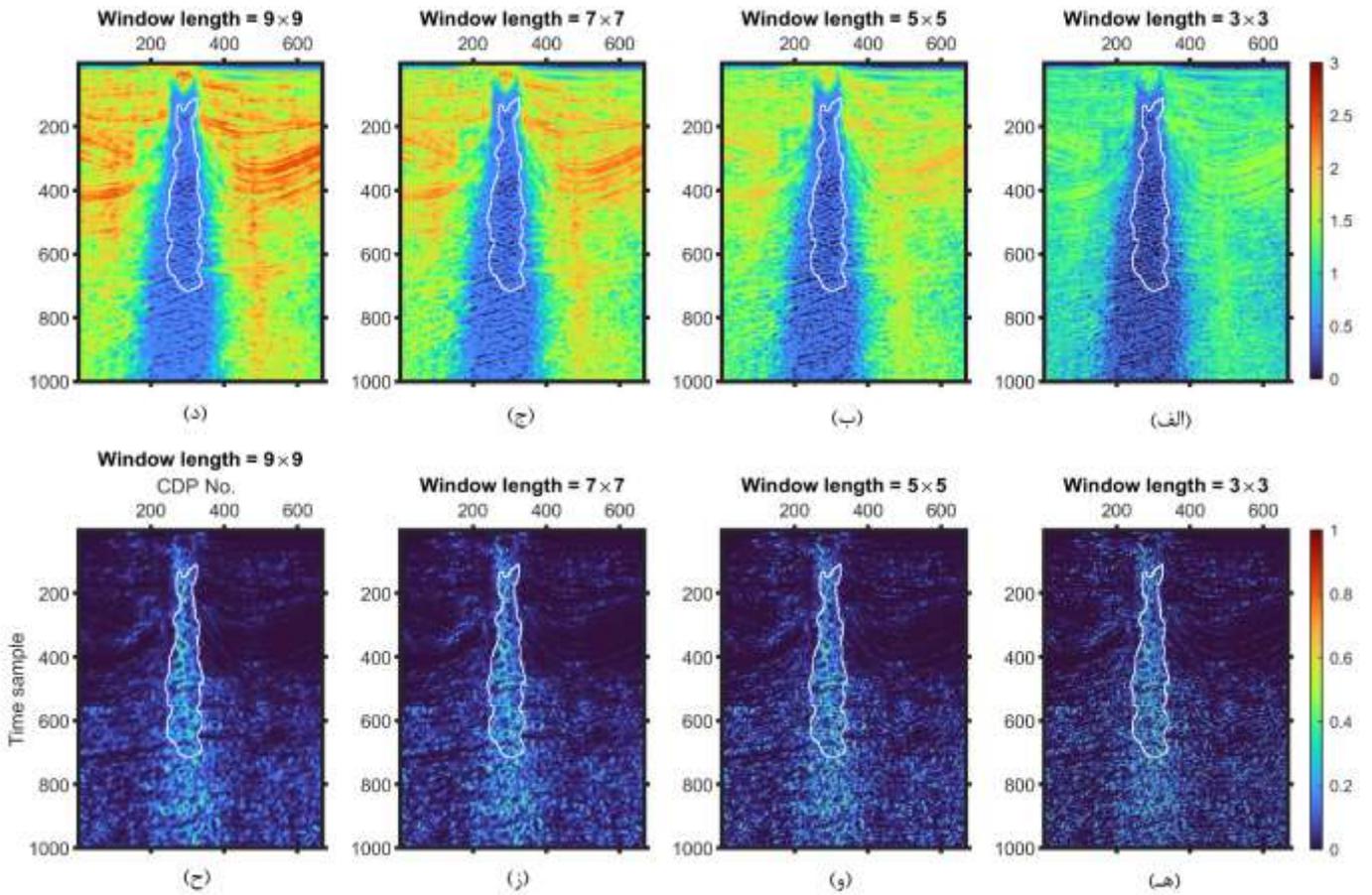
گنبد نمکی در نشانگر آشفتگی با مقادیر بیشتر از رسوبات در بر گیرنده مشخص می‌شود. با این حال، نتایج نشانگر آشفتگی با نتیجه تفسیر دستی محدوده گنبد نمکی همبستگی بالایی ندارد و مرزهای جانبی را نتوانسته است به خوبی مشخص نماید. علاوه بر این، این نشانگر به شدت تحت تاثیر نوفه است و علیرغم استفاده از فیلتر پخش ناهمسانگرد برای کاهش اثر نوفه، همچنان نتیجه قابل قبولی تولید نکرده است.

با مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نشانگرهای بافتی آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری و نشانگر آشفتگی می‌توان دید که نشانگر پیشنهادی دارای عملکرد بهتری نسبت به دو نشانگر متداول است. همچنین، عدم نیاز این نشانگر به محاسبه شیب محلی علاوه بر افزایش سرعت محاسبات، عدم قطعیت ناشی از خطای محاسبه شیب محلی نیز در آن وجود ندارد.

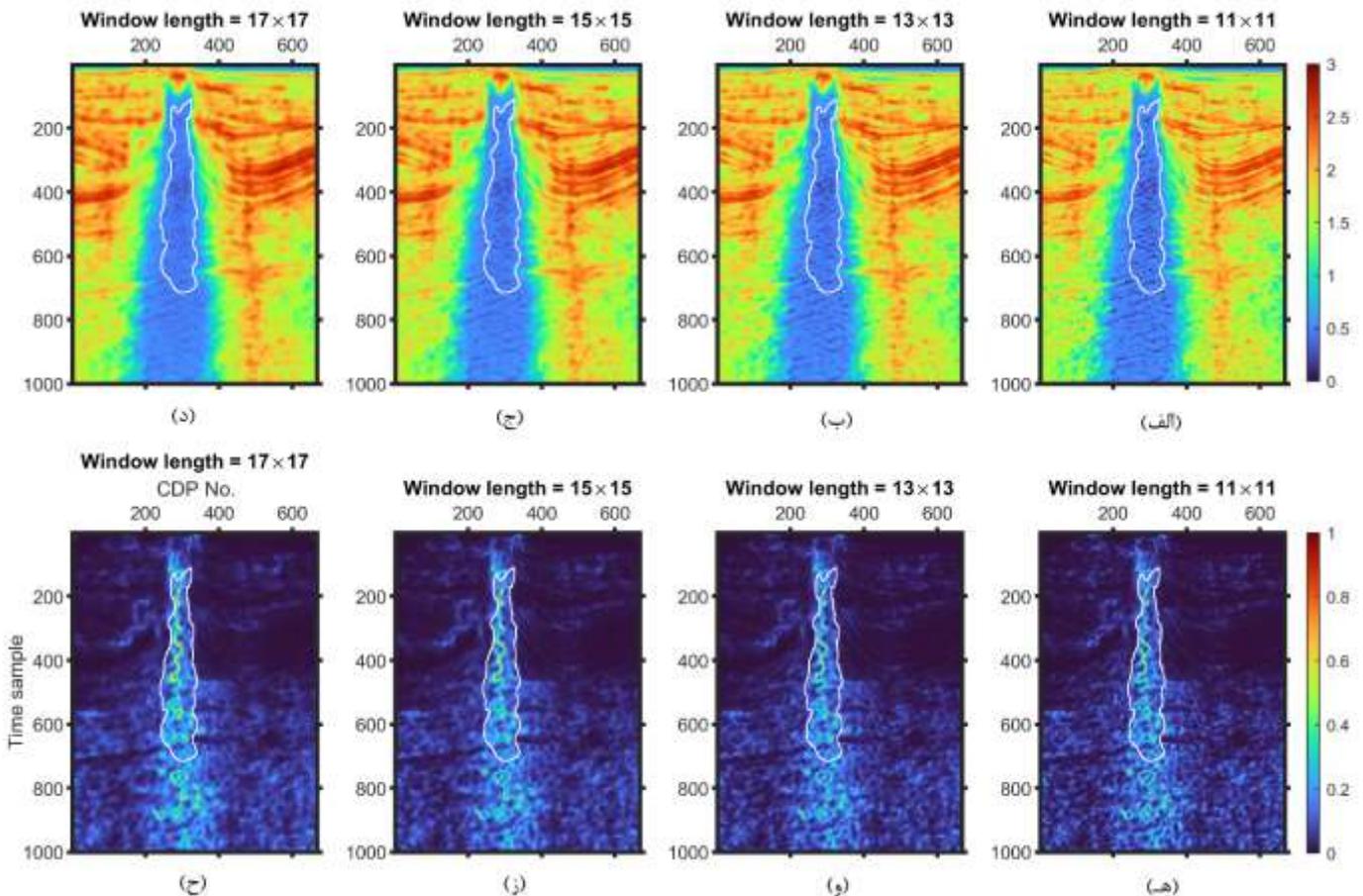
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پنجره‌های کوچک، جزئیات دقیق‌تری از اطلاعات بافتی داده لرزه‌ای را آشکار می‌کنند. با این حال، ابعاد کوچک پنجره حساسیت نشانگر را نسبت به نوفه و تغییرات محلی بیشتر می‌کند و تصویر نهایی نشانگر بافتی را به شدت تحت تاثیر نوفه قرار می‌دهد. از آنجایی که مقیاس پنجره‌های با ابعاد کوچک مانند 3×3 با مقیاس تغییرات دامنه ناشی از رویدادهای زمین‌شناسی هدف که در اینجا گنبد نمکی می‌باشد، متناسب نیست، این ابعاد پنجره برای محاسبه نشانگر بافتی شاخص ناهمسانگردی مناسب نمی‌باشد. در مقابل، انتخاب ابعاد بزرگ‌تر برای پنجره، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، حساسیت نشانگر را به نوفه کاهش می‌دهد. اما این انتخاب با افزایش حجم محاسبات و کاهش قدرت تفکیک همراه است.

به منظور مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با نشانگرهای بافتی متداول، نشانگرهای بافتی آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری و نشانگر آشفتگی (Soltani et al., 2023) با طول پنجره‌های مختلف محاسبه گردید که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، مرز گنبد نمکی تفسیر شده با خط توپر سفید روی نشانگرها ترسیم شده است.

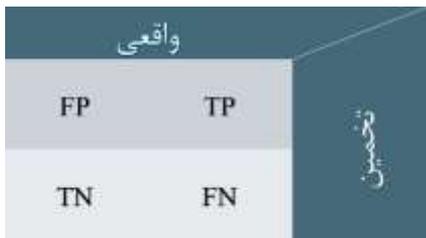
نشانگر بافتی آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری،



شکل ۲: (ردیف بالا) نشانگر آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری برای داده لرزه‌ای شکل ۱ با استفاده از ابعاد پنجره (الف) 3×3 ، (ب) 5×5 ، (ج) 7×7 و (د) 9×9 (ردیف پایین) نشانگر آشفتگی برای داده لرزه‌ای شکل ۱ با استفاده از ابعاد پنجره (ه) 3×3 ، (و) 5×5 ، (ز) 7×7 ، (ح) 9×9 .



شکل ۴: (ردیف بالا) نشانگر آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری برای داده لرزه‌ای شکل ۱ با استفاده از ابعاد پنجره (الف) 11×11 ، (ب) 13×13 ، (ج) 15×15 ، (د) 17×17 و (ردیف پایین) نشانگر آشفتگی برای داده لرزه‌ای شکل ۱ با استفاده از ابعاد پنجره (ه) 11×11 ، (و) 13×13 ، (ز) 15×15 ، (ح) 17×17 .



شکل ۵: پارامترهای موثر در محاسبه F1-Score در ماتریس درهم‌ریختگی طبقه‌بندی دوگانه.

- TP: تعداد موارد درست مثبت که واقعاً مثبت بوده‌اند و توسط مدل هم به‌درستی به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند.
- FP: تعداد موارد نادرست مثبت که واقعاً منفی بوده‌اند اما به اشتباه توسط مدل به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند.
- FN: تعداد موارد نادرست منفی که واقعاً مثبت بوده‌اند اما به اشتباه توسط مدل به‌عنوان منفی تشخیص داده شده‌اند.
- TN: تعداد موارد درست منفی که واقعاً منفی بوده‌اند و

۴- مقایسه کمی نتایج

جهت ارزیابی کمی نشانگر شاخص ناهمسانگردی تانسور گرادیان با دو نشانگر آنتروپی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری و نشانگر آشفتگی در داده‌های واقعی از معیار F1-Score استفاده می‌گردد. معیار F1-Score با ایجاد تعادل بین معیارهای دقت (Precision) و حساسیت (Recall) در ماتریس سردرگمی (Confusion matrix) حاصل از طبقه‌بندی دوگانه (Binary Classification) که شامل دو کلاس مثبت و منفی است کارایی روش را به‌خوبی نشان می‌دهد. ماتریس سردرگمی در طبقه‌بندی دوگانه مطابق شکل ۵ شامل چهار مؤلفه اصلی مثبت صادق (TP)، مثبت کاذب (FP)، منفی کاذب (FN) و منفی صادق (TN) است (Khayyer et al., 2022; Lipton et al., 2014).

مدل‌های دودویی به منظور ارزیابی عملکرد، با مدل دودویی تفسیر دستی مقایسه گردیدند و دقت حاصل به صورت کمی محاسبه شد. خلاصه نتایج این ارزیابی در جدول ۲ گزارش شده است.

بر اساس نتایج جدول ۲، در یک طول پنجره ثابت، نشانگر شاخص ناهمسانگردی عملکرد بهتری نسبت به دو نشانگر دیگر از خود نشان می‌دهد. مطابق با مبانی نظری هر یک از نشانگرها، طول پنجره بهینه می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان نمونه، در مورد شاخص ناهمسانگردی، بهترین نتیجه با استفاده از پنجره 7×7 و 9×9 شده است. در انتخاب طول پنجره، یک موازنه اساسی میان حساسیت به نوفه و قدرت تفکیک وجود دارد. به طور کلی، پنجره‌های کوچک‌تر به دلیل ابعاد محدود خود نسبت به نوفه حساس‌تر هستند، در حالی که استفاده از پنجره‌های بزرگ‌تر باعث کاهش اثر نوفه می‌شود؛ اما در مقابل، قدرت تفکیک جزئیات کاهش می‌یابد. در نشانگر آشفتگی، نتایج نشان داد که علی‌رغم تأثیر منفی نوفه، پنجره‌های کوچک‌تر نسبت به پنجره‌های بزرگ‌تر عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌دهند. به صورت کلی می‌توان گفت که در داده‌های با کیفیت بالا و نوفه کمتر، استفاده از پنجره‌های کوچک‌تر منجر به نتایج بهتری خواهد شد، در حالی که در داده‌های با نوفه زیاد، پنجره‌های با اندازه متوسط تعادل مناسبی میان کاهش نوفه و حفظ قدرت تفکیک ایجاد می‌کنند.

توسط مدل هم به درستی به عنوان منفی پیش‌بینی شده‌اند.

کمیت دقت به عنوان نسبت تعداد مثبت‌های صادق به کل مثبت‌های صادق و مثبت‌های کاذب تعریف می‌شود که با کاهش صحت طبقه‌بندی مقدار آن کمتر می‌شود که مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Lipton et al., 2014):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

کمیت حساسیت نشان‌دهنده نسبت موارد مثبت صادق است که توسط مدل به درستی تشخیص داده شده‌اند و بیانگر میزان نمونه‌های مثبت از دست‌رفته (منفی‌های کاذب) توسط مدل است که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Lipton et al., 2014):

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

در نهایت، معیار F1-Score با استفاده از کمیت‌های حساسیت و دقت از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. این روش برای برقراری تعادل بین دقت و حساسیت به کار می‌رود (Lipton et al., 2014):

$$F1 - Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (6)$$

حداکثر مقدار معیار F1-Score، یک (۱۰۰٪) و حداقل آن صفر است. استفاده از این معیارها به هدف مدل بستگی دارد. در واقع، F1-Score نوعی میانگین هماهنگ از دقت و حساسیت است. به بیان دیگر، هرچه مقدار این معیار بالاتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل در طبقه‌بندی خواهد بود. در ادامه، خروجی هر نشانگر با استفاده از روش آستانه‌گذاری (Thresholding) و مجموعه‌ای از پردازش‌های ریخت‌شناسی (Morphological methods) به صورت مدل‌های دودویی (Binary Models) با مقادیر صفر و یک تبدیل شدند (Khayer et al., 2022). این

ابعاد پنجره

نشانگر	3 × 3	5 × 5	7 × 7	9 × 9	11 × 11	13 × 13	15 × 15	17 × 17
شاخص ناهمسانگردی	۵۳/۴	۵۹/۵	۶۲/۹	۶۱/۴	۵۹/۸	۵۹/۷	۵۹/۶	۵۷/۸
آنتروپی مبتنی بر GLCM	۴۷/۳	۵۴/۴	۵۱/۶	۴۹/۸	۴۸/۷	۴۸/۱	۴۷/۶	۴۷/۱
آشفستگی	۵۳/۲	۵۲/۶	۵۰/۶	۴۹/۴	۴۵/۹	۴۵/۷	۴۵/۴	۴۴/۶

قدرت تفکیک آن نداشته است. بنابراین، نشانگر بافتی شاخص ناهمسانگردی می‌تواند به عنوان یک نشانگر بافتی کارآمد در تحلیل و تفسیر داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد.

۶- علائم و اختصارات

جدول ۳: فهرست علائم و اختصارات استفاده شده در متن مقاله.

مخفف	عنوان کامل انگلیسی	عنوان کامل فارسی
GLCM	Gray Level Co-occurrence Matrix	ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری
GLRLM	Gray Level Run Length Matrix	ماتریس طول اجرای سطح خاکستری
GLSZM	Gray Level Size Zone Matrix	ماتریس اندازه ناحیه سطح خاکستری
GLDM	Gray level Difference Matrix	ماتریس تفاضل سطح خاکستری
NGLDM	Normalized Gray Level Dependence Matrix	ماتریس وابستگی سطح خاکستری نرمال شده
PCA	Principal Component Analysis	تحلیل مولفه‌های اصلی
ACM	Active Contour Models	منحنی تراز فعال
TP	True Positive	مثبت صادق
FN	False Negative	منفی کاذب
TN	True Negative	منفی صادق
FP	False Positive	مثبت کاذب

۷- منابع

- Aqrabi, A. A., T. H. Boe, and S. Barros. 2011, Detecting salt domes using a dip guided 3D Sobel seismic attribute. Paper read at SEG International Exposition and Annual Meeting.
- Asjad, A., and D. Mohamed, 2015, A new approach for salt dome detection using a 3D multidirectional edge detector: Applied Geophysics, **12**, no. 3, 334-342.
- Aytekin, C., X. Ni, F. Cricri, and E. Aksu. 2018, Clustering and unsupervised anomaly detection with 1 2 normalized deep auto-encoder representations. Paper read at 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN).
- Barnes, A., 2016, Handbook of Poststack Seismic

بنابراین، همواره بایستی در انتخاب ابعاد پنجره تعادلی بین وضوح جزئیات و پایداری در برابر نوفه را در نظر گرفت. در داده لرزه‌ای مورد استفاده، ابعاد پنجره 7×7 تا 9×9 ابعاد مناسب پنجره هستند. البته می‌توان از روش‌های تلفیق اطلاعات برای ترکیب این روش با ابعاد پنجره مختلف استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بر اساس تحلیل همسانگردی تغییرات دامنه لرزه‌ای در یک پنجره تحلیل محلی، یک نشانگر بافتی جدید با عنوان شاخص ناهمسانگردی معرفی گردید. نتایج به دست آمده در تحلیل‌ها و داده واقعی نشان داد که:

۱- نشانگر شاخص ناهمسانگردی، گنبد نمکی را به دلیل عدم وجود جهت‌یافتگی خاصی در آن، با مقادیر کمتر از لایه‌بندی رسوبات در برگیرنده نشان می‌دهد.

۲- شاخص ناهمسانگردی تانسور گرادیان در مقایسه با نشانگرهای آشفستگی و آنتروپی ماتریس هم‌رخدادی سطح خاکستری، توانایی بالاتری در تفکیک دقیق‌تر گنبد نمکی نسبت به لایه‌بندی اطراف آن و تعیین مرزهای آن دارد و انطباق بهتری با تفسیرهای دستی نشان می‌دهد.

۳- برخلاف دو نشانگر یادشده، شاخص ناهمسانگردی مستقل از محاسبه شیب بوده و در نتیجه از خطاهای ناشی از عدم قطعیت در برآورد شیب بی‌تاثیر است.

۴- به دلیل عدم نیاز به محاسبه شیب و انتخاب پنجره تحلیل ساختارگرا، بهره‌وری محاسباتی نشانگر شاخص ناهمسانگردی از دو نشانگر متداول بهتر است.

۵- با توجه به اینکه مشتق یک از ارکان محاسبه نشانگر شاخص ناهمسانگردی است، در پنجره‌های کوچک تاثیر نوفه غالب خواهد شد و بنابراین، بهتر است برای داده‌های لرزه‌ای واقعی از پنجره با ابعاد متوسط و بزرگ استفاده شود.

۶- نشانگر شاخص ناهمسانگردی در پنجره‌های بزرگ‌تر نسبت به دو نشانگر دیگر دقت بالاتری ارائه می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که این نشانگر، از یک‌سو در برابر نوفه مقاومت بیشتری دارد و از سوی دیگر، افزایش طول پنجره تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش

- read at SEG International Exposition and Annual Meeting.
- Lomask, J., R. G. Clapp, and B. Biondi, 2007, Application of image segmentation to tracking 3D salt boundaries: *Geophysics*, **72**, no. 4, P47-P56.
- Mousavi Nezhad, M., A. R. Kahoo, and M. Radad, 2025, Improving the eigen-structure seismic attribute in identifying seismic discontinuities using eigenvectors: *Journal of Research on Applied Geophysics (JRAG)*, -. <http://dx.doi.org/10.22044/jrag.2025.15905.1368>.
- Roshandel Kahoo, A., M. Soleimani Monfared, and M. Radad, 2021, Identification and modeling of salt dome in seismic data using three-dimensional texture gradient: *Iranian Journal of Geophysics*, **15**, no. 1, 19-33.
- Shafiq, M. A., Z. Wang, A. Amin, T. Hegazy, M. Deriche, and G. AlRegib. 2015, Detection of salt-dome boundary surfaces in migrated seismic volumes using gradient of textures. Paper read at SEG International Exposition and Annual Meeting.
- Shi, J., and J. Malik, 2000, Normalized cuts and image segmentation: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, **22**, no. 8, 888-905.
- Soltani, P., A. R. Kahoo, and H. Hasanpour, 2023, Proposing new seismic texture attributes based on novel gray level matrix with application to salt dome detection: *Journal of Applied Geophysics*, **218**, 105214.
- Wang, Z., Z. Long, and G. AlRegib. 2016, Tensor-based subspace learning for tracking salt-dome boundaries constrained by seismic attributes. Paper read at 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).
- Wang, Z., T. Hegazy, Z. Long, and G. AlRegib, 2015, Noise-robust detection and tracking of salt domes in postmigrated volumes using texture, tensors, and subspace learning: *Geophysics*, **80**, no. 6, WD101-WD116.
- Yilmaz, Ö., 2001, *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*: Society of exploration geophysicists.
- Zhang, Y., and A. D. Halpert. 2012, Enhanced Interpreter-Aided Salt Boundary Extraction Using Shape Deformation. Paper read at 2012 SEG Annual Meeting.
- Attributes, Society of Exploration Geophysicists, 21, 268 pp.
- Berthelot, A., A. H. Solberg, and L.-J. Gelius, 2013, Texture attributes for detection of salt: *Journal of Applied Geophysics*, **88**, 52-69.
- Berthelot, A., A. Solberg, E. Morisbak, and L. Gelius. 2012, Use of seismic attributes in auto-tracking of salt structures—A feasibility study: Presented at the 82nd Annual international Meeting. SEG.
- Chopra, S., and K. J. Marfurt, 2007, Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization: SEG and EAGE.
- Eichkitz, C. G., J. Amtmann, and M. G. Schreilechner, 2013, Calculation of grey level co-occurrence matrix-based seismic attributes in three dimensions: *Computers & Geosciences*, **60**, 176-183.
- Farrokhnia, F., A. R. Kahoo, and M. Soleimani, 2018, Automatic salt dome detection in seismic data by combination of attribute analysis on CRS images and IGU map delineation: *Journal of Applied Geophysics*, **159**, 395-407.
- Felzenszwalb, P. F., and D. P. Huttenlocher, 2004, Efficient graph-based image segmentation: *International journal of computer vision*, **59**, no. 2, 167-181.
- Gao, D., 2011, Latest developments in seismic texture analysis for subsurface structure, facies, and reservoir characterization: A review: *Geophysics*, **76**, no. 2, W1-W13.
- Hegazy, T., and G. AlRegib. 2014, Texture attributes for detecting salt bodies in seismic data: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1455–1459.
- Hosseini-Fard, E., A. Roshandel-Kahoo, M. Soleimani-Monfared, K. Khayer, and A. R. Ahmadi-Fard, 2022, Automatic seismic image segmentation by introducing a novel strategy in histogram of oriented gradients: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **209**, 109971.
- Humeau-Heurtier, A., 2019, Texture feature extraction methods: A survey: *IEEE access*, **7**, 8975-9000.
- Iske, A., and T. Randen, 2005, *Methods and modelling in hydrocarbon exploration and production*: Springer, Springer Berlin, Heidelberg, **10**, b137702.
- Kalaneh, S., F. Ghaemi, S. R. Mousavi-Harami, and H. Mohajer Soltani, 2023, Origin of the Gharnyaregh and Nefteijeh mud volcanoes in Gorgan plain, Iran: *Iranian Journal of Geophysics*, **17**, no. 1, 238-243.
- Khayer, K., A. Roshandel-Kahoo, M. Soleimani-Monfared, and K. Kavooosi, 2022, Combination of seismic attributes using graph-based methods to identify the salt dome boundary: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **215**, 110625.
- Lipton, Z. C., C. Elkan, and B. Narayanaswamy, 2014, Thresholding classifiers to maximize F1 score: *stat*, **1050**, 14.
- Lomask, J., B. Biondi, and J. Shragge. 2004, Image segmentation for tracking salt boundaries. Paper