

شناسایی شکستگی‌ها در نمودارهای تصویری الکتریکی با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و الگوریتم ژنتیک

پژوهش‌نفت

سال بیست و دوم

شماره ۷۲

صفحه ۹۸-۸۵، ۱۳۹۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۹/۳

مصطفی جاوید^{۱*}، حسین معماریان^۱، رضا آقایی زاده ظروفی^۲، بهزاد تخم‌چی^۳، فرهاد خوشبخت^۴

و سید مهدی مظهري^۲

۱- دانشگاه تهران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشکده مهندسی معدن

۲- دانشگاه تهران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

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

۴- پژوهشگاه صنعت نفت - پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی

m.javid@ut.ac.ir

تصویری می‌باشد. در این روش ابتدا، با استفاده از یک روش طبقه‌بندی، نقاط مربوط به شکستگی از داخل تصویر استخراج می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعداد، شیب، آزیموت و موقعیت عمقی شکستگی‌ها از روی نقاط استخراج شده، تعیین می‌گردد. این روش بر روی بخشی از دو نمودار تصویری مربوط به دو چاه از میدین هیدروکربوری جنوب ایران پیاده شد. دقت روش برای تخمین پارامترهای شکستگی چاه‌های مورد مطالعه بیش از ۷۰٪ به دست آمد. از طرفی روش پیشنهادی حساسیت کمی نسبت به وجود نویز در تصویر دارد.

واژه‌های کلیدی: مخازن نفت و گاز، نمودارهای تصویری، شکستگی، پردازش تصویر، الگوریتم ژنتیک

چکیده

در مخازن با شکستگی طبیعی، شکستگی‌ها نقش اساسی در تولید هیدروکربن ایفا می‌کنند. به همین دلیل، شناسایی شکستگی‌ها در جنبه‌های مختلف تولید و توسعه این میدین بسیار اهمیت دارد. نمودارهای تصویری، ابزاری بسیار قوی برای مطالعه شکستگی‌ها در چاه‌ها هستند. نمودار تصویری، یک شبه تصویر با تفکیک‌پذیری بالا از دیواره چاه می‌باشد. این نمودارها اطلاعات مهمی را درباره جهت‌گیری، عمق و نوع شکستگی‌های طبیعی فراهم می‌کند. امروزه برای شناسایی پارامترهای مربوط به شکستگی‌ها از روی این نمودارها، الگوریتم جامعی وجود ندارد و تفسیر این نمودارها اغلب به صورت دستی انجام می‌گیرد که در صورت نبود تجربه کافی، تفسیر با خطا مواجه خواهد بود. هدف از مطالعه حاضر، معرفی و به کارگیری روش‌های پردازش تصویر و الگوریتم ژنتیک، جهت پیدا کردن خودکار شکستگی‌ها در نمودارهای



شکل ۱- دستگاه FMS دارای ۴ بالشتک بوده که در هر بالشتک ۱۶ دکمه وجود دارد [۵]

دستگاه تصویرساز الکتریکی FMI در سال ۱۹۹۱ توسط شرکت شلومبرژه تولید شد. این دستگاه برای افزایش پوشش دیواره چاه و نیز به دست آوردن تصویری منسجم‌تر از سازندهای اطراف چاه نسبت به FMS، طراحی شد. پوشش این ابزار، تابعی از قطر چاه می‌باشد. به عنوان مثال در یک چاه با قطر ۶/۲۵ اینچ، بیش از ۹۲٪ دیواره چاه پوشش داده می‌شود. این دستگاه دارای چهار بازو است که بر روی هر یک از آن‌ها، یک بالشتک و یک زبانه^۳ سوار شده است. هر بالشتک و زبانه دارای ۲۴ الکتروود به قطر ۰/۱۶ اینچ است و به طور کلی، ۱۹۲ الکتروود در این دستگاه وجود دارد (شکل ۲) [۶].

به طور کلی، در نمودارهای تصویری، صفحات لایه‌بندی و شکستگی‌هایی که با دیواره چاه برخورد کرده است، به صورت منحنی‌های سینوسی با رابطه کلی زیر استنباط می‌شوند (شکل ۳) [۵].

$$y = A \sin(x+B) + C \quad (1)$$

$$A = R \tan \varphi$$

$$B = \frac{\pi}{2} - \beta$$

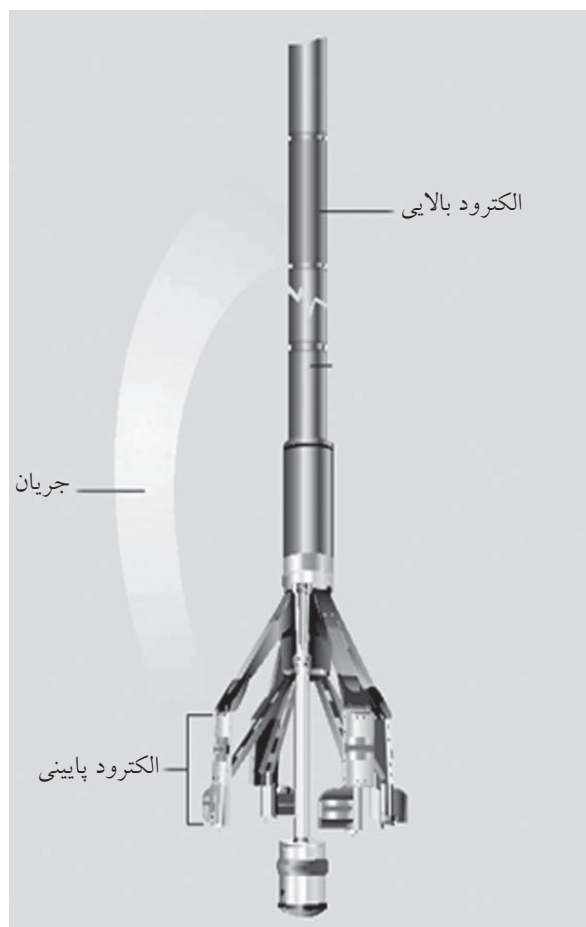
در معادله (۱)، R شعاع چاه، φ شیب، β آزمون و C موقعیت منحنی سینوسی در تصویر است. صفحات لایه‌بندی، اغلب دارای شیب و امتداد کم و بیش ثابت بوده و شیب آنها کمتر از ۴۵ درجه می‌باشد.

مقدمه

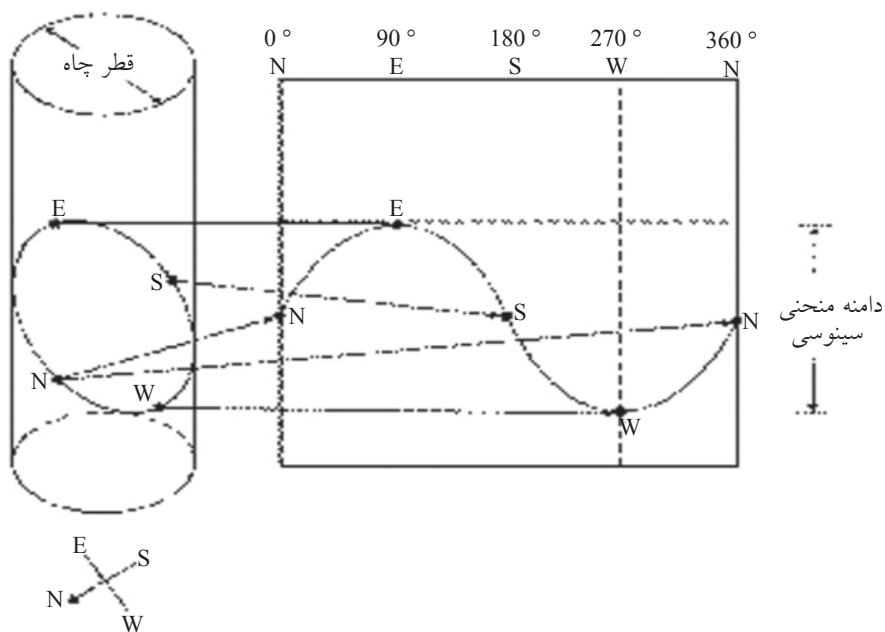
در مخازن با شکستگی‌های طبیعی، این شکستگی‌ها رفتار مخزن را کنترل می‌کنند. هنگامی که شکستگی‌ها باز هستند، مسیرهایی را برای حرکت هیدروکربن به سوی چاه ایجاد می‌کنند و حتی ممکن است مخازنی با تراوایی پایین را به نمونه‌هایی با تولید بالا تبدیل نمایند. در مقابل، هنگامی که شکستگی‌ها پر و یا سیمان شده هستند، به عنوان سد در مقابل حرکت هیدروکربن‌ها به سمت چاه، عمل می‌کنند [۱]. این رفتار دوگانه شکستگی‌ها، شناسایی آنها را ضروری می‌سازد. یکی از ابزارهای دقیق برای شناسایی شکستگی‌ها در مخازن هیدروکربوری، نمودارهای تصویری می‌باشد. امروزه نمودارهای تصویری جهت پیدا کردن شکستگی‌ها، به طور گسترده در مخازن با شکستگی در ایران استفاده می‌شوند [۲]. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از این تصاویر، به همراه دیگر چاه‌نگارها، مهندسين نفت قادرند مدل دقیقی از شکستگی‌ها را در ناحیه نزدیک چاه، به دست آورند. این مدل، به شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر حرکت سیال در مخازن پیچیده‌ای که به دلیل تأثیر نیروهای مختلف زمین‌ساختی (تکتونیکی) و نیز ساختارهای رسوبی تشکیل شده‌اند، کمک شایانی می‌کند [۳]. تصویربرداری از چاه به دو روش کلی فراصوتی و الکتریکی انجام می‌شود. در چاه‌هایی که گل حفاری شیرین باشد، از دستگاه‌های فراصوتی استفاده می‌شود. در مقابل، در چاه‌هایی با گل دارای درجه شوری بالا، دستگاه‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر حاصل از روش الکتریکی، تفکیک‌پذیری بالاتری نسبت به روش صوتی دارد، ولی در مقابل، پوشش این دستگاه‌ها با افزایش قطر چاه کاهش می‌یابد. دستگاه‌های صوتی امکان پوشش ۱۰۰٪ از دیواره چاه را فراهم می‌کند ولی تفکیک‌پذیری این دستگاه‌ها کمتر از دستگاه‌های الکتریکی است [۴].

دستگاه FMS نسل اول دستگاه‌های تصویرساز الکتریکی می‌باشد که توسط شرکت شلومبرژه^۱ تولید شده است. این دستگاه چهار بالشتکی، دارای شانزده دکمه^۲ در هر بالشتک است و جمعاً با اندازه‌گیری ۶۴ نمودار دارای پوشش ۴۰٪ در چاه به قطر ۸/۵ اینچ خواهد بود (شکل ۱) [۵].

1. Schlumberger
2. Button
3. Flap



شکل ۲- نمایی از دستگاه تصویرساز FMI و نحوه اندازه‌گیری آن [۷]



شکل ۳- صفحات برخوردی با دیواره چاه (شکستگی‌ها یا لایه‌بندی) در نمودارهای تصویری به صورت منحنی‌های سینوسی دیده می‌شوند [۵]

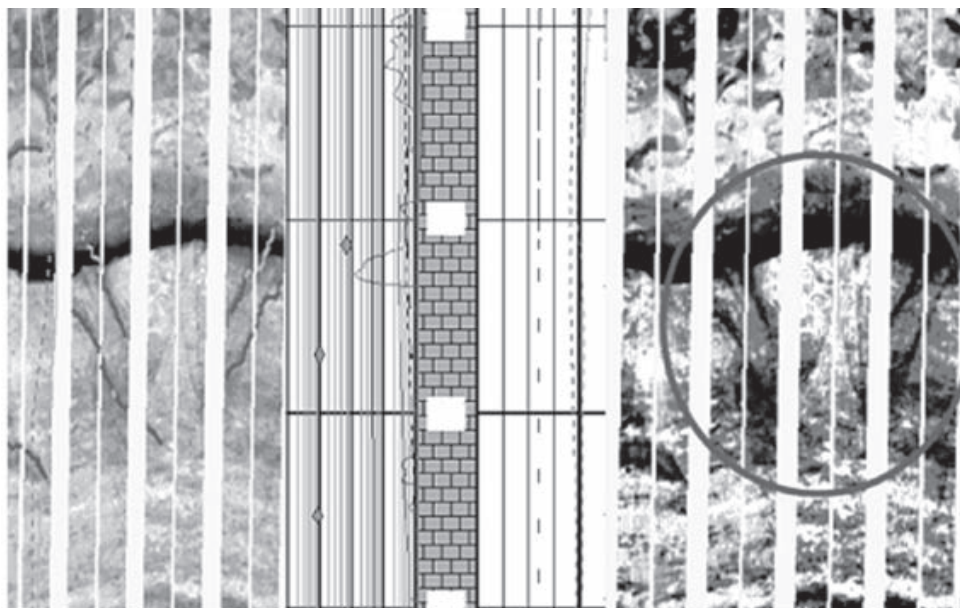
تورس و همکاران روشی مبتنی بر تابع تبدیل هاف برای شناسایی شکستگی‌ها پیشنهاد کردند [۸]. هال و همکاران (۱۹۹۶) از روش هاف در فضای سه بعدی برای این منظور استفاده نمودند [۹]. یو و باویلر (۱۹۹۸) روشی مبتنی بر تبدیل فوریه و تعیین لبه جهت جداسازی صفحات لایه‌بندی و ناهمگن از یکدیگر ارائه کردند [۱۰]. در حالی که دو روش اول نتوانست جواب مناسبی برای تفسیر این نمودارها ارائه دهد [۱۰]، روش سوم نیز جامع نبوده و (به گفته مفسرین) در مخارن کربناته ضعیف عمل می‌کند.

برای بسیاری از شرکت‌های نفتی، پردازش و تفسیر این نمودارها اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و در بعضی مواقع تفسیر این نمودارها به دلیل اشتباهات انسانی و نبود تجربه کافی با خطا همراه است.

امروزه نرم‌افزارهای زیادی برای نمایش و پردازش نمودارهای تصویری وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان صفحات شکستگی را در داخل این نمودارها، به صورت دستی و در برخی نرم‌افزارها به صورت خودکار مشخص نمود. نرم‌افزار Geolog از روش یو و همکاران (۱۹۹۸) برای شناسایی شکستگی‌ها استفاده می‌کند. در

در مقابل، شکستگی‌ها صفحات لایه‌بندی را قطع کرده و با توجه به نیروهای تکنونیکي وارد شده بر حوزه نفتی، می‌توانند دارای جهت‌گیری و شیب‌های متفاوتی باشند. شکستگی‌های باز اغلب با موادی مانند گل حفاری، رس و یا پیریت پر می‌شود که باعث هادی‌تر شدن آنها نسبت به محیط اطراف می‌گردد [۵]. به همین دلیل این پدیده‌ها، در تصویر حاصل از دستگاه‌های الکتریکی به دلیل هادی بودن، و در دستگاه‌های فراصوتی به دلیل سرعت پایین مواد پرکننده، نسبت به محیط اطراف خود رنگی تیره‌تر دارند. در اکثر موارد، شکستگی‌های باز به دلیل بازشدگی با ضخامت کم و یا پرشدگی بخشی از آن، در نمودارهای تصویری به صورت منحنی سینوسی کامل دیده نمی‌شود (شکل ۴). در مقابل، شکستگی‌های سیمانی‌شده به صورت پدیده‌های ریز یا بسیار ریز، کشیده، تقریباً مستقیم و به صورت پدیده‌های مقاوم (سفید رنگ) در نمودار تصویری دیده می‌شوند [۵].

آنالیز نمودار تصویری با شروع استفاده آن در سال ۱۹۸۶، آغاز گردید. از همان زمان مطالعات زیادی جهت شناسایی شکستگی‌ها بر روی این لاگ آغاز شد. در سال ۱۹۹۰،



شکل ۴- حذف بخشی از شکستگی به دلیل پرشدگی با مواد نارسانا [۶]

مبانی روش‌ها

تصویر دیجیتال، ماتریسی با ابعاد مشخص است که مطابق شکل ۵ مقدار رنگ هر عنصر (پیکسل) با یک مقدار گسسته نشان داده می‌شود [۱۱]. در مطالعه حاضر، از روش‌های پردازش و آنالیز تصویر برای استخراج نقاط شکستگی و همچنین الگوریتم ژنتیک برای شناسایی پارامترهای مربوط به شکستگی استفاده می‌گردد. در ادامه مبانی روش‌ها به صورت مختصر شرح داده می‌شود.

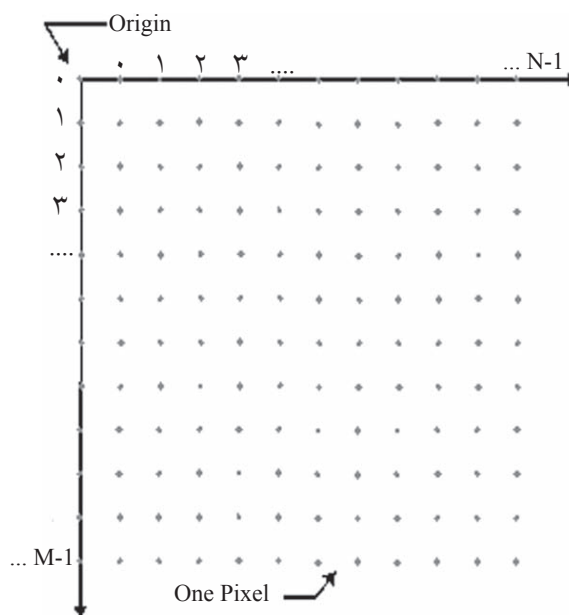
طبقه‌بندی نقاط منحنی

به منظور جداسازی نقاط منحنی از غیر منحنی از روش استیجر^۱ استفاده می‌شود [۱۲]. طبق تعریف استیجر، می‌توان ساختارهای منحنی^۲ شکل موجود در تصاویر دوبعدی را با بردارهای عمود بر منحنی مدل کرد. این بردارها در جهتی هستند که مشتق اول در آن جهت به سمت صفر شدن میل می‌کند و مشتق جهتی دوم دارای مقدار مطلق بالایی می‌باشد [۱۲]. با توجه به تعریف بالا و خصوصیت شکستگی در نمودار تصویری، می‌توان شکستگی‌ها را به عنوان نقاط منحنی در نظر گرفت. در این مقاله مسیر عمود بر منحنی با $n(t)$ نمایش داده می‌شود. شکل ۶ یک منحنی سینوسی همراه با بردارهای عمود بر هر نقطه را نشان می‌دهد.

این روش، شیب و امتداد شکستگی‌ها تعیین نمی‌گردد و تنها وجود شکستگی و تراکم آن مشخص می‌شود.

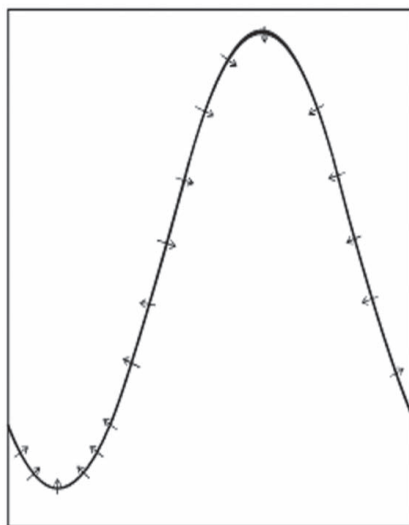
هدف از مطالعه حاضر، معرفی و به‌کارگیری روش‌های پردازش تصویر و الگوریتم ژنتیک، جهت پیدا کردن شکستگی‌ها از روی نمودارهای تصویری می‌باشد. در این روش، ابتدا با استفاده از یک روش طبقه‌بندی، نقاط مربوط به شکستگی از داخل تصویر استخراج می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعداد، شیب، آزیموت و موقعیت عمقی شکستگی‌ها در نمودار تصویری تعیین می‌گردد. به منظور بررسی دقت الگوریتم پیشنهادی، بخشی از دو نمودار تصویری الکتریکی مربوط به دو چاه از میدین جنوب ایران استفاده شده است.

در این مقاله از داده‌های ۱۰ متر این چاه‌ها استفاده گردیده که چاه شماره یک مربوط به دستگاه FMI و چاه شماره دو مربوط به دستگاه FMS می‌باشد. نتایج حاصل از اعمال این روش بر روی چاه‌های مورد اشاره، حاکی از دقت قابل قبول الگوریتم پیشنهادی است، به نحوی که روش پیشنهادی ضمن شناسایی مناسب شکستگی‌ها، حساسیت بسیار کمی نسبت به وجود نویز در تصویر دارد.



شکل ۵- نمایش تصویر رقمی به صورت یک ماتریس [۱۱]

1. Steger
2. Curve



شکل ۶- منحنی سینوس و بردارهای عمود بر هر نقطه از منحنی

بود. مقدار ویژه ماکزیمم ماتریس هسین، به عنوان قدرت منحنی^۴ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک ابزاری است که توسط آن ماشین قادر خواهد بود مکانیزم انتخاب طبیعی را شبیه‌سازی کند. این عمل با جستجو در فضای مسأله جهت یافتن جواب برتر و نه الزاماً جواب بهینه صورت می‌گیرد. در این الگوریتم، ابتدا باید راه‌حل‌های مختلف مسأله به صورت جمعیتی از کروموزوم‌ها نشان داده شود. هر کروموزوم نشان‌دهنده یک جواب مسأله است. در واقع هدف الگوریتم، دستیابی به کروموزوم‌های بهینه (جواب‌ها) از طریق تولید مثل بهترین کروموزوم‌ها در هر نسل است. کروموزوم‌ها اغلب به صورت یک رشته از صفر و یک (مقادیر باینری) نمایش می‌یابند که هر بیت از این رشته می‌تواند نمایشگر یک ژن باشد. کد باینری^۵ به عنوان یکی از کاربردی‌ترین کدهای الگوریتم ژنتیک محسوب می‌شود. پس از این کار باید معیاری برای تشخیص جواب‌های بهینه یا ارزیابی بهترین کروموزوم‌ها انتخاب شود. این معیار اغلب به صورت یک تابع ریاضی است که بر روی کروموزوم‌ها اعمال می‌گردد و تابع هدف یا تابع بهینگی نامیده می‌شود.

یک پیکسل در مختصات دارای مرز مربعی اول جهتی $n(t)$ پیکسلی در طول و در محدوده مرزی خود به سمت صفر رود، به عنوان یک نقطه منحنی در تصویر مشخص می‌گردد. بردار عمود بر منحنی را می‌توان از طریق محاسبه بردار ویژه^۱ مربوط به مقدار ویژه^۲ ماکزیمم ماتریس هسین^۳ به دست آورد.

$$H = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این مقاله بردار ویژه با (n_x, n_y) نمایش داده می‌شود. نقاط منحنی با توجه به معادله زیر (معادله تیلور) به دست می‌آید.

$$z(x, y) = I(x, y) + (x \times y) \left(\frac{I_x}{I_y} \right) + \frac{1}{2} (x \times y) H \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

در معادله بالا $z(x, y)$ منحنی مورد نظر را نشان می‌دهد. با محاسبه مشتق $z(x, y)$ و قرار دادن (tn_x, tn_y) در معادله و حل آن نسبت به t ، معادله زیر به دست می‌آید:

$$t = - \frac{n_x I_x + n_y I_y}{n_x^2 I_{xx} + 2n_x n_y I_{xy} + n_y^2 I_{yy}} \quad (4)$$

بنابراین، بازه ماکزیمم یا می‌نیمم، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(P_x, P_y) = (tn_x, tn_y) \quad (5)$$

پس، (x_p, y_p) به عنوان نقطه منحنی در نظر گرفته می‌شود،

در صورتی که (P_x, P_y) در داخل مرز مربعی آن نقطه قرار

گرفته باشد. یعنی اگر $\left(\left[-\frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \right], \left[-\frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \right] \right) \in (P_x, P_y)$

باشد، در این صورت نقطه (x, y) ، نقطه منحنی خواهد

1. Eigenvector
2. Eigenvalue
3. Hessian Matrix
4. Curve Strength
5. Binary Code

اول، شامل استخراج نقاط مربوط به شکستگی‌ها و مرحله دوم، تخمین مدل سینوسی مناسب بر روی نقاط استخراج شده می‌باشد. در ادامه هر یک از مراحل به اختصار توضیح داده می‌شود.

طبقه‌بندی نقاط

در این مرحله، تصویر به دو گروه نقاط مربوط به شکستگی و نقاط غیرشکستگی طبقه‌بندی می‌شود. برای طبقه‌بندی از سه ویژگی ذیل استفاده می‌شود.

- استفاده از پارامتر نقطه منحنی: در این بخش از روش استیجر برای طبقه‌بندی نقاط منحنی و غیر منحنی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، تمام شکستگی‌ها به عنوان نقاط منحنی محسوب می‌شوند. شکل ۷ نتیجه حاصل از این روش را برای $1/5$ متر از یکی از چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل وجود نویز زیاد در تصاویر، این روش نمی‌تواند به تنهایی نقاط مرتبط با شکستگی را از دیگر نقاط موجود در تصاویر جدا کند. در شکل ۷-ب، نقاط منحنی به رنگ سیاه و دیگر نقاط به رنگ سفید نمایش داده شده است.

- قدرت منحنی: همان‌طور که قبلاً ذکر شد، به دلیل وجود نویز زیاد در نمودارهای تصویری، تنها استفاده از روش استیجر نمی‌تواند شکستگی‌ها را از دیگر نقاط جدا کند.

یکی دیگر از ویژگی‌های مورد استفاده برای استخراج شکستگی، قدرت منحنی می‌باشد. قدرت منحنی، مقدار ویژه ماکزیمم ماتریس هسین برای هر نقطه است. شکستگی‌ها به دلیل تغییرات سریع مقدار شدت رنگ، دارای مقدار ویژه ماکزیمم بالاتری نسبت به اطراف خود هستند. شکل ۸ تصویر حاصل از مقدار ویژه ماکزیمم مربوط به شکل ۷-الف را نشان می‌دهد. در شکل ۸، مقادیر بالای مقدار ویژه، به رنگ روشن و مقادیر پایین با رنگی تیره‌تر نمایش داده شده است.

این دو کار در واقع مراحل آماده‌سازی جهت اجرای الگوریتم ژنتیک است. پس از انجام این دو کار یک جمعیت ابتدایی (نسل اولیه) از راه‌حل‌های ممکن ایجاد می‌گردد. برای شروع الگوریتم، این نسل اولیه باید تولید مثل کند. تولید مثل در سه مرحله انجام می‌گیرد. مرحله اول انتخاب^۱ است. در این مرحله بهترین کروموزوم‌ها (بر اساس تابع بهینگی) برای تولید مثل انتخاب می‌شوند.

پس از مرحله انتخاب، نوبت به تولید مثل کروموزوم‌های انتخاب شده می‌رسد. این کار توسط دو عملگر ادغام^۲ و جهش^۳ انجام می‌پذیرد. در مرحله ادغام، کروموزوم‌های انتخاب شده به تصادف با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا کروموزوم‌های جدیدی را برای نسل بعدی تولید کنند. در مرحله جهش مقدار بعضی از ژن‌ها به تصادف عوض می‌شود [۱۳].

پیشرفت قدم به قدم الگوریتم را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۳]:

- شروع الگوریتم با تولید یک جمعیت اولیه متشکل از X کروموزوم تصادفی که هر کروموزوم طولی به اندازه n ژن دارد.
- محاسبه برازندگی^۴ برای هر کروموزوم (توسط تابع ارزیابی^۵).

- انتخاب دو کروموزوم بر اساس بالاتر بودن تناسب آنها (به عبارت دیگر انتخاب والدین توسط تابع انتخاب) جهت تولید جمعیت بهتر و ارسال به استخر تولید مثل.

- اعمال عملگر ادغام و تولد بچه‌ها از والدین.

- اعمال عملگر جهش با احتمال P_m برای هر بیت.

- محاسبه برازندگی نسل جدید.

- تکرار این چرخه تا زمانی که معیارهای توقف الگوریتم برآورده شوند.

شناسایی شکستگی‌ها به روش پیشنهادی

در این بخش، چگونگی تلفیق روش‌های پردازش تصویر و الگوریتم ژنتیک جهت شناسایی شکستگی‌ها از روی نمودارهای تصویری ذکر می‌گردد. این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و اجرا شده است. روش پیشنهادی در این پژوهش، از دو مرحله تشکیل شده است. مرحله

1. Selection
2. Cross Over
3. Mutation
4. Fitness
5. Evaluation Function

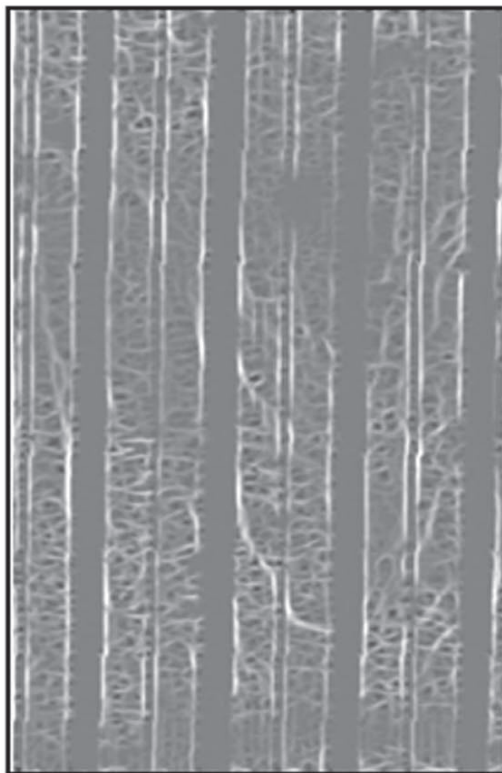


ب



الف

شکل ۷- الف- نمودار تصویری مربوط به ۱/۵ متر از چاه مورد مطالعه، ب) تصویر حاصل از پارامتر نقطه منحنی (مقیاس تصویر ۱/۱۵)



شکل ۸- تصویر حاصل از قدرت منحنی در هر نقطه مربوط به شکل (۷-الف)؛ شکستگی‌ها به رنگ روشن مشاهده می‌شود. (مقیاس تصویر ۱/۱۵)

نحوی طراحی می‌شود که تعداد منحنی‌های سینوسی و پارامترهای مربوط به آنها به صورت همزمان تعیین گردد. شکل ۱۰ ساختار پیشنهادی برای یک کروموزوم نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اولین ژن، تعیین کننده تعداد سینوس‌های پیشنهادی خواهد بود (n). بر این اساس تعداد ($3n$) ژن جدید تولید شده و مقادیر آنها به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. به صورت مشابه یک جمعیت از کروموزوم‌ها ایجاد می‌شود. ساختار تشکیل شده برای بررسی سطح کیفیت به محیط خارجی ارسال شده و کیفیت آن سنجیده می‌شود.

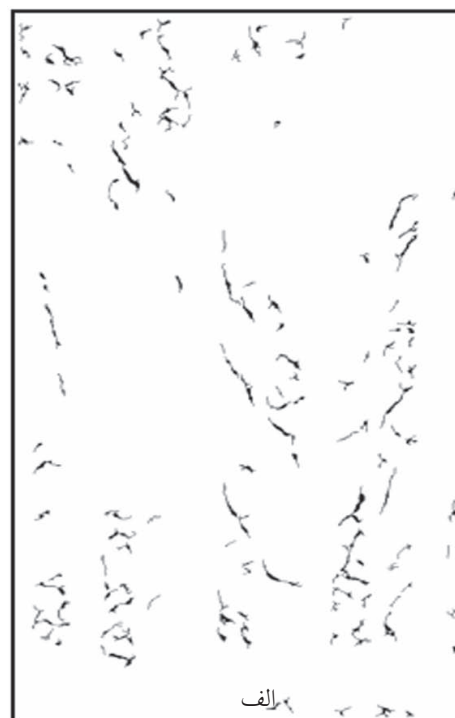
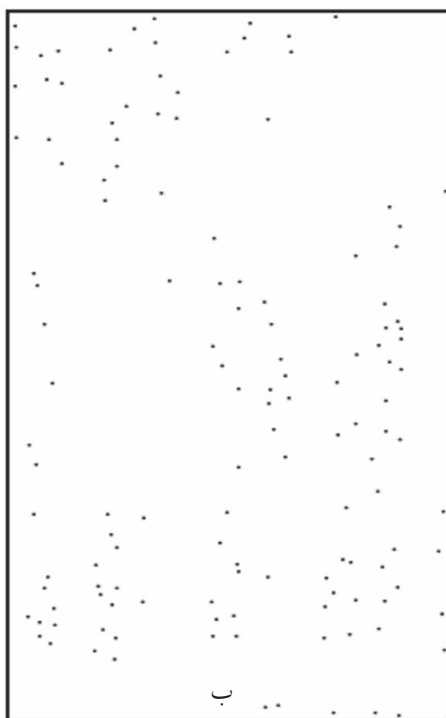
برای این منظور، هر کروموزوم آشکارسازی شده و منحنی هر سینوس معین می‌گردد. سپس فاصله هر یک از داده‌ها از تمام منحنی‌ها سنجیده می‌شود. در صورتی که کمترین میزان فاصله (d) از یک حد آستانه کمتر باشد، داده مورد نظر با تقریب قابل قبولی، حداقل به یکی از منحنی‌ها تطبیق یافته و ضریب تطبیق آن (β) برابر یک فرض می‌شود. در غیر این صورت، داده مورد نظر به هیچ یک از منحنی‌ها تعلق نداشته و ضریب تطبیق برابر صفر فرض می‌گردد.

- جهت بردار ویژه: پارامتر بردار ویژه، برای حذف ویژگی‌هایی که شیب نزدیک به 90° درجه دارند، استفاده می‌شود. به این منظور از نقاطی با جهت بردار ویژه افقی صرف‌نظر می‌گردد. با این کار مطمئن می‌شویم که در تصویر نمودارهای الکتریکی، اثر ابتدا و انتهای هر بالشتک که تغییرات شدت رنگ بالایی دارد و نیز شکستگی‌های القایی قائم که در حین حفاری ایجاد شده است، حذف می‌شوند.

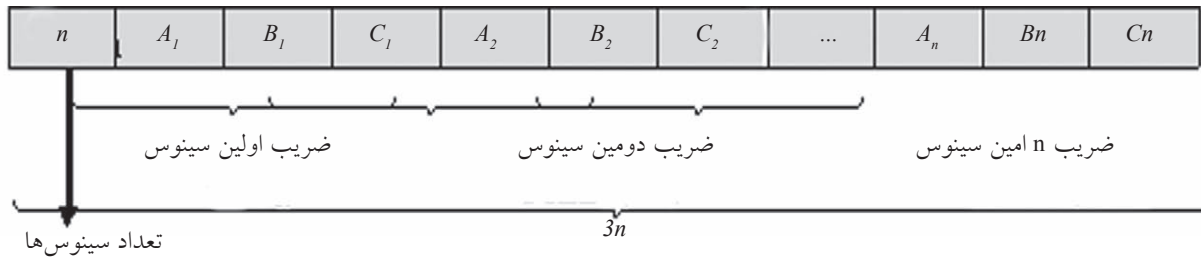
پس از اعمال این سه ویژگی، تصویری دودویی (باینری) که نقاط شامل عدد یک، مربوط به شکستگی‌ها هستند، حاصل می‌شود. شکل ۹-الف نتیجه حاصل از استخراج ویژگی برای شکل ۷-الف را نشان می‌دهد. در این شکل، نقاط مربوط به شکستگی به رنگ سیاه نمایش داده شده است.

تخمین مدل سینوسی

در این پژوهش، پیدا کردن شکستگی‌ها در نمودارهای تصویری با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد. برای این منظور از تصویر دودویی حاصل از بخش اول استفاده می‌شود. ساختار کروموزوم الگوریتم ژنتیک به



شکل ۹-الف- نتیجه حاصل از استخراج ویژگی برای شکل (۷-الف)، ب) نتیجه حاصل از خوشه‌بندی نقاط حاصل از استخراج ویژگی.



شکل ۱۰- ساختار پیشنهادی برای یک کروموزوم نمونه

میانگین مختصات مربوط به هر خوشه را نشان می‌دهد. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

برای بررسی صحت روش، نمودار تصویری بخشی از دو چاه مربوط به دو میدان هیدروکربوری در جنوب ایران مورد استفاده قرار گرفت. نمودارهای تصویری چاه شماره یک و دو به ترتیب مربوط به داده‌های دستگاه تصویرساز FMI و FMS می‌باشد. دلیل این انتخاب، ارزیابی دقیق روش معرفی شده در تشخیص شکستگی می‌باشد. در این پژوهش از ده متر چاه‌های مربوطه استفاده شد. بخش مورد بررسی برای چاه شماره یک دارای شکستگی‌های باز بوده، به طوری که بخشی از آنها پیوسته و بخشی دیگر ناپیوسته هستند. چاه شماره دو نیز دارای شکستگی‌های باز است که تمامی آنها به صورت ناپیوسته و برخی از این شکستگی‌ها زیگزاگ مانند می‌باشند. برای شناسایی شکستگی‌ها، در مرحله اول نقاط مربوط به شکستگی استخراج شد (شکل ۹-الف). سپس خوشه‌بندی داده‌ها انجام گرفت (شکل ۹-ب). برای مقطع عمقی نمایش داده شده در شکل ۹ تعداد نقاط استخراج شده برابر ۴۸۹۰ داده می‌باشد که با خوشه‌بندی، این نقاط به ۱۱۴ داده کاهش پیدا کرد. برای تخمین منحنی‌های سینوسی، ابتدا الگوریتم ژنتیک بر روی داده‌های خوشه‌بندی شده، اجرا شد. در قدم بعدی، تخمین منحنی‌های سینوسی بر روی داده‌های استخراج شده (خوشه‌بندی نشده) صورت گرفت. کروموزوم اولیه در این بخش، نتیجه حاصل از تخمین منحنی سینوسی بر روی داده‌های خوشه‌بندی شده می‌باشد.

حدآستانه از تقسیم طول تصویر به مجموع تعداد اکستریم‌های مدل‌های سینوسی تخمینی به دست می‌آید. با توجه به تعریف ذکر شده، مقدار حدآستانه متفاوت بوده و تابعی از تعداد منحنی‌های تخمینی است. به طوری که با افزایش تعداد سینوس‌های تخمینی، حدآستانه کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. با انجام این عمل برای تمام داده‌ها، برآزش کروموزوم اولیه با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (6)$$

$$m = \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (7)$$

$$d_{tot} = \sum_{i=1}^n d_i \beta_i \quad (8)$$

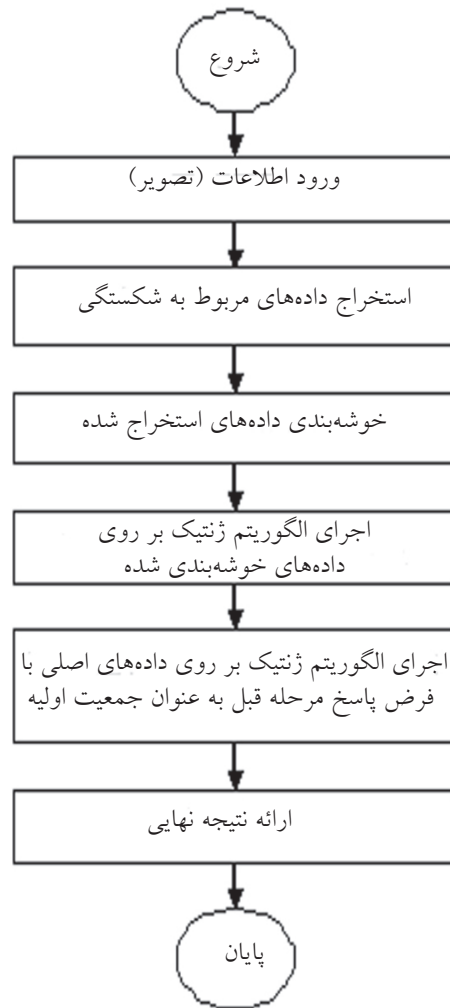
$$Fit = e^{(n-m)} + d_{tot} \quad (9)$$

در معادلات بالا، (x_i, y_i) مختصات نقطه مورد بررسی، (x_c, y_c) نزدیک‌ترین نقطه روی منحنی سینوسی به داده مورد بررسی، d_{tot} مجموع فواصل نقاط شمارش شده و m نقاط شمارش شده می‌باشد. هدف مورد نظر در این مسأله، کمینه کردن تابع برآزش (Fit) می‌باشد. پس از تعیین برآزش تمام کروموزوم‌ها، عملگرهای انتخاب، ادغام و جهش انجام گرفته و ساختار جدید ایجاد می‌شود. با تکرار این مراحل، پاسخ بهینه به دست می‌آید.

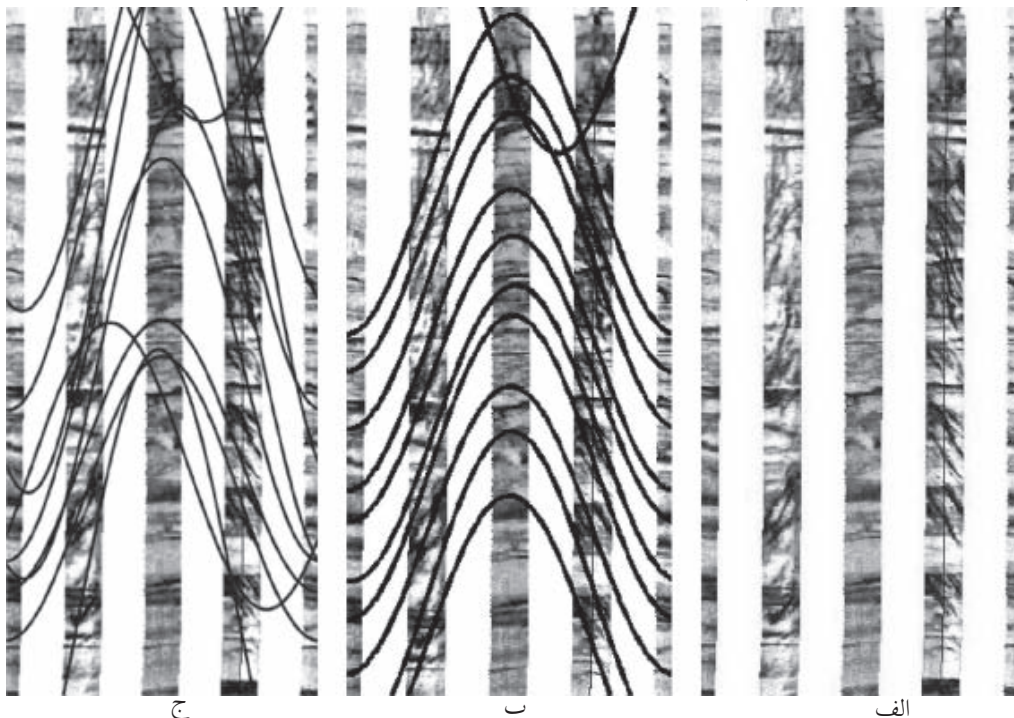
به دلیل زیاد بودن داده‌های استخراج شده به عنوان نقاط شکستگی، برای افزایش سرعت الگوریتم، روش پیشنهادی در دو مرحله اجرا می‌شود. در مرحله اول، داده‌های خروجی حاصل از خوشه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش خوشه‌بندی، نقاطی که در همسایگی یکدیگر قرار دارند در یک گروه قرار می‌گیرند [۱۴]. خروجی خوشه‌بندی شامل میانگین مختصات، میانگین شیب و نیز تعداد نقاط موجود در هر خوشه می‌باشد. شکل ۹-ب

شکل ۱۲، مقایسه بین تفسیر دستی و روش پیشنهادی بر روی ۱/۵ متر از یکی از چاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج بین تفسیر دستی و روش پیشنهادی، به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. استریونت و رز دیاگرام شکستگی‌های تفسیرشده به صورت دستی و روش پیشنهادی برای دو چاه مورد بررسی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

به دلیل تغییرات زیاد در شیب شکستگی‌ها، میانگین شیب در جدول ۱ ذکر نشده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این روش توانسته در هر دو چاه مورد بررسی به خوبی شکستگی‌ها را شناسایی کند و پارامترهای مربوط به آنها را تخمین بزند. میزان خطای میانگین در تعیین تعداد، شیب و آزیموت شکستگی‌ها برای نمودار تصویری چاه شماره یک به ترتیب ۱۳٪، ۲۸٪ و ۱۲٪ و برای نمودار تصویری چاه شماره دو به ترتیب ۱۹٪، ۲۴٪ و ۱۶٪ به دست آمده است. مقدار خطای تعداد شکستگی و آزیموت به ترتیب از مجموع اختلاف نسبی بین تعداد شکستگی‌ها و میانگین آزیموت حاصل از تفسیر و روش پیشنهادی در هر مقطع عمقی محاسبه می‌شود.



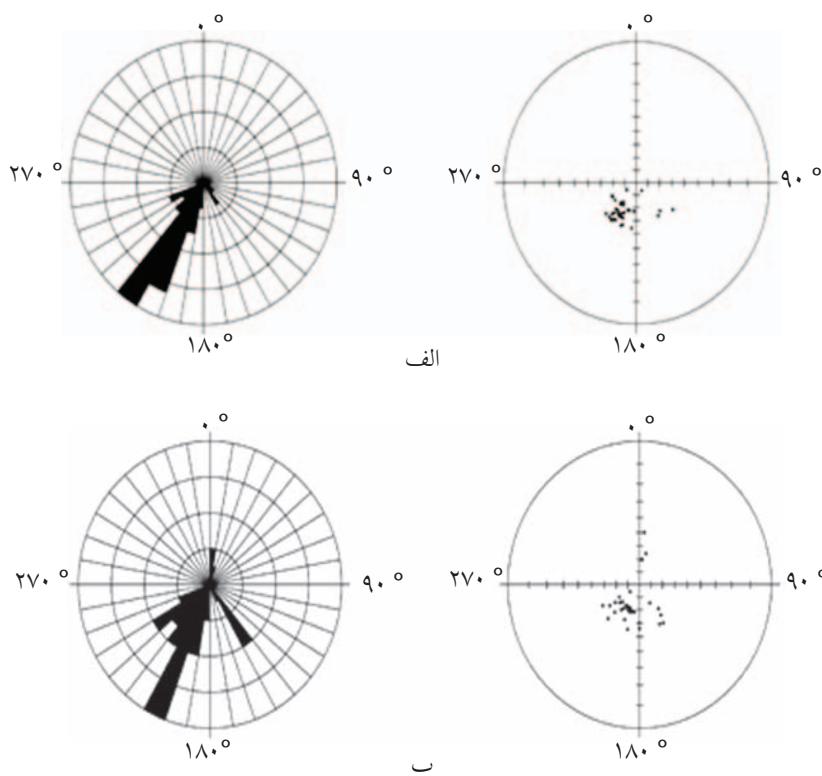
شکل ۱۱- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



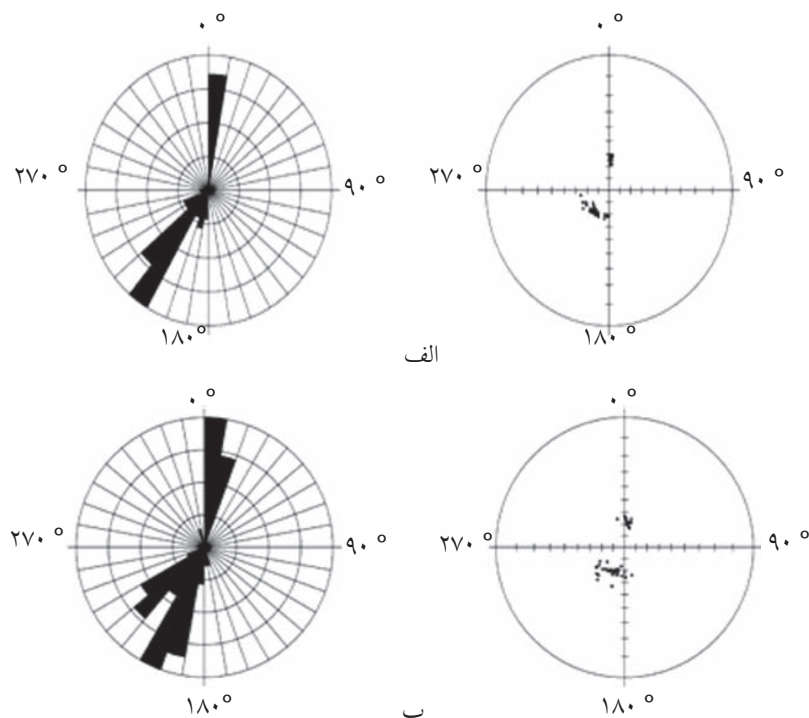
شکل ۱۲- الف- نمودار تصویری چهار بالشتکی مربوط به ۱/۵ متر از چاه مورد مطالعه، ب) نتیجه حاصل از تفسیر دستی و ج) نتیجه حاصل از روش پیشنهادی (مقیاس تصویر ۱/۵)

جدول ۱- مقایسه بین تفسیر دستی و روش پیشنهادی

تعداد شکستگی‌ها	میانگین آزمون شکستگی‌ها				مقطع عمقی (متر)	شماره چاه	
	روش پیشنهادی	دستی		روش پیشنهادی			
		(دسته اول)	(دسته دوم)	(دسته اول)			(دسته دوم)
دستی	روش پیشنهادی	(دسته اول)	(دسته دوم)	(دسته اول)	(دسته دوم)		
۷	۸	۱۴۱	۲۲۲	۱۴۷	۲۳۵	۰-۲	
۷	۹	۱۵۳	۲۳۲	۱۴۲	۲۴۰	۲-۴	
۶	۶	--	۲۱۲	--	۲۰۵	۴-۶	
۱۷	۱۵	--	۲۰۲	۱۰	۱۹۴	۶-۸	
۱	۱	--	۲۳۸	--	۲۴۰	۸-۱۰	
۱۲	۱۰	--	۳	--	۱۰	۰-۲	
۰	۰	--	--	--	--	۲-۴	
۹	۸	۲۰۴	--	۱۹۰	--	۴-۶	
۱۷	۱۲	۲۱۰	--	۲۰۵	--	۶-۸	
۱۴	۱۲	۲۲۰	--	۲۳۷	۱۵	۸-۱۰	



شکل ۱۳ الف- استریونت و رز دیاگرام مربوط به تفسیر دستی (چاه شماره یک)، ب- استریونت و رز دیاگرام حاصل از روش پیشنهادی



شکل ۱۴ الف- استریونوت و رز دیاگرام مربوط به تفسیر دستی (چاه شماره دو)، ب- استریونوت و رز دیاگرام حاصل از روش پیشنهادی

یک بیشتر است. این افزایش خطا اولاً به دلیل پوشش کمتر (نصف) FMS نسبت به نمودار FMI است. پوشش کمتر دستگاه باعث می‌شود که داده‌های استخراج شده، به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کند و این کاهش داده‌ها، تخمین صحیح منحنی سینوس را با خطا مواجه می‌کند. ثانیاً، برخی از شکستگی‌های موجود در چاه شماره دو، صفحه‌ای کامل نبوده و به شکل زیگزاگ دیده می‌شوند. دلیل این پدیده ناشی از تغییرات سرعت نمونه‌گیری دستگاه، استوانه‌ای نبودن چاه و صفحه‌ای نبودن (زیگ-زاگ بودن) شکستگی می‌باشد. بنابراین، بر روی این نوع شکستگی‌ها نمی‌توان دقیقاً منحنی سینوسی تطبیق داد.

نتیجه‌گیری

نمودارهای تصویری نقش مهمی در مطالعه شکستگی‌های مخازن هیدروکربوری داشته و اطلاعات دقیقی در مورد شکستگی‌های اطراف چاه در اختیار ما قرار می‌دهد. در این مقاله، روش جدیدی بر اساس ترکیب تکنیک‌های پردازش تصویر و الگوریتم ژنتیک به منظور شناسایی شکستگی‌ها از روی نمودارهای تصویری ارائه شد.

روش پیشنهادی برای چاه شماره یک و در مقطع عمقی ۸-۶ متری، یک دسته شکستگی به تعداد سه و آزمون میانگین ۱۰ درجه و برای چاه شماره دو و در مقطع عمقی ۱۰-۸ متری، یک دسته شکستگی به تعداد دو و آزمون میانگین ۱۵ درجه تخمین زده است که در تفسیر دستی مشاهده نشده است. دو دلیل برای وجود این خطا می‌توان ذکر کرد. دلیل اول، وجود نویز بسیار زیاد در نمودارهای تصویری است. سازندهای مختلف زمین‌شناسی دارای ویژگی‌های مختلف و بسیار پیچیده از جمله ویژگی‌های تکتونیک و دیاژنتیک هستند که این ویژگی‌ها در سازندهای کربناته بیشتر به چشم می‌خورد. این پدیده‌ها باعث می‌شود که تصاویر حاصل از نمودارهای تصویری نویز زیادی داشته باشد. دلیل دوم این خطا، تراکم بسیار زیاد شکستگی در مقطع عمقی مربوطه است. با افزایش شکستگی‌ها، تعداد داده‌های استخراج شده، افزایش پیدا می‌کند. به دلیل این تراکم، اتصال صحیح نقاطی که مربوط به یک شکستگی هستند، با خطا مواجه است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای محاسبه در تعداد و آزمون شکستگی برای چاه شماره دو نسبت به چاه شماره

با شکستگی باز و نیمه‌بسته اعمال و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است. با توجه به اینکه در ایران نرم‌افزاری جامع برای شناسایی خودکار شکستگی‌ها و پارامترهای مربوط به آن از روی نمودار تصویری تهیه نشده است، روش پیشنهادی می‌تواند راهکار مناسبی برای شناسایی شکستگی‌ها در نمودارهای تصویری الکتریکی باشد.

روش پیشنهادی با دقت قابل قبولی شکستگی‌ها را در دو نوع نمودار تصویری الکتریکی *FMI* و *FMS* شناسایی و پارامترهای شیب، آزمون و موقعیت قرارگیری مربوط به آن را تعیین می‌نماید. این روش سطح دقت تفسیر نمودارهای تصویری را افزایش داده و در کار تفسیر به مفسر کمک زیادی می‌نماید. روش اشاره شده بر روی چاه‌هایی

منابع

- [1]. Haller D., and Porturas F., "How to characterize fractures in reservoirs using borehole and core images: case studies, Geological society", Special Publications, London, vol. 136, pp. 249–259, 1998.
- [2]. Khoshbakht F., Memarian H., Azizzadeh M., Nourozi G., and Moallemi A., "Ability of FMS in detecting fractures and other geological features of Asmari fractured carbonate reservoir", 4th North African/Mediterranean Petroleum and Geosciences Conference & Exhibition Tunis, Tunisia, pp. 1-7, 2009.
- [3]. Plumb R. A., and Luthi S. M., "Analysis of Borehole images and their application to geologic modeling of an Eolian reservoir", SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, pp. 505-514, 1986.
- [4]. Tingay M., Reinecker J., and Müller B., "Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs", World Stress Map Project Stress Analysis Guidelines, pp. 1-8, 2008.
- [5]. Serra O., *Formation MicroScanner Image Interpretation*, Schlumberger Education Services, 1989.
- [6]. Serra O., and Serra L., *Well Logging- Data Acquisition and Application*, Seralog, 2004.
- [7]. Schlumberger, Borehole geology, geomechanics and 3D reservoir modeling (FMI), SMP-5822, 2002.
- [8]. Torres D., Strickland R., and Gianzero M., "A new approach to determining dip and strike using borehole images", SPWLA 31th Annual Logging Symposium, Lafayette, Louisiana, pp. 1–20, 1990.
- [9]. Hall J., Ponzi M., Gonfalini M., and Maletti G., "Automatic Extraction and Characterization of Geological Features and Textures from Borehole Images and Core Photographs", SPWLA 37th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, pp. 1-13, 1996.
- [10]. Ye Sh. J., and Baviler P., "Automated fracture detection on high resolution resistivity borehole imagery", SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, Louisiana, pp. 777-785, 1998.
- [11]. Gonzalez R. C., and Woods R. E., *Digital Image Processing 2nd edition*, prentice Hall, Upper saddle River, NJ., 2002.
- [12]. Steger C., *An unbiased detector of curvilinear structures*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998.
- [13]. Goldberg D.E., *Genetic Algorithm in search, optimization and machine learning*, New York: Addison –Wesley, 1989.
- [14]. Haralick R., and Linda G., "Computer and Robot Vision", Vol. 1, New York: Addison-Wesley, 1992.