



مقاله پژوهشی

تعیین احتمال خاستگاه گسل‌ها و شکستگی‌ها در یکی از مخازن نفتی بر مبنای نشانگرهای لرزه‌ای حاصل از مکعب هدایت شیب

امیر طالبی^{۱*}؛ سامیه جنیدی^۲؛ مسعود فریدونی^۲؛ حسین هاشمی شاهدانی^۳؛ غلامرضا شاه علیپور^۲؛ حمید قندهاری^۲

۱- دکترای تخصصی ژئوفیزیک؛ دپارتمان زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، شرکت توسعه پترو ایران

۲- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی؛ دپارتمان زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، شرکت توسعه پترو ایران

۳- دانشیار؛ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.394563.1196

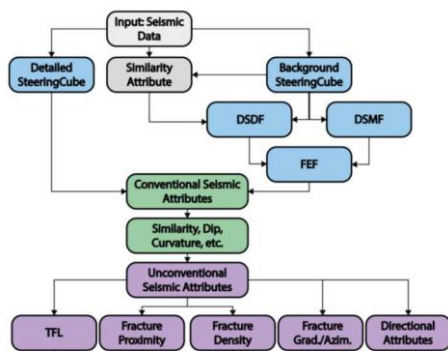
واژگان کلیدی	چکیده
نشانگرهای لرزه‌ای، گسل، شکستگی، نشانگر احتمال گسل نازک، نشانگر احتمال گسل	شناسایی و مطالعه هر چه بیشتر گسل‌ها و شکستگی‌ها در مخازن هیدروکربوری، اهمیت ویژه‌ای در مراحل ازدیاد برداشت و توسعه میادین نفتی دارد. توصیف و ترسیم صحیح گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌تواند امکان اجرای پروژه‌های توسعه‌ای در صنعت نفت را فراهم آورد. یکی از روش‌های توصیف ناپیوستگی در لایه‌ها، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای می‌باشد. در این مطالعه، از الگوریتم توسعه‌یافته توسط هاردپ [۱] و همراه با به‌کارگیری جدیدترین روش‌های نشانگرهای لرزه‌ای در یکی از میادین نفتی ایران استفاده شده است تا توانایی آن در شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این مطالعه برای مخزن نفتی مورد نظر نشان می‌دهد که مکعب نشانگر احتمال گسل نازک (<i>thinned fault likelihood</i>) و همچنین احتمال گسل (<i>fault likelihood</i>) سازگاری خوبی را از لحاظ کیفیت و دقت نمایش ناپیوستگی‌ها فراهم می‌کند. در این راستا استفاده از اطلاعات شیب و آزمون لایه‌ها، نقش مهمی در افزایش دقت تفسیر ناپیوستگی‌ها به‌خصوص شکستگی‌ها دارد. در نهایت، ارزیابی این نشانگرها نشان می‌دهد که امتداد اصلی گسل‌ها و شکستگی‌ها در مخزن مورد مطالعه در راستای شمالی-جنوبی و شمال غربی-جنوب شرقی می‌باشد که با داده‌های نگاره‌های تصویری (نمودارهای رزداپاگرام) در چاه‌های حفاری شده در این میدان مطابقت دارد. بر اساس توزیع چگالی شکستگی‌ها در محل چاه‌های حفاری شده می‌توان نتیجه گرفت که در کنار پدیده‌های دپازنری، شبکه‌های شکستگی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر می‌تواند میزان تولید چاه‌های میدان را کنترل کند.

۱. پیش‌گفتار

مکزیک یافت می‌شود، گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌توانند مزایای اقتصادی و دوام پروژه را افزایش می‌دهد [۳]. با مزایایی که پیشرفت‌های کامپیوتری به ارمغان آورده‌اند، روش‌های جدیدی در دهه اخیر تکامل یافته‌اند که به متخصصین ژئوفیزیک اجازه می‌دهد تا بررسی‌های لرزه‌ای را به روشی قوی‌تر انجام داده و الگوریتم‌های پیشرفته‌تر استخراج گسل را توسعه دهند. گسل‌ها و شکستگی‌ها به‌طور کلی به‌صورت الگوهای بازتابی ناپیوسته بر روی داده‌های لرزه‌ای و به‌صورت خطی، زیرخطی یا منحنی خطی در سه بعد ظاهر می‌شوند. در تفسیر لرزه‌ای، گسل‌ها به‌طور معمول از طریق نشانگرهای

تأثیر گسل‌ها و شکستگی‌ها در صنایع استخراجی مانند صنعت نفت غیرقابل انکار و از اهمیت بالایی برخوردار است. ترسیم صحیح گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌تواند امکان اجرای پروژه‌های توسعه‌ای در صنعت نفت را فراهم آورد. بسته به نوع عملیات، شبکه‌های گسلی و شکستگی می‌توانند برای پروژه‌های توسعه‌ای میدان سودمند باشند [۲]. در صنعت نفت، یک توصیف صحیح می‌تواند اثرات مثبتی داشته باشد. به‌عنوان مثال در مخازن با شکستگی طبیعی مانند مواردی که در

برخوردار می‌باشد. مکعب هدایت شیب یک مکعب لرزه‌ای است که شامل شیب و آزیموت رخدادهای لرزه‌ای در جهت به خط (*inline*) و در جهت عمود به خط (*crossline*) هر نقطه نمونه است. به عبارتی دیگر، در مکعب لرزه‌ای و در یک پنجره تعریف شده تغییرات شیب (جابه‌جایی عمودی هر رد لرزه‌ای نسبت به رد لرزه‌ای اطراف) اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت مکعب هدایت شیب از این طریق محاسبه می‌شود [۱] (شکل ۳).



شکل ۱. الگوریتم پیشنهاد شده توسط هاردپ برای استخراج گسل‌ها و شکستگی‌ها

در شکل ۳ مکعب هدایت شیب برای میدان مورد مطالعه نشان داده شده است (مقادیر قرمز رنگ نشان‌دهنده شیب بیشتر می‌باشند، رنگ قرمز رنگ در سطح مکعب مربوط به نهشته‌های سطحی می‌باشد و ارتباطی با ساختارهای اصلی ندارد). بعد از این مرحله در نرم‌افزار *OpendTect* مکعب هدایت پس‌زمینه (*Background Steering Cube*) و مکعب هدایت جزئیات (*Detailed Steering Cube*) را ایجاد می‌کنیم. مکعب هدایت پس‌زمینه با درجه هموارسازی بیشتر به ما اجازه می‌دهد تا روند کلی شیب در مقیاس بزرگ و بازتاب‌های لرزه‌ای را تعیین کنیم. این مکعب امکان تعیین روند شیب‌های بزرگ را فراهم می‌کند و برای تجزیه و تحلیل بیشتر تفسیر و پردازش ساختاری استفاده می‌شود.

مکعب هدایت جزئیات با درجه هموارسازی متوسط به ما این امکان را می‌دهد تا ویژگی‌های محلی بیشتری را برای فرورفتگی‌های (شیب) محلی بازتابنده‌های لرزه‌ای محاسبه کنیم. این مکعب تغییرات کوچک در بازتابنده لرزه‌ای را حفظ می‌کند و حاوی اطلاعات گسل‌ها یا خمش‌ها از زیرسطح است. از این نشانگر همچنین برای نشانگرهای دقیق‌تری مانند انحنا

لرزه‌ای چندگانه مانند همدوسی، تشابه، واریانس، انحنا، شیب، آزیموت و غیره ردیابی می‌شوند. این نشانگرها به دلیل اینکه بیشتر به تعریف ماهیت هندسی بازتاب‌های لرزه‌ای کمک می‌کنند، اغلب به‌عنوان نشانگرهای هندسی تقسیم‌بندی می‌شوند [۴].

هدف از این مطالعه استفاده از روش توسعه‌یافته توسط هاردپ [۱] و کایم [۵] برای تولید نشانگرهای لرزه‌ای با هدف بهبود شناسایی گسل و شکستگی در یکی از میدان‌های نفتی ایران با به‌کارگیری جدیدترین تکنیک‌های مورد استفاده در نشانگرهای لرزه‌ای است. این روش شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها را بر اساس اطلاعات لرزه‌ای فراهم می‌کند.

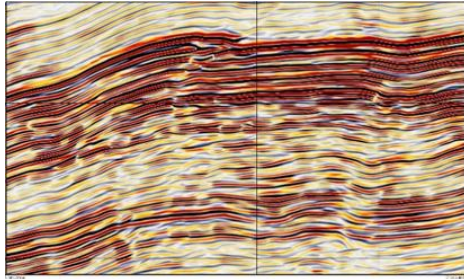
۲. روش تحقیق

در مطالعه حاضر، به‌منظور استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای برای استخراج گسل‌ها و شکستگی‌ها از الگوریتم به‌کاربرده شده توسط هاردپ [۱] استفاده شده است (شکل ۱). این الگوریتم شامل دو جنبه اصلی است: (۱) آماده‌سازی داده‌های لرزه‌ای برای به دست آوردن شیب و آزیموت ساختار کلی و همچنین حذف نوفه به وجود آمده در هنگام داده‌برداری (افزایش کیفیت داده و بهبود نسبت سیگنال به نوفه). (۲) محاسبه نشانگرهای لرزه‌ای به‌منظور شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها. براین اساس، باتوجه به گسل‌ها و شکستگی‌های تفسیر شده به تعیین طول، موقعیت مکانی و جهت‌گیری شکستگی‌ها می‌پردازیم. در این رویکرد، مکعب شیب-آزیموت نقش کلیدی الگوریتم مورد نظر را تشکیل می‌دهد. از این مکعب برای به دست آوردن شیب‌های محلی بازتابنده‌های لرزه‌ای و ناپیوستگی‌های مرتبط استفاده می‌گردد. این مکعب با نام مکعب هدایت شیب (*Dip Steering Cube*) نیز شناخته می‌شود و بر اساس الگوریتم‌های مختلف محاسبه می‌شود.

محاسبه شیب بخش مهمی از الگوریتم مورد نظر می‌باشد زیرا هم بر فیلتر لرزه‌ای پس-برآیناراش و هم بر نتایج نشانگر لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد [۶]، [۷]. شیب‌های لرزه‌ای را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه کرد: مبتنی بر دامنه، فاز، بر اساس دامنه فرکانس [۸].

از نشانگر شیب لرزه‌ای می‌توان در تحلیل نشانگرهای دیگری مانند شباهت استفاده کرد، از این‌رو این مکعب محاسبه‌شده که به‌عنوان مکعب هدایت شیب معروف است از اهمیت ویژه‌ای

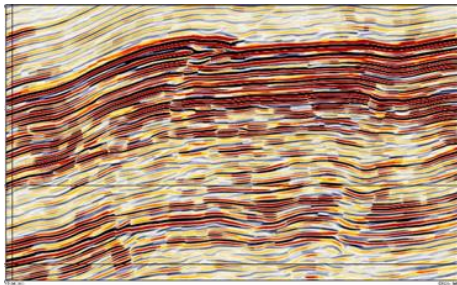
ویژگی‌های ناپیوسته مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها را تا حدود زیادی هموارسازی کند که این بستگی به اندازه زون گسلی دارد [۱۰] در شکل ۴ اعمال این فیلتر بر روی یک خط لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمایش دوبعدی از داده‌های لرزه‌ای بعد از اعمال فیلتر میانه هدایت شیب

• فیلتر انتشار هدایت شیب (*Dip Steering Diffusion Filter*)

این فیلتر باعث ارتقا کیفیت داده‌های لرزه‌ای در مجاورت گسل‌ها و شکستگی‌ها که معمولاً از کیفیت داده کمتری برخوردار می‌باشند، می‌شود. این فیلتر همچنین از مشخصه انتشار نزدیک به گسل استفاده می‌کند و داده‌های لرزه‌ای را حول یک دایره هدایت شیب ارزیابی می‌کند [۱۰] (شکل ۵).

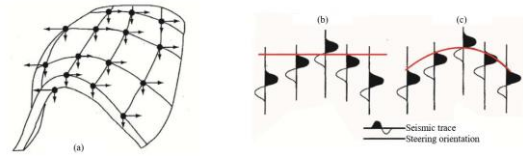


شکل ۵. نمایش دوبعدی از داده‌های لرزه‌ای بعد از اعمال فیلتر میانه انتشار شیب

• فیلتر انتشار هدایت شیب

به‌منظور به دست آوردن فیلترهای ساختاری از ترکیب دو فیلتر منطقی قبلی استفاده می‌شود. فیلتر میانه هدایت شیب و فیلتر انتشار شیب که به‌طور سیستماتیک برای به دست آوردن یک نشانگر لرزه‌ای هندسی به نام فیلتر تقویت گسل به کار می‌روند. نتایج نشان می‌دهد که فیلتر تقویت گسل به‌طور مؤثر ناپیوستگی‌های موجود را نشان می‌دهد که

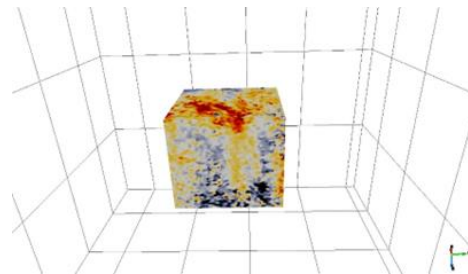
به‌منظور برجسته کردن خمیدگی‌ها در هر افق استفاده می‌شود [۹].



شکل ۲. تصویر شوماتیک سه‌بعدی از مفهوم dip-steering

۱.۲. فیلترهای ساختاری جهت‌دار

در این مرحله خروجی ارتقا یافته‌ای ایجاد می‌شود که با هموارسازی بازتاب‌های لرزه‌ای، تقویت لبه‌های بازتابنده و همچنین حفظ ویژگی‌های ساختاری، امکان تفسیر گسل‌ها و شکستگی‌ها را فراهم می‌کند. بهبود کیفیت سیگنال با تضعیف نوفه تصادفی موجود در سیگنال حاصل می‌شود و با پردازش و شرطی‌سازی داده‌های لرزه‌ای به‌صورت معمول انجام می‌شود [۴] این روش سه مرحله را پیشنهاد می‌کند: (۱) بهبود در پیوستگی جانبی بازتابنده‌های لرزه‌ای با استفاده از فیلتر میانه هدایت شیب (۲) بهبود موقعیت گسل با استفاده از فیلتر انتشار هدایت شیب (۳) ادغام دو مرحله قبلی به‌منظور ایجاد فیلتر تقویت گسل. در ادامه در رابطه با هر یک از این مراحل به‌صورت خلاصه توضیح داده شده است.



شکل ۳. مکعب هدایت شیب در میدان مورد مطالعه

• فیلتر میانه هدایت شیب (*Dip Steering Median Filter*)

(*Median Filter*)

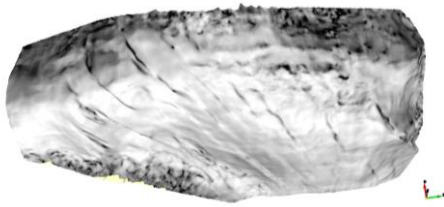
استفاده از فیلترهای مختلف برای حذف نوفه اضافی با حفظ ویژگی‌های هندسی مقاطع لرزه‌ای امری ضروری به شمار می‌آید چرا که نشانگرهای لرزه‌ای در برابر نوفه موجود در داده‌های لرزه‌ای حساس می‌باشند [۱۰] فیلتر میانه هدایت شیب بر روی مکعب هدایت پس‌زمینه که دربرگیرنده روند شیب بزرگ‌مقیاس است اعمال می‌شود. این فیلتر می‌تواند

$$S_{dip} = 1 - \frac{|a_{dip} - b_{dip}|}{|a_{dip}| + |b_{dip}|}$$

$$a_{dip} = \begin{bmatrix} u(x_A, y_A, t_A + t_1) \\ u(x_A, y_A, t_A + t_1 + dt) \\ \dots \\ u(x_A, y_A, t_A + t_2 - dt) \\ u(x_A, y_A, t_A + t_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

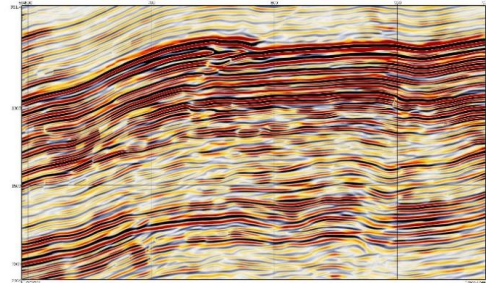
$$b_{dip} = \begin{bmatrix} u(x_B, y_B, t_B + t_1) \\ u(x_B, y_B, t_B + t_1 + dt) \\ \dots \\ u(x_B, y_B, t_B + t_2 - dt) \\ u(x_B, y_B, t_B + t_2) \end{bmatrix}$$

جایی که t_1 زمان شروع پنجره مقایسه است، t_2 زمان توقف نسبی مقایسه پنجره دوم و dt بازه نمونه‌برداری است. زمان‌های هدایت شیب از (x, y, t) به ترتیب با t_A و t_B تعریف می‌شوند و تا رد لرزه‌ای (x_A, y_A) و (x_B, y_B) ارزیابی می‌شوند. ارزیابی نشانگر تشابه به ما امکان را می‌دهد تا ناپیوستگی‌های اصلی را در جهت‌های خاص در میدان موردنظر را با دقت بالاتری تفسیر کنیم. از آنجایی که نشانگر تشابه به نوبه بسیار حساس است، فیلتر تقویت گسل نیز برای این نشانگر استفاده شد که به نوبه خود دقت را بهبود می‌بخشد و پیوستگی گسل‌ها را تشدید می‌کند. بنابراین، برای افزایش پیوستگی، بالا بردن حد تفکیک و استخراج حداکثر اطلاعات از خصوصیات گسل‌ها از یک پنجره نسبتاً بزرگ استفاده شده است. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه نسبتاً پایدار بوده و گسل‌ها و شکستگی‌هایی در مقیاس کوچک وجود دارد می‌توان اثرات ناپیوستگی‌ها را تا حدودی از طریق ویژگی‌های نشانگر تشابه تجزیه و تحلیل کرد [۷]. نشانگر تشابه برای میدان مورد مطالعه و برای افق سروک در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نشانگر تشابه در میدان مورد مطالعه و برای افق سروک

به راحتی در داده‌های لرزه‌ای اصلی اولیه شناسایی نمی‌شوند (شکل ۶).



شکل ۶. نمایش دوبعدی از داده‌های لرزه‌ای بعد از اعمال فیلتر میانه تقویت گسل

۳. بررسی نشانگرهای لرزه‌ای مرسوم در میدان مورد مطالعه

استفاده از ویژگی‌های هندسی به‌طور سیستماتیک برای تصویرسازی از ویژگی‌های پیچیده زمین‌شناسی که در ناحیه مورد مطالعه با آن مواجه می‌شوند، ابزاری مناسب است. نشانگرها به ما اجازه می‌دهند تا دقیق‌ترین ویژگی‌های زمین‌شناسی را استخراج کنیم. نشانگرها مطابق با الگوریتم در نظر گرفته‌شده به ترتیب متوالی اعمال می‌شوند تا شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در میدان مورد مطالعه را افزایش دهند.

۳.۱. نشانگر تشابه

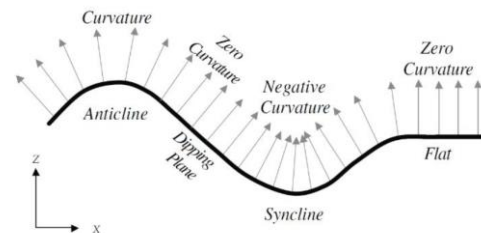
این نشانگر لرزه‌ای در دسته نشانگرهای مرسوم قرار می‌گیرد و همبستگی دو قطعه رد لرزه‌ای را که با فاصله در فضای ابری بین برداری تعریف می‌شود، تجزیه و تحلیل می‌کند [۶]. نشانگر تشابه نوعی انسجام است که دارای مقیاس ۰-۱ است و شباهت ویژگی‌های پیوسته مربوط به تداوم روندهای ساختاری و چینه‌شناسی را نشان می‌دهد [۷]. بنابراین، ویژگی‌های شباهت از نظر ترسیم ناپیوستگی‌ها بسیار مؤثر هستند. این نشانگر امکان تشخیص گسل‌ها و شکستگی‌ها را فراهم می‌کند زیرا آنها به موقعیت جانبی رد لرزه‌ای (سیگنال لرزه‌ای) حساس هستند. نشانگر تشابه با استفاده از فیلتر تقویت گسل به‌عنوان ورودی و بدون استفاده از مکعب هدایت اعمال می‌شود. از نظر تئوری این نشانگر را می‌توان از طریق معادله (۱) زیر به دست آورد.

۳.۲. نشانگر انحنا

این نشانگر همانند تشابه در کلاس نشانگرهای مرسوم قرار می‌گیرد که به‌صورت معمول و سنتی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع مختلف انحنا با مکعب هدایت پس‌زمینه به‌عنوان ورودی ایجاد شده است.

انحنا روشی مؤثر برای توصیف میزان انحراف سطح مورد نظر از خط مستقیم است [۱۱]. همانطور که اشاره شد، گروهی از انحنا به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های زمین‌شناسی به‌عنوان تاقدیس یا قسمت فرادیواره گسل استفاده می‌شود که برای دومی از نشانگر مثبت‌ترین انحنا (*most positive curvature*) استفاده می‌شود.

نشانگر منفی‌ترین انحنا (*most negative curvature*) که ایده‌ای از ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند تاقدیس‌ها یا فرودیواره گسل ارائه می‌دهد (شکل ۸). در این حالت سطح یک بازتابنده به‌عنوان یک سطح درجه دوم برای محاسبه ویژگی انحنا در نظر گرفته می‌شود (معادله (۲) و معادله (۳)).



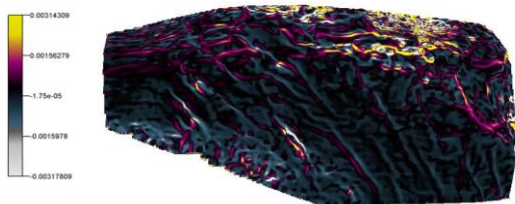
شکل ۸. تصویر شماتیک از قسمت‌های مختلف انحنا در یک افق لرزه‌ای

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad b = \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (3)$$

$$c = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

که در آن p تخمین حجمی شیب درون خطی، q شیب خط متقاطع است و ضرایب $x=y=0$ می‌شوند. نتایج نشان داد که نشانگر مثبت‌ترین انحنا از نظر ترسیم شکستگی در ناحیه مورد مطالعه سودمندترین نشانگر می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹. نشانگر انحنا برای افق سروک در میدان مورد مطالعه

۴. بررسی نشانگرهای لرزه‌ای غیرمرسوم در

میدان مورد مطالعه

۴.۱. نشانگر احتمال گسل

نشانگر احتمال گسل (*Fault Likelihood*) می‌تواند برای استخراج صفحه‌های گسلی و همچنین به‌عنوان ورودی نشانگر احتمال گسل نازک استفاده می‌گردد. به‌طور کلی این نشانگر ویژگی‌های شکستگی با مقیاس بزرگتر را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ توزیع گسل‌ها و شکستگی‌ها برای میدان مورد بررسی و بر روی افق سروک در میدان مورد مطالعه نشان داده شده است [۱].

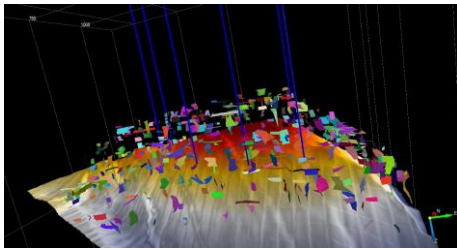


شکل ۱۰. توزیع گسل‌ها و شکستگی‌های ایجادشده بر اساس نشانگر احتمال گسل

۴.۲. نشانگر احتمال گسل نازک

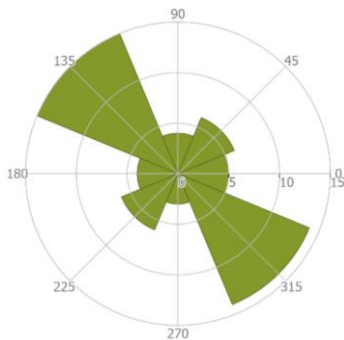
نشانگر احتمال گسل نازک (*Thinned Fault Likelihood*) شده در دسته نشانگرهای جدید قرار می‌گیرد. این نشانگر شیب و آزیموت و جهت‌گیری کمینه شباهت را در امتداد حجم‌های سه‌بعدی جستجو می‌کند. این ویژگی می‌تواند گسل‌ها و شکستگی‌هایی را شناسایی کند که دارای شیب‌ها و امتداد غیر زمین‌شناختی هستند و به‌احتمال زیاد بازگوکننده ناپیوستگی می‌باشند. نشانگر احتمال گسل نازک شده یک نشانگر استخراج شکستگی نوآورانه و جدید است که ناپیوستگی‌های دقیقی را شناسایی می‌کند. این نشانگر به‌عنوان توان شباهت تعریف می‌شود و دارای محدوده‌ای بین

شکل ۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. شکستگی ها و استیک های استخراج شده برای افق سروک

همانطور که از توزیع شکستگی ها بر روی افق ها مشخص است، منطقه تحت تأثیر شکستگی های بزرگ و کوچک مقیاس قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که بیشترین شکستگی های کوچکتر در اطراف میدان و در نواحی یال های آن می باشد. این در حالی است که شکستگی هایی در مقیاس بزرگ با طول های بالاتر بیشتر در نواحی مرکزی میدان متمرکز شده اند. جهت گیری غالب این شکستگی های بزرگ مقیاس که به عبارتی بازگوکننده گسل می باشند به صورت غالباً شمال غربی-جنوب شرقی می باشد. علاوه بر این جهت گیری غالب یکسری جهت گیری شرقی-غربی نیز برای این شکستگی ها می توان در نتایج به دست آمده مشاهده کرد. در شکل ۱۳) رزیدیاگرام که امتداد غالب شکستگی ها را برای میدان مورد مطالعه و در افق سروک نشان می دهد.

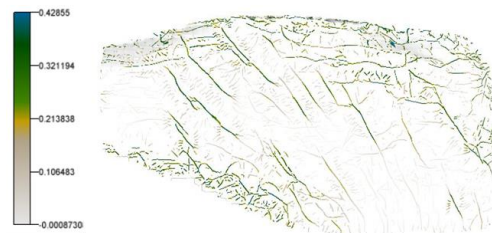


شکل ۱۳. نمودار رزیدیاگرام حاصل از شکستگی های استخراج شده

۶. توزیع چگالی شکستگی ها

چگالی شکستگی ها با استفاده از حجم نشانگر احتمال گسل نازک محاسبه می شود. این نشانگر، نواحی شکستگی های با چگالی بالا را برجسته می کند. برای شناسایی و محاسبه

۰ و ۱ است [۱۲]. این روش حجم های لرزه ای با لبه های تیز ایجاد می کند که برای تفسیر ساختاری بسیار مناسب است. این الگوریتم محدوده شیب های خطا را شناسایی می کند تا بیشترین احتمال را برای ترسیم شکستگی ها در ناحیه مورد نظر پیدا کند و تصاویر گسل واضح بر روی مقاطع عمودی و برش های افقی ارائه می دهد. در شکل ۱۱) توزیع شکستگی ها و گسل ها حاصل از این نشانگر لرزه ای بر روی افق سروک نشان داده شده است.



شکل ۱۱. توزیع گسل ها و شکستگی های ایجاد شده بر اساس نشانگر احتمال گسل نازک

۵. استخراج صفحات شکستگی

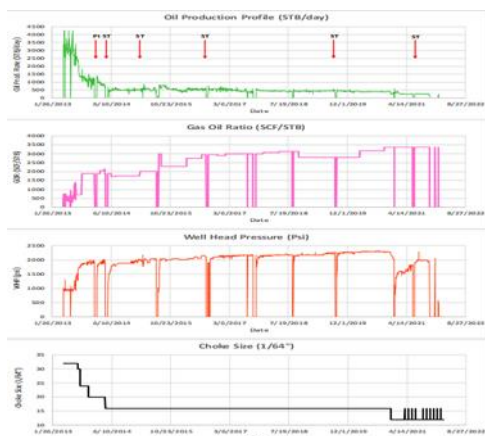
صفحات شکستگی و خطواره های گسلی (*Fault Stick*) نیز با استفاده از حجم نشانگر احتمال گسل نازک ناپیوسته به عنوان ورودی استخراج می شوند. صفحات شکستگی در تشخیص نقاط دقیق برای ارزیابی چشم انداز توسعه میدان و حفاری آتی چاه های اکتشافی کاملاً مفید می باشند. شکستگی ها بر روی مکعب به عنوان یک استیک تفسیر و تجسم شدند و تمام استیک ها که متعلق به یک شکستگی بودند در یک مجموعه استیک واحد ادغام می شوند. بنابراین، یک مجموعه استیک شکستگی منفرد و تفسیر شده تشکیل شده می گردد. حداقل مقدار احتمال برای اعمال نشانگر احتمال گسل نازک (0.01) در مطالعه حاضر معادل 0.01 در نظر گرفته شده است که این حداقل مقدار به شناسایی شکستگی های کوچک مقیاس نیز کمک می کند.

حداقل نرخ همپوشانی عمودی 0.6 برای استخراج حداکثر شکستگی های مایل استفاده شده است. حداقل طول شکستگی در هر برش ($Z=150$ ms) برای استخراج حداکثر شکستگی ها با طول های کوچکتر اعمال شده است [۴]. نتایج صفحات شکستگی و استیک های استخراج شده برای میدان مورد مطالعه و همچنین محل چاه های حفر شده در میدان در

رابطه با اهمیت شکستگی‌ها می‌توان به نقش مؤثر آن‌ها در افزایش تخلخل، نفوذپذیری و در نتیجه تولید بالای نفت اشاره کرد. بر این اساس، شناسایی شکستگی‌ها و نحوه گسترش آن‌ها در مخزن و ارتباط این شکستگی‌ها با تولید می‌تواند در طرح توسعه میدان، تعیین محل‌های مناسب جهت حفاری جدید کمک قابل توجه نماید. یکی از ابزارهای شناسایی شکستگی‌ها به کارگیری داده‌های لرزه‌ای علیرغم محدودیت قدرت تفکیک‌پذیری اطلاعات لرزه‌ای می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای به شناسایی و نحوه توزیع شکستگی‌ها در میدان موردنظر پرداخته شده و در ادامه رابطه این شکستگی‌ها با میزان تولید برخی چاه‌های میدان بررسی گردیده است. بدین منظور به صورت جداگانه چاه *Well_04* و *Well_05* ارزیابی شده است.

• چاه *Well_04*

عملکرد این چاه با توجه به داده‌های نرخ تولیدی نفت، نسبت گاز به نفت، فشار سرچاهی و اندازه کاهنده در شکل ۱۵ ارائه گردیده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است با گذشت زمان، میزان نسبت گاز به نفت تولیدی از چاه افزایش و آخرین نمونه گرفته شده در تاریخ ۱۳۹۹/۰۷/۲۰ (۲۰۲۰/۱۰/۱۱) برابر با ۳۳۷۵ فوت مکعب بر بشکه بود درحالی‌که میزان نرخ تولیدی نفت همچنان روندی نزولی و فشار سرچاهی رو به افزایش بود که حاکی از تشدید پدیده مخروطی شدن گاز می‌باشد. چاه در تاریخ ۱۴۰۰/۰۸/۰۵ (۲۰۲۱/۱۰/۲۷) به منظور انجام تعمیرات اساسی از مدار تولید خارج شد.

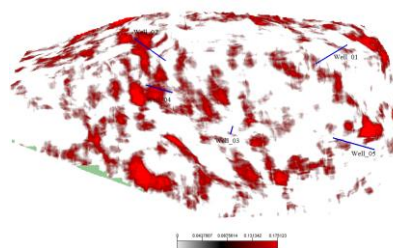


شکل ۱۵. نمودارهای پروفیل تولیدی، نسبت گاز به نفت، فشار سرچاهی و سایز کاهنده به ترتیب از بالا به پایین برای

چاه *Well_04*

چگالی ناهنجاری‌های شکستگی به یک شعاع تعریف شده نیاز است. بنابراین، به عنوان نسبت تعداد ردهای لرزه‌ای طبقه‌بندی شده به عنوان شکستگی به تعداد کل رد موجود در دایره‌ای با شعاع معین در امتداد برش‌های *Z* تعریف می‌شود. در اینجا، تراکم شکستگی تصویر بهبودیافته ناهنجاری‌های شکستگی بالقوه را نشان می‌دهد. ویژگی حداکثر انحنا به عنوان ورودی برای تولید چگالی شکست استفاده شده است. در این مطالعه تراکم شکستگی‌ها برای شعاع ۱۰۰ متر ارائه شده است.

نتایج حاصل از چگالی شکستگی در زون سروک و در میدان مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم به کاربرده شده در این مطالعه (در شکل ۱۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، بیشترین میزان چگالی شکست در اطراف چاه‌های *Well-03* و *Well-04* (دایره مشکی‌رنگ در *Error! Reference source not found.*) توزیع یافته است. به صورت محلی در محل چاه *Well-05* نیز کمترین میزان چگالی شکستگی‌ها مشاهده می‌شود. نتایج چگالی شکست حداکثر مقادیر را در امتداد سطوح فرسایشی و در مجاورت فعالیت‌های شکست نشان داد. همچنین در نظر گرفتن این نکته ضروری است که ناپیوستگی‌های ساختاری، مانند شکستگی‌ها، کانال‌های جریان را نشان نمی‌دهند زیرا کانال‌ها و شکستگی‌ها مورفولوژی متفاوتی دارند. علاوه بر این، نواحی بیشترین شکستگی رسانیابی بیشتری نسبت به نواحی با حداقل فعالیت شکستگی دارند.



شکل ۱۴. چگالی شکستگی‌ها در افق سروک

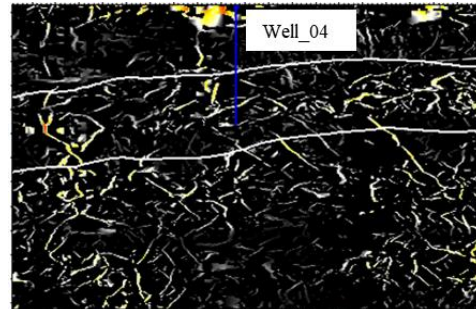
۷. مقایسه نتایج حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای با داده‌های تولید

وجود انواع شکستگی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها موجب پیچیدگی در تفسیر مشخصات مخزن می‌شود و گاهی تفسیر پارامترهای مختلف مخزنی و نحوه توزیع آن‌ها دچار خطا می‌گردد. در

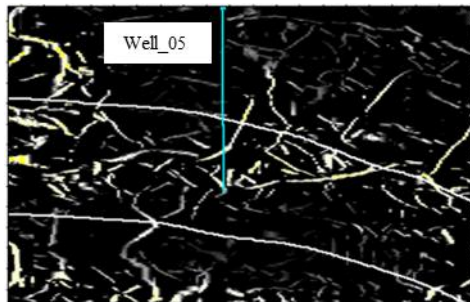


شکل ۱۸. نمودارهای پروفیل تولیدی، نسبت گاز به نفت، فشار سرچاهی و سائز کاهنده به ترتیب از بالا به پایین برای چاه Well_05

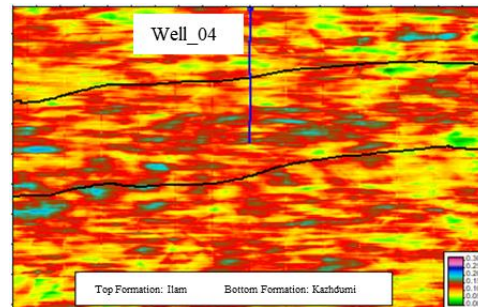
به منظور بررسی تأثیر شبکه شکستگی بر تولید چاه مورد نظر یک مقطع عمودی حاصل از توزیع شکستگی ها و چگالی آن ها در محل چاه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۶، شکل ۱۷).



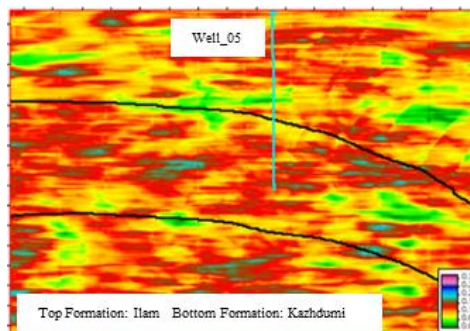
شکل ۱۶. مقطع عمودی توزیع شکستگی ها در چاه Well_04



شکل ۱۹. مقطع عمودی توزیع شکستگی ها در محل چاه Well_05



شکل ۱۷. مقطع عمودی توزیع چگالی شکستگی ها در چاه Well_04



شکل ۲۰. مقطع عمودی توزیع چگالی شکستگی ها در محل چاه Well_05

• چاه Well_05

پروفایل تولیدی چاه Well-05 سروستان در شکل ۱۸) نشان داده شده است. این چاه، چاه تولیدی نفت از سازند سروک می باشد که به صورت حفره باز افقی (۲۶۳۳ - ۲۵۸۸ متر) و مشبک کاری (۲۵۷۲ - ۲۵۵۷ متر) تکمیل شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، میزان تولید نسبی نفت در فواصل زمانی ۱۳۹۲/۰۵/۲۷ (۲۰۱۳/۰۸/۱۸) تا تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۱۵ (۲۰۱۵/۰۱/۰۵) بین ۰ تا ۶۰۰ بشکه در روز نوسان بوده است. با عدم موفقیت در عملیات احیاء و افت فشار جریان چاه، چاه از تاریخ ۱۳۹۶/۰۵/۲۶ (۲۰۱۷/۰۸/۱۷) بسته شد که تاکنون نیز چاه بسته است.

به منظور ارزیابی تولید چاه با توزیع شکستگی ها یک مقطع عمودی حاصل از توزیع شکستگی ها و چگالی آن ها در محل چاه در نظر گرفته شده است (شکل های شکل ۱۹، شکل ۲۰).

۸. نتیجه گیری

میدان مورد مطالعه در پهنه ساختاری زاگرس چین خورده ساده واقع شده که دارای روند NW-SE بوده از مناطق فعال تکتونیکی ایران می باشد. واحدهای زمین شناسی در این محدوده به ترتیب از قدیم به جدید شامل سری هرمز، سروک،

یک گسل نسبتاً بزرگ همانند یک کانال مخزن را تا بالای افق ایلام تحت تأثیر قرار داده است. علاوه بر این شبکه‌ای از شکستگی‌ها در انتهای چاه حفاری شده می‌تواند بر میزان تولید این چاه اثر بگذارد. تولید از چاه *Well_05* بدون دخالت پدیده مخروطی شدن صورت می‌گیرد. بر همین اساس با توجه به جهت شکاف‌های باز و بسته در نگاره‌های تصویری این فرضیه تقویت می‌شود که نرخ بالای تولید گاز از این چاه به دلیل جهت عمودی استرس بر شکاف‌های باز می‌باشد که می‌تواند بر نقش شبکه شکستگی‌ها در این چاه تأکید کند. در رابطه با چاه *Well_04* عوامل دیگری می‌تواند بر روی میزان تولید چاه تأثیرگذار باشد. یک ناحیه متخلخل در منتهی‌الیه بالایی زون سروک در چاه *Well_04* قابل تفسیر می‌باشد که هرچه به سمت بخش‌های عمیق‌تر چاه برویم خاصیت متراکم شدن مخزن بیشتر می‌گردد. با وجودی که این چاه در فاصله بسیار نزدیکی نسبت به گسل واقع شده اما تولید عمده مخزن می‌تواند ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی مانند دیاژنز و انحلال سازند باشد. به نظر می‌رسد علیرغم وجود شبکه شکستگی و گسلی در محل *Well_04*، به دلیل نبود ارتباط بین این شبکه شکستگی جریان سیال نمی‌تواند در این شکاف‌ها و شکستگی‌ها اتفاق بیافتد. حداکثر توان تولید چاه *Well_04* و *Well_03* از چاه‌های *Well_01* و *Well_02* بسیار بیشتر می‌باشد (بین ۲ تا ۳ برابر) که می‌تواند به علت فرضیه وجود شبکه شکاف باشد. اما محدوده تغییرات نفوذپذیری (بین ۰.۵ تا ۲ میلی داری) بسیار پایین‌تر از حد نرمال این پارامتر در مخازن مشابه آنالیز شده می‌باشد بطوریکه بازه این تغییرات حتی نسبت به نفوذپذیری حاصل از مغزه در این چهار چاه در عمق مخزنی سروک بسیار کمتر می‌باشد که این اختلاف فاحش نشانه‌های اثر شکاف در تولید از چاه‌های مذکور را کم‌رنگ می‌کند.

۹. مراجع

- [1] Jaglan Hardeep, R. H. (2016). Fault and Fracture Detection in Unconventional Reservoirs: A Utica Shale Study. *Unconventional Resources Technology* (pp. 03-09). San Antonio, Texas: SPE, AAPG, SEG.
- [2] Oppermann, R. (2012). Finding Sweet Spots through Seismic Fracture Extraction - Unconventional Case Studies from Around the World. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition* (pp. 1-8).

گورپی، تشکیلات تارپور، ساچون، جهرم، واحد آسماری - جهرم، رازک آغاچاری، بختیاری و رسوبات کواترنری می‌باشد. اما میدان موردنظر بر روی نهشته‌های کواترنری شامل آبرفت‌های رودخانه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی جوان (خرده‌سنگ با گردشگی متوسط، ماسه، سیلت و رس)، رسوبات دشت سیلابی، رسوبات مردابی (شامل فورش، ماسه و رس همراه با نمک) قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، امکان مقایسه ساختگاه شکستگی‌های تعیین شده حاصل از این نشانگرها با مطالعات قبلی فراهم شده است. به‌طور کلی این شکستگی‌ها در میدان سروستان، جهت‌گیری شمال-شمال‌غرب جنوب-جنوب شرق را دارا می‌باشند. با توجه به گسله‌های استخراج شده در این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی این گسله‌ها با جهت‌گیری گسل‌های اصلی زاگرس چین‌خورده که به‌صورت شمال غربی-جنوب شرقی امتداد یافته‌اند سازگاری خوبی نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر، رفتار این شکستگی‌ها توسط گسل‌های اصلی در مقیاس منطقه‌ای در محدوده مورد مطالعه کنترل می‌گردد. علاوه بر این نتایج استخراج شده با اطلاعات حاصله از داده‌های نگاره‌های تصویری (*FMI*) دارای همخوانی نسبتاً خوبی می‌باشد.

با توجه به تنظیمات روش استخراج شکستگی از یک پنجره زمانی بالاتر از افق ایلام میدان مورد مطالعه تعداد شکستگی‌ها در این ناحیه کمتر از حد انتظار می‌باشد. این می‌تواند مؤید یک افق لرزه‌ای کاملاً بدون نشست در مخازن هیدروکربنی (*Seal reflector or non-leaking reflector*) باشد. علاوه بر این موضوع، وجود امتدادهای بدون تغییر بین دو بازه سروک و ایلام نشان‌دهنده ارتباط معنادار شکستگی‌ها در دو بازه مذکور برای مورد نظر می‌باشد. در حقیقت ناپیوستگی سروک مانع تغییر روند و امتداد شکستگی‌ها نشده است که این مؤید ارتباط مؤثر و یکپارچگی سیستم هیدروکربنی در این دو افق و عدم احصا و وقوع شرایط ایجاد *reservoir compartmentation* است.

در رابطه با میزان تولید چاه‌های حفاری شده در میدان مورد مطالعه، چاه *Well_05* و بعد از آن چاه *Well_04* دارای بیشترین میزان تولید بوده است. این میزان تولید می‌تواند به دلیل وجود شبکه شکستگی در محل چاه‌های مورد اشاره باشد. همانطور که از شکل (۱۹) مشخص است چاه *Well_05*،

Perth, Australia: Society of Petroleum Engineers International.

[3] Verduzco, F. S. (2010). Unsteady and Pseudo-steady State Characterization of Matrix and Fracture System for Multiple Size Blocks with the use of empirical Correlations. Society of Petroleum Engineering International, 1-5.

[4] Ashraf, U., Zhang, H., Anees, A., Nasir Mangi, H., Ali, M., Ullah, Z., & Zhang, X. (2020). Application of unconventional seismic attributes and unsupervised machine learning for the identification of fault and fracture network. Applied Sciences, 10(11), 3864.

[5] Qayyum F, J. H. (2015). Unconventional seismic attributes for fracture characterization. (pp. 101-109). First Break.

[6] Paul de Groot, T. (2003). Post-stack dip- and azimuth processing. Journal of Seismic Exploration, 113-126.

[7] Tingdahl, K.M. de Groot, P.F. (2003) Post-stack dip-and azimuth processing. J. Seism. Explor, 12, 113–126.

[8] Chopra, S.; & Marfurt, K. J. (2013). Preconditioning seismic data with 5D interpolation for computing geometric attributes. The Leading Edge, 32(12), 1456-1460.

[9] Matrix and Verduzco, F. S. (2010). Unsteady and Pseudo-steady State Characterization Matrix and Fracture System for Multiple Size Blocks with the use of empirical Correlations. Society of Petroleum Engineering International, 1-5.

[10] Mandal, A.; Srivastava, E. (2018). Enhanced structural interpretation from 3D seismic data using hybrid attributes: New insights into fault visualization and displacement in Cretaceous formations of the Scotian Basin, offshore Nova Scotia, Mar. Pet. Geol, 89, 464–478.

[11] Roberts, A. (2001). Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. (pp. 85-100). First Break.

[12] Hale, D. (2013). Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images, Geophysics.