

بررسی عملکرد همبستگی چینه‌ای خودکار مبتنی بر پارامتر هاسدورف و متوسط سیگنال نمودار چاه‌پیمایی

سید محمد امین پرتوی^۱، سعید صادق‌نژاد^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی نفت، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۱۹

پیام‌نگار: sadeghnejad@modares.ac.ir

چکیده

درک درست از چگونگی توالی لایه‌های زمین‌شناسی و امتداد و ناپیوستگی‌های احتمالی آن‌ها برای مشخصه‌سازی مخازن نفت و گاز بسیار پراهمیت است. هدف از همبستگی چینه‌ای، تبیین مرزهای زمین‌شناسی برای ساخت یک مدل سه‌بعدی از مخزن است. این فرایند معمولاً به صورت دستی صورت می‌پذیرد، از این رو متأثر از سلیقه افراد تحلیل‌گر ممکن است نتایج متفاوتی به دست آید. به کارگیری الگوریتم خودکار به منظور شناسایی مرزهای زمین‌شناسی، علاوه بر تسهیل تطابق چینه‌ای و حذف ناسازگاری‌های ناشی از تحلیل دستی موجب صرفه‌جویی در میزان هزینه و زمان خواهد شد. در این پژوهش از مشخصه‌های آماری و فرکتالی (دارای شکل هندسی فروریخت) برای تشخیص الگوی نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده شده است. روش به کار گرفته شده برای تعیین مشخصه فرکتالی، آنالیز تبدیل موجک است. شناسایی الگوی مشابه در چاه‌های مشاهده‌ای با الگوی به دست آمده از چاه شاهد (چاهی که از پیش محل مرزهای زمین‌شناسی در آن مشخص شده باشد) اساس کار این الگوریتم است. الگوریتم تطابق چینه‌ای خودکار بر داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی ۴ حلقه چاه از یکی از میادین جنوب غرب ایران آزمایش شده است. در این جهت، یکی از مرزهای زمین‌شناسی در چاه شاهد به عنوان مرز مورد مطالعه انتخاب شده و هدف یافتن عمق مرز متناظر با آن در دیگر چاه‌های میدان مورد مطالعه است. روش خودکار عمق مرز زمین‌شناسی مورد جستجو را در تمامی چاه‌ها با موفقیت تشخیص داد. اختلاف اندک عمق به دست آمده به کمک روش خودکار نسبت به روش دستی در حدود ۱/۰۷ متر است که از کارایی روش خودکار مبتنی بر ابعاد فرکتالی در تطابق چینه‌ای حکایت دارد.

کلیدواژه‌ها: تبدیل موجک، فرکتال، مرز زمین‌شناسی، نمودار چاه‌پیمایی.

۱. مقدمه

نمودارهای چاه‌پیمایی^۲ به دلیل سرعت زیاد در گردآوری اطلاعات، استفاده گسترده در تمامی چاه‌ها و حجم زیادی از اطلاعات که ارائه می‌دهند، همواره به عنوان داده ورودی در همبستگی بین‌چاهی، مورد توجه بوده‌اند.

همبستگی چینه‌ای^۱ یکی از وظایف اصلی زمین‌شناسان به شمار می‌آید که در صنعت نفت و گاز از اهمیت زیادی برخوردار است.

* تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی نفت
1. Stratigraphic Correlation

2. Well-Logs

معمولاً همبستگی چینه‌ای بین چاهی به صورت یک فرایند دستی از جانب تحلیل‌گر صورت می‌پذیرد. نتایج این همبستگی متاثر از سلیقه تحلیل‌گران می‌تواند متفاوت باشد؛ از این‌رو همبستگی بین چاهی معمول حاوی ناسازگاری در نتایج است. به همین دلیل، طراحی یک برنامه کامپیوتری که به صورت خودکار همبستگی چاه‌ها را میسر کند، از اهمیت زیادی برخوردار است.

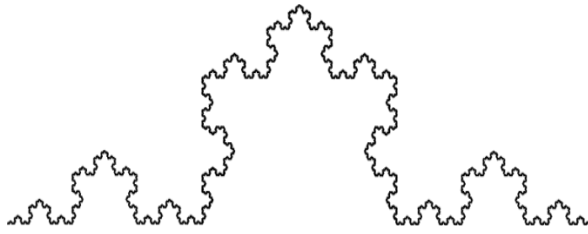
برنامه‌ریزی پویا^۱، الگوریتم شناسایی الگوها^۲، پردازش سیگنال^۳، هوش مصنوعی^۴ و روش‌های مشابه از جمله روش‌هایی‌اند که پژوهشگران به منظور خودکار کردن همبستگی بین چاهی به کار گرفته‌اند. برنامه‌ریزی پویا یکی از روش‌های بهینه‌سازی^۵ است که از سوی برخی پژوهشگران به منظور همبستگی بین چاه‌ها به کار گرفته شد [۱ و ۲]. لاپکوفسکی و همکاران (۲۰۱۵)^۶ با ارائه یک تابع چند متغیره بین چاه‌ها و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی مورچه و موج روشی برای همبستگی بین چاهی ارائه دادند [۳]. تغییر در ضخامت لایه‌ها و نیز حذف لایه‌های زمین‌شناختی در برخی چاه‌ها به دلیل فرسایش می‌تواند بر نتایج حاصل از این روش‌های بهینه‌سازی تأثیر گذارد. تبدیل موجک^۷ از جمله روش‌های پردازش سیگنال است که در پژوهش‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ریورا وگا (۲۰۰۴)^۸ از تبدیل موجک برای تفسیر پدیده چرخه رسوب‌گذاری و نیز تعیین عوامل کنترل‌کننده آن و در نهایت مشخص کردن مرزهای منطقه مورد مطالعه سود جست [۴]. مثال‌های متعددی از کاربرد تبدیل موجک در شناسایی رخساره‌های الکتریکی^۹ در دسترس‌اند [۵-۸]. تبدیل والش [۹] و تبدیل فوریه [۱۰] نیز از دیگر ابزارهای پردازش سیگنال برای شاخص کردن مخازن به‌شمار می‌آیند. هوش مصنوعی روش دیگری است که نقش بسزایی در پیشرفت روش‌های خودکار همبستگی بین چاهی داشته است [۱۱-۱۴]. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی چندان سیستماتیک (سازمند) نیست و نیازمند دخالت تحلیل‌گر و اطلاعات زیادی است که گاه از دسترس خارج است [۱۵].

یکی از ویژگی‌های نمودارهای چاه پیمایی چند فرکتالی^{۱۰} بودن آن‌هاست. پروکوف (۱۹۹۹)^{۱۱} از آنالیز فرکتال چندگانه نمودارهای چاه‌پیمایی برای شناسایی ناپیوستگی‌ها در لایه‌های رسوبی استفاده کرد [۱۶]. خو و همکاران (۲۰۰۲)^{۱۲} از آنالیز چندفرکتالی نمودارهای چاه‌پیمایی شیب‌سنجی^{۱۳} و ریزمقاومت^{۱۴} برای مشخصه‌سازی ساختار سنگ‌شناسی^{۱۵} استفاده کردند [۱۷]. علاوه بر این‌ها، لوپز و آلدانا (۲۰۰۷)^{۱۶} به کمک تبدیل موجک خواص چندفرکتالی نمودارهای چاه‌پیمایی را بررسی کردند، آنان مقادیر ابعاد فرکتالی را به الگوی سنگ‌شناسی^{۱۷} میدان مورد بررسی نسبت دادند به طوری که لایه‌های با میزان شیل بیشتر بعد فرکتالی بیشتری داشتند [۱۸]. هدف از این پژوهش ارائه روش خودکار برای همبستگی بین چاهی است. در این میان مشخصه‌های فرکتالی و آماری مربوط به نمودار چاه‌پیمایی بر روی مرز مورد نظر در چاه شاهد محاسبه می‌شود، سپس با محاسبه مشخصه‌های یادشده درون یک پنجره متحرک در طول چاه مشاهده‌ای و مقایسه آن‌ها با نتایج به دست آمده از چاه شاهد می‌توان عمق مرز مورد نظر در چاه مشاهده‌ای را به دست آورد. در این پژوهش از پارامتر فرکتالی بعد هاسدورف^{۱۸} برای اولین بار برای همبستگی بین چاهی سود جست شده است. برای بررسی عملکرد این روش، فرایند بالا بر روی داده‌های یکی از میدادین خشکی ایران در جنوب غرب کشور آزمایش شده است. استفاده از این روش خودکار تا حد زیادی اختلاف‌نظرهای موجود در روش بصری را کاهش داده و در هزینه و زمان صرفه‌جویی خواهد کرد.

در این مقاله، ابتدا به معرفی روش تبدیل موجک و کاربردهای آن خواهیم پرداخت و سپس با اشکال خودمتمشابه^{۱۹} و فرکتال‌ها آشنا خواهیم شد. در ادامه، روش محاسبه ابعاد فرکتالی به کمک تبدیل موجک ارائه می‌شود. با معرفی الگوریتم خودکار برای یافتن مرزهای زمین‌شناسی که در این تحقیق از آن سود خواهیم برد، کار ادامه می‌یابد و در نهایت الگوریتم معرفی شده بر روی داده‌های چاه‌پیمایی یکی از میدادین ایران آزمایش و بررسی خواهد شد.

10. Multifractality
11. Prokop, 1999
12. Khue et. al., 2002
13. Dipmeter
14. Microresistivity
15. Lithology
16. Lopez and Aldana, 2007
17. Lithology Pattern
18. Hausdorff
19. Self-Similar

1. Dynamic Programing
2. Pattern Recognition
3. Signal Processing
4. Artificial Intelligence
5. Optimization
6. Lapkovsky et. al., 2015
7. Wavelet Transform
8. Rivera Vega, 2004
9. Electro-Facies



شکل ۱. دانه برف کخ نمونه‌ای از شکل‌های دقیقاً خود متشابه.

$$D = \frac{\text{Log}(N)}{\text{Log}(1/r)} \quad (1)$$

این تعریف برای یک خط راست دارای بعد یک و برای یک مربع بعد دو را به دست می‌دهد. رابطه (۱) فقط برای فرکتال‌های دقیقاً خودمتشابه معنی دارد و برای سایر فرکتال‌ها نمی‌توان بعد فرکتالی را از رابطه (۱) محاسبه کرد. از این‌رو چندین مشخصه برای شرح مشخصات و خواص فرکتالی آن‌ها ارائه شده است، مانند ثابت هرست و پارامتر هاسدورف [۲۱].

۳. تبدیل موجک و روش محاسبه بعد فرکتالی

مفهوم موجک در ابتدای دهه ۸۰ میلادی ارائه شد. در سال ۱۹۸۲ مورلت ژئوفیزیک‌دان فرانسوی برای نخستین بار از موجک به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل سیگنال لرزه‌ای بهره گرفت [۲۳ و ۲۲]. مشخصه‌سازی سیگنال در دو بعد بسامد و زمان (یا مکان) مهم‌ترین ویژگی تبدیل موجک است. تبدیل موجک به دلیل خاصیت تفکیک‌پذیری چندگانه به روشی مؤثر برای مشخصه‌سازی مخازن [۲۴ و ۴]، تعیین چرخه‌های رسوب‌گذاری [۲۵ و ۴] و تعیین عمق مرزهای ساختارهای زمین‌شناسی [۷، ۲۶] تبدیل شد. آنچه تبدیل موجک خوانده می‌شود، ابزاری است برای تبدیل، که قابلیت تجزیه یک سیگنال به مجموعه‌ای از توابع پایه را که از آن‌ها به پایه‌های موجک^{۱۰} یاد می‌شود، داراست. توابع پایه موجک، $\psi_{a,b}(x)$ ، به راحتی از طریق اتساع^{۱۱}، a ، و انتقال^{۱۲}، b ، از یک تابع تبدیل موجک مادر^{۱۳}، ψ ، به دست می‌آیند.

10. Wavelet Basis
11. Dilating
12. Translating
13. Mother Wavelet

۲. فرکتال‌ها

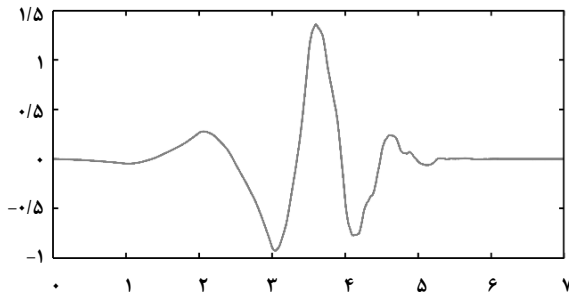
هندسه اقلیدسی^۱ که بر پایه خطوط و شکل‌های هندسی منظم استوار است، ابزاری قدرتمند در تحلیل روابط حاکم بر چنین سیستم‌هایی است. با این حال، شکل عوارض طبیعی از قبیل کوه‌ها، ابرها و یا درختان را دقیقاً نمی‌توان با چنین شکل‌های هندسی منظمی بیان کرد. در دهه‌های گذشته، درک رفتار چنین سیستم‌هایی، تحول عظیمی را پیموده است. هندسه فرکتالی^۲ زبان گویای رفتار این شکل‌های پیچیده است که در سراسر جهان هستی پراکنده‌اند [۱۹]. فرکتال‌ها پدیده‌های طبیعی‌ای‌اند که دارای خاصیت خودمتشابهی در سطوح مقیاس مختلف‌اند که در پس یک شکل کاملاً بی‌نظم پنهان شده‌اند.

فرکتال‌ها دارای دو مشخصه مهم‌اند؛ بعد فرکتالی^۳ و خودمتشابهی^۴. از بعد فرکتال برای شرح میزان صافی، دندان‌داری، ناهمواری و یا پیچیدگی شکل‌های فرکتالی استفاده می‌شود. این خصیصه به ما می‌گوید که چگونه فرکتال‌ها فضایی را اشغال می‌کنند که در درون آن قرار دارند [۲۰]. بعد فرکتالی مقداری اعشاری است.

دیگر مشخصه مهم فرکتال‌ها، خاصیت خودمتشابهی است؛ که نشان می‌دهد اجزای این شکل‌ها چقدر مشابه شکل اصلی‌اند. خاصیت خودمتشابهی در فرکتال‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد. فرکتال‌های قطعی^۵ و فرکتال‌های اتفاقی^۶. در گروه اول دو دسته عمده فرکتال‌ها قرار می‌گیرند: فرکتال‌های دقیقاً خودمتشابه^۷ و فرکتال‌های آماری^۸. فرکتال‌های کاتوره‌ای، شکل‌هایی‌اند که در تشکیل ساختار خودمتشابهی‌شان تا حدی احتمال دخیل است. ولی دسته اول یعنی فرکتال‌های قطعی را می‌توان به صورت یک فرمول دقیق بیان کرد [۲۱]. مطابق شکل (۱)، دانه برف کخ^۹ نمونه‌ای از شکل‌های دقیقاً خودمتشابه است.

بعد فرکتالی یک شکل دقیقاً خودمتشابه، D که از تعداد N کپی از خودش که هرکدام به میزان پارامتر r کوچک‌تر شده‌اند، بنا بر تعریف، عبارت‌اند از [۱۹]:

1. Euclidean Geometry
2. Fractal Geometry
3. Fractal Dimension
4. Self-Similarity
5. Deterministic Fractals
6. Random Fractals
7. Exactly Self-Similar Fractals
8. Statistical fractals
9. Koch snowflake



شکل ۲. موجک دابچیز با چهار هنگام ناپدید شونده.

رفتار خودمتمشابهی در مقیاس مختلف بروز بدهد، آنگاه می توان به کمک تبدیل موجک به آشکارسازی این رفتار پرداخت [۳۰]. با توجه به تغییر خواص سنگ در لایه های مختلف زمین شناسی و مشابهت این خواص در گستره یک لایه خاص انتظار می رود نمودارهای چاه پیمایی به دست آمده برای هر لایه دارای مشخصه فرکتالی مخصوص به خود باشند و با عبور از مرز بین دو لایه در میزان بعد فرکتالی نمودارهای چاه پیمایی تغییر محسوسی ایجاد شود. به بیان دیگر، لایه های مختلف مخزن به صورت مجموعه ای از چندین فرکتال عمل می کنند که در کنار هم قرار گرفته اند. در واقع رفتار چندفرکتالی^۸ را در آنالیز نمودارهای چاه پیمایی لایه های مختلف زمین مشاهده خواهیم کرد. در این پژوهش از بعد هاسدورف که قدیمی ترین و یکی از مهم ترین ابعاد فرکتالی است [۲۱]، برای تعیین میزان خاصیت خودمتمشابهی سیگنال نمودار چاه پیمایی مورد نظر بهره گرفته شده است. برای محاسبه بعد هاسدورف ابتدا سیگنال از طریق تبدیل موجک گسسته تجزیه می شود. طی این فرایند سیگنال از دو صافی مکمل عبور می کند و حاصل تجزیه مجموعه ای از ضرایب تقریب^۹، $a(j, n)$ ، و جزییات^{۱۰}، $d(j, n)$ ، است [۳۱]. ضرایب تقریب دارای بسامد پایین و جزییات شامل ضرایب با بسامد بالا هستند. این فرایند تا چند سطح انجام می شود و در هر سطح ضرایب تقریب به مجموعه ضرایب تقریب و جزییات تجزیه می شوند. در شکل (۳) فرایند تجزیه سیگنال تا سه سطح را مشاهده می کنید.

$$d(j, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{j,n}(x) dx, \quad j \in Z, n \in Z \quad (4)$$

8. Multi Fractals
9. Approximation
10. Details

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

نتیجه تبدیل موجک دستیابی به مقدار زیادی ضرایب موجک است که تابع مکان^۱ و مقیاس^۲ هستند. با ضرب کردن هر یک از این ضرایب در موجک فرزند می توان سیگنال ورودی را بازسازی کرد. بیان تبدیل موجک، $T(a, b)$ ، برای یک سیگنالی مانند $f(x)$ در بعد مکان، x ، به صورت زیر خواهد بود.

$$T(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx \quad (3)$$

که در آن علامت “*” نماد مزدوج مختلط^۳ تابع ψ خواهد بود. در رابطه بالا $f(x)$ سیگنال مورد نظر و $\psi_{a,b}(x)$ تابع موجک آنالیزکننده است [۲۸ و ۲۷].

امروزه دو نوع روش مختلف تبدیل موجک، تبدیل موجک پیوسته^۴ و تبدیل موجک گسسته^۵، را به کار می گیرند به تبدیل موجک گسسته گاهی تبدیل موجک متعامد^۶ نیز می گویند. دلیل این امر استفاده از توابع پایه عمود برهم در تبدیل موجک گسسته است [۲۷].

در این پژوهش از تبدیل موجک گسسته برای تجزیه نمودارهای چاه پیمایی بهره گرفته ایم. پیش تر از موجک هار، به عنوان ساده ترین موجک خانواده دابچیز^۷ برای استخراج ویژگی های فرکتالی نمودارهای چاه پیمایی استفاده شد [۲۹]. در این پژوهش، موجک دابچیز با چهار هنگام ناپدید شونده برای تبدیل موجک انتخاب شد. با توجه به این که ساختار این موجک به سیگنال مورد بررسی، یعنی نمودارهای چاه پیمایی شباهت بیشتری دارد، انتظار می رود عملکرد مطلوبی داشته باشد. در شکل (۲) ساختار این نوع موجک را مشاهده می کنید.

تبدیل موجک این توانایی را فراهم می آورد که به کمک عملیات ریاضی بتوان بر روی یک سیگنال در اندازه های مختلف، کوچک نمایی و بزرگ نمایی کرد. به عبارت بهتر، وقتی یک سیگنال

1. Position
2. Scale
3. Complex Conjugate
4. Continues Wavelet Transform (CWT)
5. Discrete Wavelet Transform (DWT)
6. Orthogonal Wavelet Transform (OWT)
7. Daubechies

از این قرار بیان می‌شود:

$$P_{2^j}(\omega) = P(\omega) |\hat{\psi}(2^{-j}\omega)|^2 \quad (10)$$

که $\hat{\psi}_{2^j}(\omega) = \hat{\psi}(2^{-j}\omega)$ همان تابع موجک با مقیاس 2^j است. طیف توانی یک سیگنال گسسته از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$P_{2^j}^d(\omega) = 2^j \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_{2^j}(\omega + 2^j 2m\pi) \quad (11)$$

مقدار انرژی جزئیات، E_{2^j} ، از این قرار است:

$$E_{2^j} = \frac{2^{-j}}{2\pi} \int_{-2^j\pi}^{+2^j\pi} P_{2^j}^d(\omega) d\omega \quad (12)$$

با نشان دادن روابط (10) و (11) در رابطه (12) می‌رسیم به:

$$E_{2^{j+1}} = 2^{2Ha} E_{2^j} \quad (13)$$

پارامتر هاسدورف، Ha ، برابر است با نصف شیب خط رگرسیون حداقل مربعات نمودار لگاریتمی انرژی نسبت به مقیاس z $(\log_2(Energy) - \log_2(2^j))$ [19].

4. روش کار در تطابق چینه‌ای خودکار

هدف از این تحقیق تدوین و آزمودن روشی است که بتواند به صورت خودکار به تطابق چینه‌شناسی مرزهای زمین‌شناسی در چاه‌های مختلف بپردازد، که پیش‌فرض این کار وجود داده‌های کاملاً مشخص شده یک و یا چندین چاه (چاه شاهد) در مخزن است تا به کمک این داده‌ها بتوان به تعیین مشخصه‌های بقیه چاه‌های مخزن پرداخت.

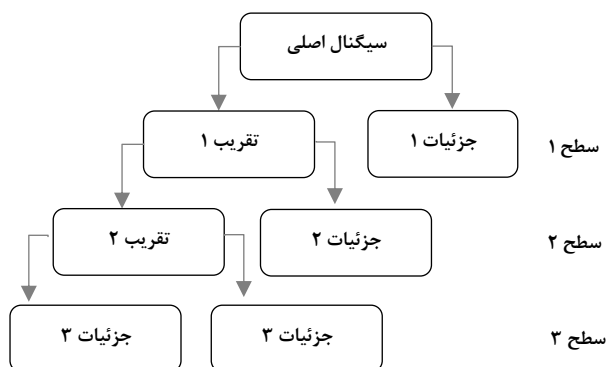
اطلاعات ورودی، تنها داده‌های مربوط به نمودارهای چاه‌پیمایی است. نمودارهای رایج به کار رفته برای تفسیر رخساره‌های سنگی^۳ نمودارهای پتانسیل خودزا^۴، مقاومت^۵، پرتو گاما^۶ و دیگر تفسیرها به کار می‌آیند.

$$a(j, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \phi_{j,n}(x) dx, \quad j \in Z, n \in Z \quad (5)$$

که

$$\psi_{j,n} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - n) \quad (6)$$

$$\phi_{j,n} = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}x - n) \quad (7)$$



شکل ۳. تجزیه سیگنال تا سه سطح.

تابع مقیاس^۱، $\phi(x)$ ، مربوط به تابع موجک مادر، $\psi(x)$ ، است. z بیانگر مقیاس و n بیانگر انتقال مکان است. سیگنال مربوط به نمودار چاه‌پیمایی از طریق جمع کردن ضرایب جزئیات و تقریب قابل‌بازبینی است [۳۲ و ۳۳].

$$f(x) = \sum_n a(j, n) \phi_{j,n}(x) + \sum_{j=1}^J \sum_k d(j, n) \psi_{j,n}(x) \quad (8)$$

از انرژی ضرایب جزئیات تمام سطوح برای محاسبه پارامتر هاسدورف استفاده می‌شود. طیف توانی^۲، $P(\omega)$ ، یک سیگنال طبق رابطه زیر ارائه شده است.

$$P(\omega) = \alpha \omega^{-\beta} = \alpha \omega^{-2Ha-1} \quad (9)$$

α مقداری ثابت و ω بسامد زاویه‌ای سیگنال نمودار چاه‌پیمایی است. طیف توانی یک سیگنال فرکتالی حاصل گذر از صافی بالاگذر

1. Scaling Function
2. Power Spectrum

3. Lithofacies
4. Spontaneous Potential Log (SP)
5. Receptivity Log (R)
6. Gamma ray Log (GR)

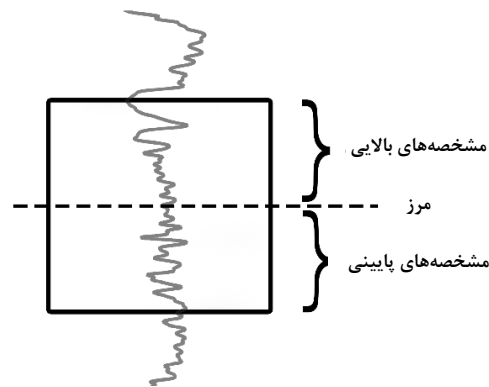
که در روابط (۱۴)، N تعداد داده‌های نمودار چاه‌پیمایی در هر قسمت از پنجره مورد مطالعه است. y_j مقدار نمودار چاه‌پیمایی است.

همانطور که اشاره شد، پارامترهای متوسط سیگنال و بعد هاسدورف برای قسمت بالایی و پایینی پنجره منطبق بر مرز زمین‌شناسی در چاه شاهد محاسبه می‌شوند. سپس پنجره‌ای مشابه بر روی نمودار سایر چاه‌ها (چاه‌های مشاهده‌ای) حرکت می‌کند و پارامترهای یادشده را محاسبه می‌کند. عمقی از چاه‌های مشاهده‌ای که خواص آماری و فرکتالی آن بیشترین شباهت را با پارامترهای محاسبه شده در چاه شاهد داشته باشد، به عنوان عمق متناظر با مرز زمین‌شناسی موردنظر در چاه شاهد در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، مرز موردنظر در دیگر چاه‌های میدان به‌صورت خودکار به دست می‌آید و می‌توان این فرایند را برای یافتن دیگر مرزهای زمین‌شناسی موجود در میدان تکرار کرد.

۵. مشخصه‌های میدان مورد مطالعه

میدان مورد استفاده در این پژوهش، طاق‌دیسی نسبتاً دراز و متقارن به طول حدود ۲۲/۵ کیلومتر و عرضی در پهن‌ترین نقطه در حدود ۴/۵ کیلومتر است که وجود نفت در سال ۱۳۴۷ با حفاری اولین چاه در آن به اثبات رسیده است. این میدان در ۷ کیلومتری شمال شرق میدان اهواز واقع شده است. چگالی نفت این میدان ۲۸ الی ۳۶ درجه API برآورد شده است. نفت از بخش‌های ماسه‌سنگی سازند آسماری استخراج می‌شود. ضخامت سازند آسماری در این میدان بین ۳۷۰ تا ۴۰۰ متر متغیر است. سنگ مخزن از سنگ آهکی، دولومیت، ماسه‌سنگ و پلمه‌سنگ تشکیل یافته است و در حدود ۷۰٪ حجم کل نفت در ماسه‌سنگ می‌باشد. نمودارهای چاه‌پیمایی ۴ چاه از این میدان برای بررسی الگوریتم ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است. بخش زیادی از این میدان دارای لایه‌های شیلی و دولومیتی است که در میدان مورد مطالعه پیشین کمتر یافت می‌شود. این میدان با توجه به ناهمگنی بیشتری که نسبت به میدان مورد مطالعه پیشین [۲۹] دارد، امکان ارزیابی روش خودکار را در شرایط سخت‌تر فراهم می‌آورد.

روش به‌کاررفته از این قرار است که پنجره‌ای بر روی نمودار چاه‌پیمایی چاه شاهد قرار می‌گیرد که در آن عمق همه مرزهای زمین‌شناسی مشخص است؛ به طوری که مرکز پنجره بر روی مرز بین لایه‌های قرار گرفته باشد. دو سیگنال، یکی در قسمت بالایی پنجره و دیگری در قسمت پایین پنجره در دسترس قرار می‌گیرد (شکل (۴)). با تعیین مشخصه‌های آماری و فرکتالی، قسمت بالایی و پایینی پنجره به دو سیگنال با دو رده مختلف تقسیم می‌شوند. با تعیین اختلاف دو رده در چاه شاهد و جستجوی این رفتار در چاه‌های دیگر، به تعیین این مرز در چاه‌های مشاهده‌ای می‌پردازیم. مشخصه آماری در نظر گرفته شده مقدار متوسط سیگنال است زیرا نمودار پرتو گاما به عنوان داده ورودی همبستگی بین‌چاهی انتخاب شده و با توجه به اینکه با عبور از یک لایه به لایه دیگر شاهد تغییر در میزان پرتو گامای گسیل شده از ساختار سنگ‌شناسی خواهیم بود، پارامتر متوسط میزان پرتو گاما می‌تواند مشخصه آماری مناسبی برای تشخیص لایه‌های مختلف از هم باشد. در شکل (۴) اساس کار پنجره در نظر گرفته شده را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴. پنجره به‌کار رفته در الگوریتم شناسایی مرزها.

پارامتر متوسط سیگنال برگرفته از کار ریورا وگا (۲۰۰۴)^۱ مطابق رابطه (۱۷) برای قسمت بالایی و پایینی محاسبه می‌شود [۴]:

$$\mu_{upper} = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N} \quad \mu_{lower} = \frac{\sum_{j=N+1}^{2N} y_j}{N} \quad (14)$$

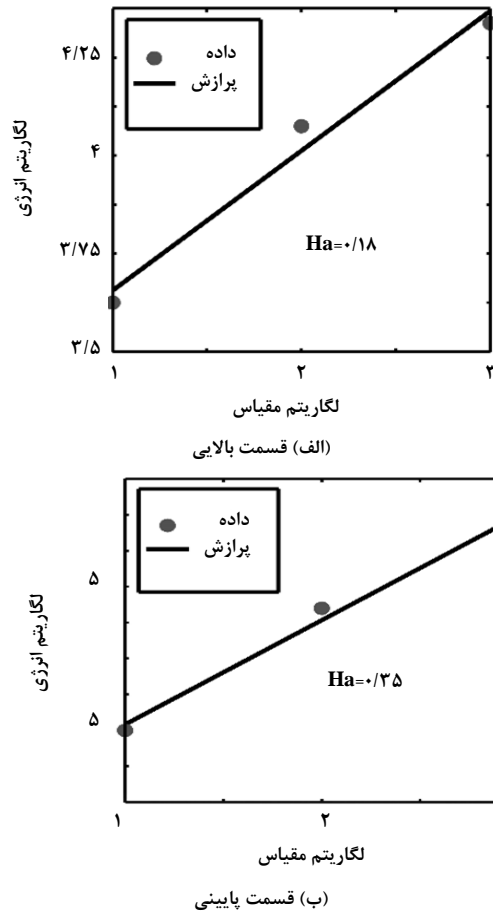
1. Rivera Vega, 2004

۶. نتایج

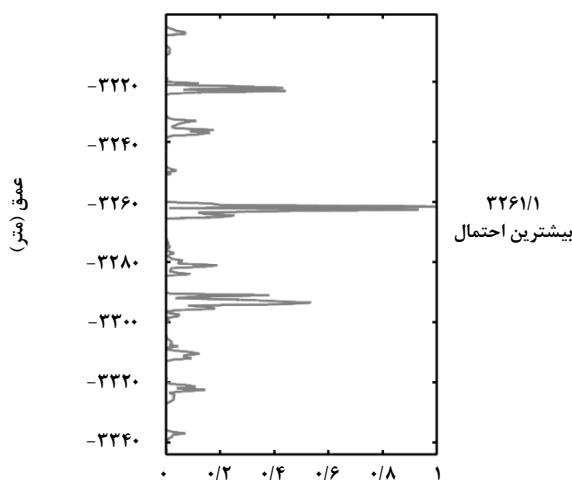
در این مقاله برای همبستگی چینه‌شناختی و یافتن مرزها، مرز بین دو لایه از مخزن آسماری به عنوان مرز مورد جستجو انتخاب شده است. میانگین تخلخل و اشباع آب در این ناحیه از میدان در حدود $23\%/7$ و $27\%/7$ است. با توجه به شیب کم یال‌های مخزن در این لایه احتمال وجود شکاف بسیار کم است و مقادیر نمودارها از شکاف متأثر نخواهند شد. هدف به دست آوردن مرز این لایه در دیگر چاه‌های میدان مورد مطالعه است. نمودارهای چاه‌پیمایی مورد استفاده در این پژوهش نمودار پرتوگاما است که در تمامی چاه‌های مخزن، موجود است.

چاه شماره یک در مخزن مورد مطالعه به عنوان چاه شاهد در نظر گرفته شده است. مرز انتخاب شده در عمق ۳۱۳۲ متری از چاه شاهد قرار دارد. طول پنجره ۱۵ متر انتخاب شده است. ابتدا نمودارهای چاه‌پیمایی پرتو گاما چاه شاهد و چاه‌های مشاهده‌ای از طریق تبدیل موجک تا ۳ مرحله تجزیه شده اند. سپس پارامتر هاسدورف برای مرز انتخاب شده در چاه شاهد و در طول چاه مشاهده‌ای محاسبه شده است. در شکل (۵) محاسبه بعد هاسدورف در قسمت بالایی و پایینی پنجره در نمودار چاه‌پیمایی چاه شاهد را مشاهده می‌کنید.

پارامتر متوسط سیگنال نیز از طریق رابطه (۴) محاسبه شده است. پس از محاسبه مقادیر مشخصه‌ها در دو طرف مرز زمین‌شناسی در چاه شاهد و در طول چاه مشاهده‌ای میزان اختلاف مقادیر این مشخصه‌ها در چاه شاهد و چاه مشاهده‌ای محاسبه می‌شود. میزان احتمال یکسان بودن برای هر کدام از مشخصه‌ها با فرض توزیع گاوسی و عدم وابستگی مشخصه‌ها به یکدیگر محاسبه می‌شود. عمقی از چاه مشاهده‌ای که دارای بیشترین میزان احتمال یکسان بودن باشد، همان مرز مورد مطالعه در چاه شاهد است. در شکل (۶) توزیع احتمال در طول چاه شماره ۲ را مشاهده می‌کنید. با توجه به شکل (۶)، عمق $3261/1$ متری محتمل‌ترین عمق برای مرز انتخاب شده در چاه شماره ۲ است. با مقایسه این عمق با گزارش‌های همبستگی چینه‌شناسی معمول در این میدان که به صورت دستی به دست متخصص به دست آمده است، تنها شاهد $0/3$ متر اختلاف در نتایج بوده‌ایم که انحراف بسیار ناچیزی است.



شکل ۵. محاسبه بعد هاسدورف در (الف) قسمت بالایی پنجره؛ و (ب) قسمت پایینی پنجره در اطراف مرز زمین‌شناسی در چاه شاهد.



شکل ۶. توزیع احتمال در طول چاه مشاهده‌ای شماره ۲، قلّه نمودار نمایانگر محتمل‌ترین عمق برای مرز زمین‌شناختی است.

۷. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله روشی خودکار برای یافتن مرزهای زمین‌شناسی ارائه شد. در این راستا از دو مشخصه آماری و فرکتالی برای تشخیص الگوی نمودارهای چاه‌پیمایی بهره گرفته شد. برای محاسبه بعد فرکتالی هاسدورف از تبدیل موجک گسسته سود جستیم. الگوریتم ارائه شده در این تحقیق قادر است به صورت خودکار به جستجوی مرزهای زمین‌شناسی مشخص شده از چاه شاهد در چاه‌های مشاهده‌ای بپردازد. از مزیت‌های این روش عدم تأثیرپذیری از تغییر در ضخامت لایه‌ها و ناپیوستگی‌های احتمالی موجود در مخزن است. عملکرد خودکار این روش در جستجوی مرزهای زمین‌شناسی می‌تواند ناسازگاری موجود در روش‌های طاق‌فرسای دستی را نیز حذف کند و عملیات همبستگی چینه‌شناسی را تسهیل کند. نتایج به دست آمده از به‌کارگیری این روش بر روی داده‌های واقعی یکی از میادین ایران، سرعت زیاد در محاسبات و خطای اندک در اندازه‌گیری و در مجموع موثر بودن روش مورد استفاده را تایید می‌کند. با توجه به اینکه این روش تنها بر اساس نمودارهای چاه‌پیمایی است خطا در فرایند چاه‌نگاری بر نتایج این روش تأثیر می‌گذارد از این‌رو اضافه کردن اطلاعات حاصل از آنالیز مغزه‌ها می‌تواند موجب افزایش دقت این روش شود.

مراجع

- [1] Le Nir, I., Van Gysel, N., Rossi, D., "Cross-section construction from automated well log correlation: a dynamic programming approach using multiple well logs". in SPWLA 39th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, (1998).
- [2] Zoraster, S., Paruchuri, R., Darby, S., "Curve alignment for well-to-well log correlation. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition". Society of Petroleum Engineers, (2004).
- [3] Lapkovsky, V. V., Istomin, A. V., Kontorovich, V. A., "Correlation of well logs as a multidimensional optimization problem". Russian Geology and Geophysics. 56(3): p. 487-492, (2015).
- [4] Rivera Vega, N., "Reservoir characterization using wavelet transforms". Texas A&M University, (2004).
- [5] Perez-Muñoz, T., Velasco-Hernandez, J., Hernandez-Martinez, E., "Wavelet transform analysis for lithological characteristics identification in siliciclastic oil fields". Journal of Applied Geophysics. 98: p. 298-308, (2013).

میزان اختلاف عمق در الگوریتم همبستگی چینه‌شناختی خودکار در مقایسه با نتایج تطابق چینه‌ای دستی در جدول (۱)، درج شده است.

جدول ۱. میزان انحراف عمق محاسبه شده از الگوریتم مورد استفاده و روش معمول در همبستگی چینه‌ای.

| شماره چاه | اختلاف عمق به دست آمده از روش خودکار نسبت به روش دستی (متر) |
|-----------|--|
| ۱ | - |
| ۲ | ۰/۳ |
| ۳ | ۰/۷ |
| ۴ | ۲/۲ |

فرض اساسی در این روش تغییر بعد فرکتالی نمودارهای چاه‌پیمایی در محل مرزهای زمین‌شناسی و تغییر میزان پرتو گامای گسیلیده از لایه‌های دو طرف مرز زمین‌شناسی است. این تغییر ناشی از تغییر در سنگ‌شناسی لایه‌ها و اختلاف در ویژگی‌های فیزیکی این لایه‌هاست.

نتایج کسب شده در تمامی چاه‌های میدان نشان می‌دهد که الگوریتم به کار گرفته شده در این تحقیق، دارای نتایج قابل قبولی بوده و بازه انحراف آن از روش‌های معمول در همبستگی چینه‌شناختی بسیار کم است. متوسط اختلاف عمق در حدود ۱/۰۷ متر است. این نتایج نشان می‌دهند که روش خودکار قادر است تا مرزهای مشخص شده در چاه شاهد را یکی پس از دیگری در تمامی چاه‌های دیگر میدان جستجو کند و فرایندی را که به صورت دستی انجام می‌شد با سرعت زیاد و دقت قابل قبول انجام دهد.

اختلاف در دقت تشخیص روش در چاه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ می‌تواند ناشی از چند دلیل باشد. محاسبه عمق مرز با روش دستی می‌تواند خود دارای خطا باشد که این خطا می‌تواند ناشی از خطای فرد تحلیل‌گر باشد. ممکن است مقدار نوفه پدید آمده در چاه‌های مختلف متفاوت باشد، به طوری که افزایش نوفه در چاه‌نگاری چاه ۴ موجب افزایش خطا در چاه‌نگاری و متعاقباً در روش خودکار شده است زیرا روش خودکار تنها بر اساس نمودارهای چاه‌پیمایی عمل می‌کند.

- [6] Prokoph, A. Veizer, J., "cycles and nonstationarities in isotope signals of Phanerozoic seawater". *Chemical Geology*. 161(1): p. 225-240, (1999).
- [7] Pan, S. Y., Hsieh, B., Tar Lu, M., Lin, Z., "Identification of stratigraphic formation interfaces using wavelet and Fourier transforms". *Computers & Geosciences*. 34(1): p. 77-92, (2008).
- [8] Henriques, M., Leite, F. E. A., Andrade, R. F. S., Lucena, L. S., "Improving the analysis of well-logs by wavelet cross-correlation". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 417: p. 130-140, (2015).
- [9] Maiti, S., R. Tiwari, "Automatic detection of lithologic boundaries using the Walsh transform: A case study from the KTB borehole". *Computers & geosciences*. 31(8): p. 949-955, (2005).
- [10] Weedon, G. P., "Time-series analysis and cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles". Cambridge University Press, (2003).
- [11] Alizadeh, B., Najjari, S., Kadkhodaie-Ilkhchi, A., "Artificial neural network modeling and cluster analysis for organic facies and burial history estimation using well log data: A case study of the South Pars Gas Field, Persian Gulf, Iran". *Computers & Geosciences*. 45: p. 261-269, (2012).
- [12] Chang, H. -C., Kopaska-Merkel, D., Hui-Chuan, C., "Lithofacies identification using multiple adaptive resonance theory neural networks and group decision expert system". *Computers & Geosciences*. 26(5): p. 591-601, (2000).
- [13] Derek, H., Johns, R., Pasternack, E., "Comparative study of back-propagation neural network and statistical pattern recognition techniques in identifying sandstone lithofacies". in *Proceedings 1990 Conference on Artificial Intelligence in Petroleum Exploration and Production: College Station, TX. Texas A & M University*, (1990).
- [14] Wong, P., Jian, F., Taggart, I., "A critical comparison of neural networks and discriminant analysis in lithofacies, porosity and permeability predictions". *Journal of Petroleum Geology*. 18(2): p. 191-206, (1995).
- [15] Hernandez-Martinez, E., Velasco Hernandez, J. X., Perez-Munoz T., "A DFA approach in well-logs for the identification of facies associations". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 392(23): p. 6015-6024, (2013).
- [16] Prokoph, A., "Fractal, multifractal and sliding window correlation dimension analysis of sedimentary time series". *Computers & Geosciences*. 25(9): p. 1009-1021, (1999).
- [17] Khue, P. N., Huseby, O., Saucier, A., Muller, J., "Application of generalized multifractal analysis for characterization of geological formations". *Journal of Physics: Condensed Matter*. 14(9): p. 2347, (2002).
- [18] López, M., Aldana, M., "Facies recognition using wavelet based fractal analysis and waveform classifier at the Oritupano-A Field, Venezuela". *Nonlinear Processes in Geophysics*. 14(4): p. 325-335, (2007).
- [19] Liu, X., Wang, H., Gu, H., "Fractal characteristic analysis of electrochemical noise with wavelet transform". *Corrosion science*. 48(6): p. 1337-1367, (2006).
- [20] Pancham, S., "Evidence of The Multifractal Market Hypothesis Using Wavelet Transform, in business administration". 1994, Florida International University. p. 14-15, (1994).
- [21] Falconer, K., "Fractal geometry: mathematical foundations and applications". John Wiley & Sons, (2004).
- [22] Morlet, J., Arens, G., Fourceau E., "Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media". *Geophysics*. 47(2): p. 203-221, (1982).
- [23] Morlet, J., Arens, G., Fourceau E., Girad, D., "Wave Propagation and Sampling Theory-Part II: Sampling Theory and Complex Waves". *Geophysics*. 47(2): p. 222-236, (1982).
- [24] Panda, M., Mosher, C., Chopra, A., "Application of wavelet transforms to reservoir-data analysis and scaling". *SPE journal*. 5(01): p. 92-101, (2000).
- [25] Prokoph, A. Agterberg, F. P., "Wavelet analysis of well-logging data from oil source rock, Egret Member, offshore eastern Canada". *AAPG bulletin*. 84(10): p. 1617-1632, (2000).
- [26] Chandrasekhar, E. Rao, V. E., "Wavelet analysis of geophysical well-log data of Bombay offshore basin, India". *Mathematical Geosciences*. 44(8): p. 901-928, (2012).
- [27] Michel, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M., "Wavelet Toolbox 4 User's Guide". The MathWorks, Inc. p. 1-27, (2010).
- [28] Nie, L., Wu, S., Wang, J., Zheng, L., Lin, X., "Continuous wavelet transform and its application to resolving and quantifying the overlapped voltammetric peaks". *Analytica chimica acta*. 450(1): p. 185-192, (2001).
- [29] Partovi, S. M. A., Sadeghnejad, S., "Fractal parameters and well-logs investigation using automated well-to-well correlation". *Computers & Geosciences*. 103: p. 59-69, (2017).
- [30] Cavanaugh, J. E., Wang, Y., Davis, J. W., "Locally self-similar processes and their wavelet analysis". *Handbook of statistics*. 21: p. 93-135, (2003).
- [31] Mallat, S. G., "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation". *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 11(7): p. 674-693, (1989).

- [32] Kirichenko ,L., Radivilova, T. , Deineko, Z., "Comparative analysis for estimating of the Hurst exponent for stationary and nonstationary time series". Information Technologies & Knowledge. 5(1): p. 371-388, (2011).
- [33] Ciftlikli, C. Gezer, A., "Comparison of Daubechies wavelets for Hurst parameter estimation". Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 18(1): p. 117-128, (2010).