

شناسایی شکستگی‌های تراوا با استفاده از امواج استونلی در یکی از چاه‌های هیدروکربنی واقع در جنوب ایران

امیرحسین عبداللهیان، مجید نبی‌بیدهندی*، فرهاد خوشبخت

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد؛ موسسه ژئوفیزیک؛ دانشگاه تهران

۲. استاد؛ موسسه ژئوفیزیک؛ دانشگاه تهران

۳. مربی؛ پژوهشگاه صنعت نفت

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63114

چکیده

نرخ تولید هیدروکربنی در مخازن شکافدار به مراتب بیشتر از سایر مخازن است. بنابراین شناسایی شکستگی‌های تراوا در سنگ مخزن از اولویت‌های اساسی به شمار می‌رود. روش‌هایی همچون نگاربرداری تصویری و مغزه‌گیری دقت بسیار بالایی در شناسایی شکستگی‌ها دارند اما قادر به تفکیک شکستگی‌های تراوا از شکستگی‌های ناتراوا نیستند. از این‌رو به‌کارگیری روش‌های مکمل، نظیر استفاده از امواج استونلی جهت تشخیص شکستگی‌های تراوا با استقبال فراوانی مواجه گشته است. از آنجا که شکستگی‌های تراوا باعث بازتابش امواج استونلی می‌گردند، با مطالعه و تحلیل این پدیده، تراوایی و یا عدم تراوایی یک شکستگی قابل بررسی خواهد بود. در این مقاله از قسمت موج استونلی داده‌های برداشت شده توسط دستگاه نگاربرداری صوتی *DSI (Dipole Shear Imager)* در یک چاه نفتی واقع در جنوب ایران جهت شناسایی شکستگی‌های تراوا استفاده شده است. در ابتدا قسمت موج استونلی داده‌های دستگاه با استفاده از فیلتر میانگین متحرک در زمان، از نوفه‌های غیر تصادفی و تکرار شونده در بستر زمان پاک‌سازی می‌گردد و سپس با استفاده از فیلتر فرکانسی مناسب، فرکانس‌های ناخواسته حذف می‌گردد. در مرحله بعد و با استفاده از فیلتر فرکانس- عدد موج، الگوهای جناغی شکل موجود در امواج استونلی که ناشی از بازتابش این امواج در مواجهه با شکستگی‌های تراوا است، جداسازی و با تقسیم انرژی این قسمت بر انرژی قسمت باقی‌مانده، ضرایب بازتاب در اعماق مختلف محاسبه می‌گردد. با تعیین محل و چگالی شکستگی‌ها با استفاده از نگار *FMI* و با توجه به ضرایب بازتاب محاسبه شده، تراوایی شکستگی‌ها به صورت کیفی قابل تفسیر است. البته توجه به دو عامل دیگر ایجاد ضرایب بازتاب یعنی ریختگی‌های شدید دیواره‌ای و تغییرات لیتولوژیکی فراوان در این‌گونه تفسیر امری ضروری است.

واژگان کلیدی

شکستگی‌های تراوا،
امواج استونلی، تغییرات
لیتولوژیکی، الگوهای
جناغی شکل، نگار صوتی
دوقطبی برشی

۱. پیش‌گفتار

کربناته‌ها هستند؛ بر سی این موضوع اهمیت دوچندان پیدا کرده است. به علت رفتار پیچیده شکستگی‌ها، شناسایی و ارزیابی این پدیده‌ها چالش‌های فراوانی را به همراه دارد. روش‌های گوناگونی همچون نگاربرداری تصویری، مغزه‌گیری، پیمایش حرارتی، بررسی هرزروی گل حفاری، جریان‌سنجی و چاه‌آزمایی جهت تشخیص شکستگی‌های مخزنی وجود دارد.

یکی از عوامل افزایش چندین برابری تولید هیدروکربن در یک چاه نفتی، وجود شکستگی‌های تراوا در سنگ مخزن است. از این‌رو شناسایی شکستگی‌های تراوا می‌تواند گامی مؤثر در جهت افزایش بهره‌وری به شمار آید (Bratton et al., 2006). به دلیل ماهیت سنگ مخزن‌های کربناته، وجود شکستگی‌های تراوا در آن‌ها بسیار محتمل است و با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد سنگ مخزن‌های کشور ایران از نوع

هورنبی و همکاران (*Hornby et al., 1989*) موفق به ارائه مدل تئوری جهت تعیین تأثیر شکستگی‌های تراوا بر روی امواج استونلی در حال انتشار در محیط چاه گردیدند. آن‌ها در این مدل با جداسازی و تقسیم انرژی قسمت بازتابی بر قسمت مستقیم موج استونلی، ضرایب بازتاب این موج در هر عمق دلخواه را بدست آورده و با انجام مطالعه موردی در آزمایشگاه، صحت مدل ارائه شده را مورد تأیید قرار دادند. یکی از پارامترهای مورد توجه در بررسی نتایج این آزمایش، تأثیر تغییرات لیتولوژیکی فراوان در بازتابش امواج استونلی و نیاز به در اختیار داشتن نگاره‌های تصویری جهت پیشگیری از تفسیر اشتباه ضرایب بازتاب است.

تزوکا و همکاران (*Tezuka et al., 1997*) با مدل‌سازی حرکت امواج استونلی در محیط با ریختگی‌های شدید دیواره‌ای^۲، بازتابش حاصل از این پدیده را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل، با توجه به ماهیت حرکتی امواج استونلی بر روی مرز بین سازند و محیط گل حفاری و همچنین عدم تضعیف دامنه به علت عدم اتساع کروی^۳ امواج در مقایسه با طول چاه، بازتابش‌های شدید ناشی از ریختگی‌های دیواره‌ای مشاهده گردیده است. در انتهای این مطالعه و از مقایسه نتایج تئوری ارائه شده با داده‌های میدانی، صحت مدل، مورد تأیید قرار گرفته است.

یو و یو (*Yue & Yue, 2017*) با استفاده از روش FDM^۴ موفق به مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در محیط چاه دارای شکستگی‌های موازی با محور چاه گشتند. طبق این مدل، با افزایش چگالی شکستگی‌ها، بازتابش امواج استونلی تشدید می‌گردد.

دستگاه نگاربرداری صوتی DSI ساخت شرکت نفتی شلومبرژه با دارا بودن ۸ جفت گیرنده دو به دو عمود بر هم، یک فرستنده سرامیکی تک‌قطبی و ۲ فرستنده دوقطبی عمود بر هم قادر به ثبت و ضبط امواج صوتی به صورت کامل است. به‌وسیله‌ی این امواج، امکان تحلیل بسیاری از ویژگی‌های سازندهای تشکیل‌دهنده‌ی دیواره‌ی چاه از جمله بررسی شکستگی‌های تراوا فراهم می‌گردد.

این روش‌ها به دو دسته دینامیک و استاتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های استاتیک مانند مغزه‌گیری و یا استفاده از نگاره‌های تصویری (نظیر استفاده از دستگاه نگاربرداری تصویری FMI) علیرغم دقت بالا در شناسایی شکستگی‌ها، قادر به تفکیک شکستگی‌های تراوا از شکستگی‌های ناتراوا نیست. روش‌های دینامیک نظیر چاه‌آزمایی، توانایی ارزیابی هیدرولیکی شکستگی‌ها را دارد اما میانگین‌گیری در محدوده وسیعی از چاه (در مقایسه با مقیاس نگاربرداری)، وابستگی بالای نتایج به روش تفسیر و همچنین محدود بودن این روش‌ها به بخش خاصی از مخزن، از محدودیت‌های عمده این‌گونه روش‌ها به شمار می‌رود. مشاهده تأثیر شکستگی‌های تراوا بر روی نگاره‌های صوتی در اواخر دهه ۸۰ میلادی و با پیشرفت چشمگیر علوم الکترونیک و ابزار دقیق، امکان‌پذیر گردید (*Close et al., 2009*). امروزه دستگاه‌های نگاربرداری صوتی قادر به ثبت و ضبط امواج به‌صورت کامل (شامل قسمت‌های S، P و استونلی) می‌باشند.

روزنباوم (*Rosenbaum, 1974*) با شبیه‌سازی عددی، به رابطه بین امواج استونلی در محیط یک چاه و تراوایی سنگ‌های دیواره آن چاه پی برد. این پدیده کاربردی اساسی در تعیین نواحی تراوای دیواره‌ی چاه دارد. رفتار امواج استونلی در حضور شکستگی‌های تراوا با استفاده از یک دستگاه صوتی با دو گیرنده مورد بررسی قرار گرفته است (*Paillet & White, 1982*). در این مطالعه، امواج استونلی در دو محدوده عمقی و در دو چاه متفاوت در کشور کانادا توسط دستگاه مذکور ثبت و ضبط گردیده است. محل شکستگی‌های تراوا در مغزه‌های برداشت شده در همان محدوده عمقی، همخوانی بسیار بالایی با محل بیشترین بازتابش‌های امواج استونلی را نشان داده است.

سو و همکاران (*Hsu et al., 1987*) با محاسبه مجموع پاسخ‌های یک دستگاه نگاربرداری صوتی با آرایه‌ای از گیرنده‌ها در مواجهه با شکستگی‌های مشخص شده توسط دستگاه BHTV^۱ و همچنین بررسی مغزه‌های برداشت شده، تراوایی و یا عدم تراوایی شکستگی‌ها را به صورت کیفی و با دقتی بیشتر از قبل تعیین نمودند.

¹ Borehole Televiewer

² Wash Out

³ Geometrical Spreading

⁴Finite Difference Method

شناسایی شکستگی‌های تراوا با استفاده از امواج استونلی در یکی از چاه‌های هیدروکربنی واقع در جنوب ایران

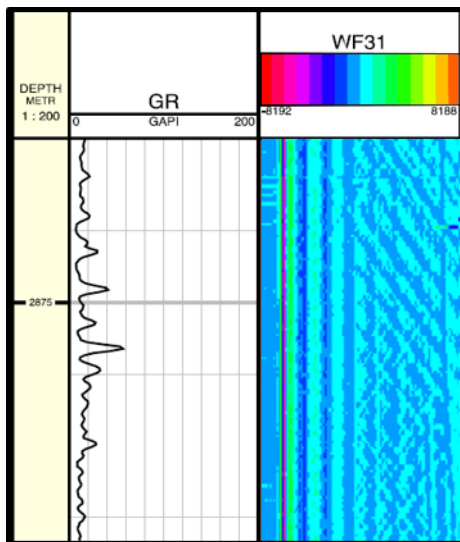
می‌تواند از دیگر عوامل بازتابش امواج استونلی و ایجاد الگوهای جناغی شکل باشد. به همین علت باید هر سه مورد مذکور به طور همزمان مورد بررسی قرار بگیرند. (Ciuperca et al., 2017).

نواحی دارای ریزش در دیواره‌ی چاه به دلایل متعددی از جمله سست بودن سازند، افزایش بیش از حد فشار مته‌ی حفاری، استرس در جای سازند و یا تماس لایه‌ی شیلی با آب پدید می‌آیند. این‌گونه نواحی سبب پراش در امواج استونلی در حال حرکت درون چاه، بازتابش آن‌ها و در نتیجه ایجاد الگوهای جناغی شکل می‌گردند.

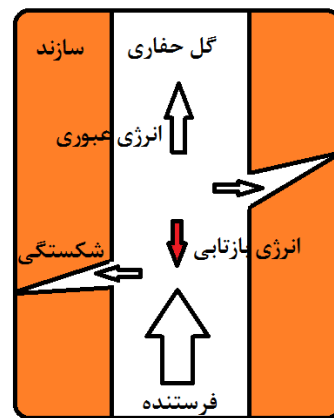
(Arroyo Franco et al., 2006) و (Sinha et al., 2006). موج استونلی در انتهای‌ترین قسمت امواج ثبت شده توسط گیرنده‌ها قرار دارد و از آنجا که شکستگی‌های تراوا تأثیری مستقیم بر روی امواج استونلی در حال حرکت درون چاه می‌گذارند؛ به وسیله تحلیل این امواج می‌توان به تراوایی و یا عدم تراوایی شکستگی‌های موجود در چاه پی برد (Cheng et al., 1987). در این دستگاه، تولید موج استونلی در فرکانس پایین (که اصطلاحاً به آن موج لوله‌ای^۵ گفته می‌شود) بر عهده فرستنده تک قطبی است.

۱.۱ عوامل مؤثر در بازتابش امواج استونلی

در صورت وجود شکستگی‌های تراوا در دیواره‌ی چاه، به هنگام حرکت موج استونلی در درون چاه، قسمتی از مایع گل حفاری به داخل این شکستگی‌ها رانده می‌شود. پس از چند لحظه‌ی بسیار کوتاه، مایع فروزانده شده به درون شکستگی مجدداً به محیط چاه باز می‌گردد و موج استونلی ضعیف‌تری در خلاف جهت موج استونلی اولیه پدید می‌آید (شکل ۱).



شکل ۲. ستون اول: عمق، ستون دوم: نگار گاما و ستون سوم: امواج استونلی ثبت شده توسط گیرنده اول. در این امواج وجود الگوهای جناغی شکل مشهود است.



شکل ۱. قسمتی از انرژی موج استونلی به هنگام عبور از یک شکستگی تراوا، بازتابیده می‌شود.

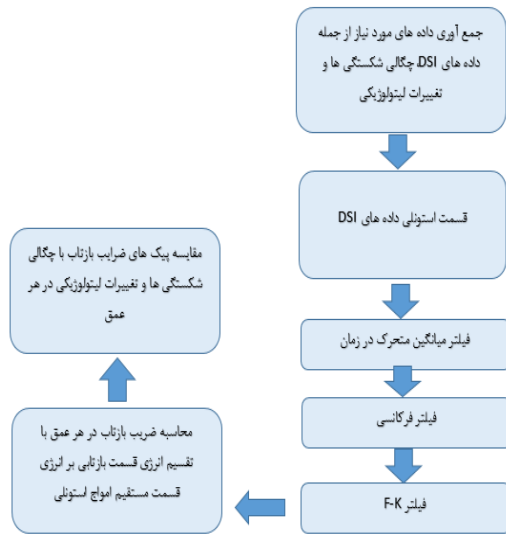
با استفاده از نگار قطرسنج امکان اندازه‌گیری قطر چاه در اعماق مختلف و بررسی ریزش دیواره وجود دارد. چنانچه امواج استونلی در حین حرکت در مرز بین گل حفاری و سازند، با نواحی دارای تغییرات لیتولوژیکی زیاد روبه‌رو شوند؛ قسمتی از انرژی آن‌ها بازتابیده می‌شود و مجدداً شاهد الگوهای جناغی شکل خواهیم بود. این‌گونه نواحی با بررسی نگار لیتولوژی چاه قابل شناسایی است.

این امر سبب شکل‌گیری الگوهای جناغی شکل^۶ در نگار VDL^۷ می‌گردد (شکل ۲). البته وجود نواحی دارای ریزش در دیواره‌ی چاه و همچنین تغییرات لیتولوژیکی زیاد نیز

⁵ Tube Wave

⁶ Chevron Patterns

⁷Variable Density Log



شکل ۳. الگوریتم مراحل تشخیص شکستگی‌های تراوا

در مرحله‌ی بعد با استفاده از فیلتر فرکانسی به حذف فرکانس‌های ناخواسته پرداخته می‌شود (شکل ۶). لازم به ذکر است، ورودی هر فیلتر جدید خروجی فیلتر مرحله قبل از آن است. نوع فیلتر فرکانسی مذکور میان‌گذر و از درجه ۵، محدوده فرکانسی آن از ۰ تا ۳۷۵۰ هرتز و نمونه‌های در بر گرفته شده توسط فیلتر در هر لحظه (Filter Size) برابر با ۲۰۱ نمونه است. قسمتی از انرژی امواج استونلی با رسیدن به شکستگی‌ها، مکان‌های ریزش پیدا کرده‌ی دیواره‌ی چاه و یا نواحی دارای تغییرات لیتولوژیکی فراوان دچار بازتابش می‌شود.

پس از حذف فرکانس‌های ناخواسته، نوبت به محاسبه‌ی ضرایب بازتاب^۸ از طریق تفکیک این امواج به دو بخش مستقیم و بازتابیده شده می‌رسد. با تفکیک امواج استونلی ثبت شده به دو بخش مستقیم و بازتابی و تقسیم انرژی قسمت بازتابی بر انرژی قسمت مستقیم، ضریب بازتاب محاسبه می‌گردد (Hornby et al., 1989).

۲. الگوریتم شناسایی شکستگی‌های تراوا

در ابتدا الگوریتم کلی شناسایی شکستگی‌های تراوا در این مطالعه به صورت فلوچارت مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه هر قسمت به تفصیل بیان خواهد شد (شکل ۳).

۱.۲ داده‌های مورد نیاز جهت شناسایی شکستگی‌های تراوا

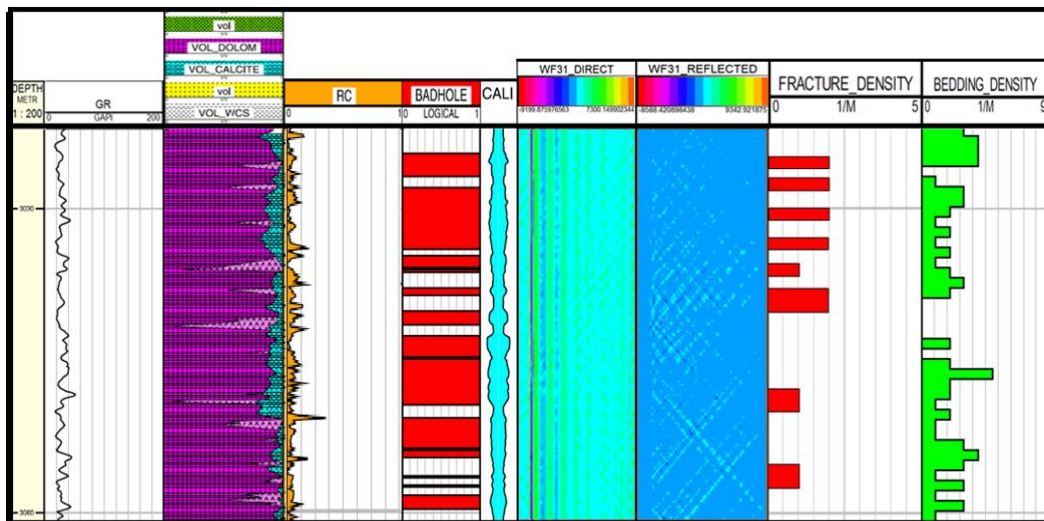
در (شکل ۴) داده‌های مورد نیاز جهت شناسایی شکستگی‌های تراوا ی چاه هیدروکربنی مورد مطالعه معرفی گردیده است. هر کدام از این داده‌ها یا به صورت مستقیم و توسط دستگاه نگاربرداری مخصوص به خود برداشت شده‌اند و یا از تلفیق چند نگار مختلف به دست آمده‌اند. به عنوان مثال نگار ضرایب بازتاب در ستون چهارم، به صورت غیرمستقیم و از تقسیم قسمت بازتابی امواج استونلی بر قسمت مستقیم محاسبه گردیده است (در بخش بعد، نحوه محاسبه نگار ضرایب بازتاب بیان خواهد شد).

۲.۲ پردازش داده‌ها

در این مقاله، ابتدا قسمت امواج استونلی نگار صوتی به دست آمده از دستگاه DSI جداسازی گردیده است. پس از آن جهت بهبود کیفیت و حذف نوفه، داده‌ها از فیلتر میانگین متحرک در زمان عبور داده می‌شوند. در ابتدا یک پنجره زمانی به طول ۵۲۰ میکروثانیه برای این فیلتر تعیین می‌گردد. با حرکت رو به جلوی این پنجره زمانی، در هر لحظه از مقادیر موجود در داخل این پنجره میانگین‌گیری شده و مقدار به دست آمده از داده‌های اصلی کم می‌گردد. این کار باعث جداسازی رویدادهایی می‌گردد که در طول زمان تکرار شده‌اند، رویدادهایی نظیر نوفه‌های غیر تصادفی در محیط چاه. در شکل ۵ نمونه‌ای از تأثیر فیلتر میانگین متحرک در زمان بر روی داده‌های امواج استونلی نمایش داده شده است.

⁸ Reflectivity Coefficient

شناسایی شکستگی‌های تراوا با استفاده از امواج استونلی در یکی از چاه‌های هیدروکربنی واقع در جنوب ایران



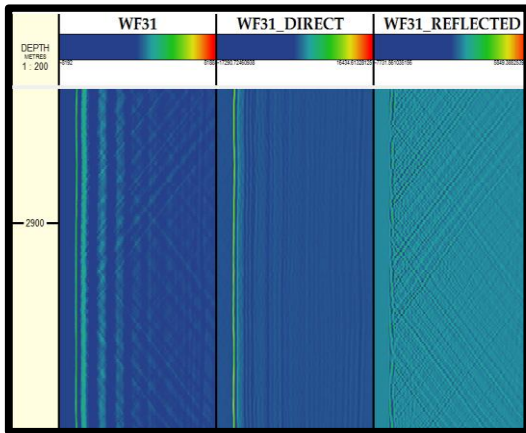
شکل ۴. از سمت چپ به سمت راست: ستون ۱: عمق، ستون ۲: نگار گاما، ستون ۳: لیتولوژی، ستون ۴: ضرایب بازتاب، ستون ۵: BADHOLE، ستون ۶: نگار قطر سنج، ستون ۷: موج استونلی مستقیم، ستون ۸: موج استونلی بازتابی، ستون ۹: چگالی شکستگی‌های چاه که از نگار تصویری FMI به دست آمده است، ستون ۱۰: چگالی تغییرات لیتولوژیکی که از بررسی نگار لیتولوژی چاه به دست می‌آید.

تقریبی ۳۰ متر برآورد شده است. فیلتر F-K با استفاده از این طول قادر به محاسبه شیب الگوهای جناغی شکل و در نهایت جداسازی قسمت‌های مستقیم از قسمت‌های بازتابی خواهد بود. در شکل ۷ قسمتی از داده‌های VDL مربوط به گیرنده اول و همچنین تفکیک این داده‌ها به دو قسمت مستقیم و بازتابی با استفاده از فیلتر F-K مشاهده می‌گردد. در شکل ۸ ضرایب بازتاب محاسبه شده در محدوده‌ای از چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. محل‌های بیشینه (Peak) این ضرایب بازتاب می‌تواند بیانگر وجود شکستگی‌های تراوا، ریختگی‌های شدید دیواره‌ای و یا نواحی دارای تغییرات لیتولوژیکی فراوان باشد (Escandon & Montes, 2010). لازم به ذکر است که افزایش چگالی سه عامل فوق و یا روی دادن هم‌زمان آن‌ها منجر به افزایش چشمگیر ضریب بازتاب می‌گردد.

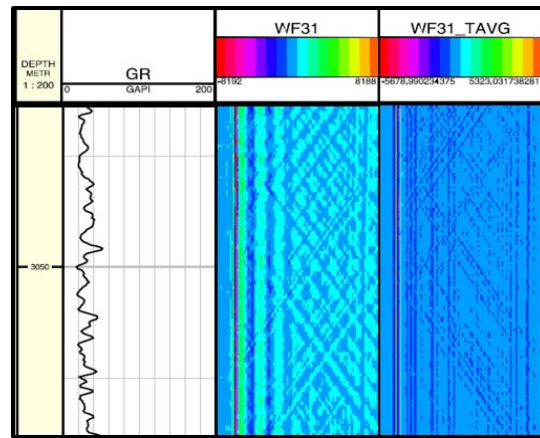
این تفکیک با انتقال امواج استونلی از حوزه‌ی زمان به حوزه فرکانس - عدد موج (F-K) صورت می‌گیرد. جهت حذف و یا جداسازی قسمت‌هایی که در داده‌های به دست آمده با شیبی متمایز ظاهر می‌شوند (نظیر الگوهای جناغی شکل در نگارهای صوتی، امواج زمین غلتش در لرزه‌نگاشت‌ها و ...) از این فیلتر استفاده می‌گردد. اگر از داده‌های نگار VDL در راستای محور زمان تبدیل فوریه گرفته شود، این داده‌ها به فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌گردند. بنابراین رویدادهای شبیدار موجود در خروجی نیز به فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌گردد. تعداد پیک‌های هر فرکانس در واحد طول و در امتداد یک رویداد شیب‌دار، بیانگر فرکانس در بستر مکان (سیکل بر واحد طول) و یا همان عدد موج است.

در صورتی که هر فرکانس بر حسب عدد موج به دست آمده برای آن فرکانس ترسیم گردد، رویدادهایی نظیر الگوهای جناغی شکل و یا امواج زمین غلتش به راحتی از دیگر قسمت‌های داده‌های خروجی جدا می‌گردد. با توجه به نگار VDL، طول ابتدا تا انتهای هر الگوی جناغی شکل به طور

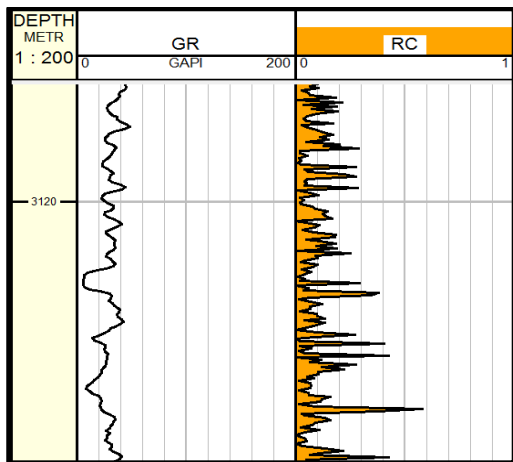
⁹ F-K filtering



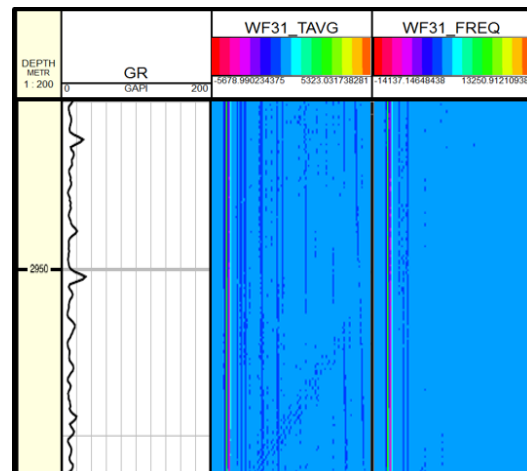
شکل ۷. WF31 بیانگر قسمتی از امواج استونلی ثبت شده توسط اولین گیرنده دستگاه DSI است. الگوهای جناغی شکل (REFLECTED) به وسیله فیلتر F-K از قسمت مستقیم (DIRECT) جدا گشته است.



شکل ۵. تأثیر فیلتر میانگین متحرک در زمان بر روی داده‌های امواج استونلی. ستون ۱: عمق، ستون ۲: نگار گاما، ستون ۳: داده‌های امواج استونلی به صورت خام، ستون ۴: همان داده‌ها پس از عبور از فیلتر میانگین متحرک در زمان.



شکل ۸. ضرایب بازتاب در محدوده‌ای از چاه مورد مطالعه. ستون اول: عمق، ستون دوم: نگار گاما و ستون سوم: ضرایب بازتاب در اعماق مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۶. ستون ۱: عمق، ستون ۲: نگار گاما، ستون ۳: داده‌های امواج استونلی قبل از عبور از فیلتر فرکانسی، ستون ۴: داده‌های امواج استونلی پس از عبور از فیلتر فرکانسی.

۳.۲ تفسیر داده‌های پردازش شده

قسمت اول: در بسیاری از اعماق چاه، ناحیه‌هایی با ضرایب بازتاب بالا وجود دارند که تنها دچار ریزش‌های شدید دیواره‌ای می‌باشند (چگالی تغییرات لیتولوژیکی و چگالی شکستگی‌هایشان بسیار کم است). همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد علت مقدار بالای ضرایب بازتاب در این‌گونه نواحی آن است که موج استونلی در حال حرکت در مرز چاه، در هنگام برخورد با نواحی فروریخته و شسته شده‌ی دیواره، دچار پراش می‌گردد. با شاخص قرار دادن داده‌های نگار قطر سنج، قسمت‌هایی از چاه که دارای ریختگی‌های شدید هستند تحت عنوان (BADHOLE) مشخص می‌شوند. در تحلیل و تفسیر نتایج توجه به این مسئله ضروری است. به عنوان مثال در قسمت (الف) از شکل ۹، علت اصلی افزایش ناگهانی ضریب بازتاب در محدوده عمقی مشخص شده، تغییرات شدید قطر دیواره چاه است. در این عمق چگالی تغییرات لیتولوژیکی بسیار اندک و همچنین چگالی شکستگی‌های رؤیت شده در نگار FMI، صفر است.

قسمت دوم: در چندین عمق مختلف، تغییرات لیتولوژیکی فراوان به تنهایی باعث ایجاد پیک در ضرایب بازتاب گشته است. با دقت در قسمت (ب) از شکل ۹، در محدوده‌ی مشخص شده از عمق چاه، نگار قطر سنج (ستون ششم) تطابق عالی دیواره‌ی چاه با قطر مته حفاری (BS) را نشان می‌دهد و در نتیجه در نگار BADHOLE (ستون پنجم) مقدار صفر را مشاهده می‌نماییم. همچنین با توجه به چگالی شکستگی‌ها (ستون نهم) هیچ‌گونه شکستگی در این محدوده عمقی مشاهده نمی‌شود. به همین علت، عامل وجود پیک‌های متوالی در نگار ضرایب بازتاب در این محدوده عمقی، چگالی بالای تغییرات لیتولوژیکی است.

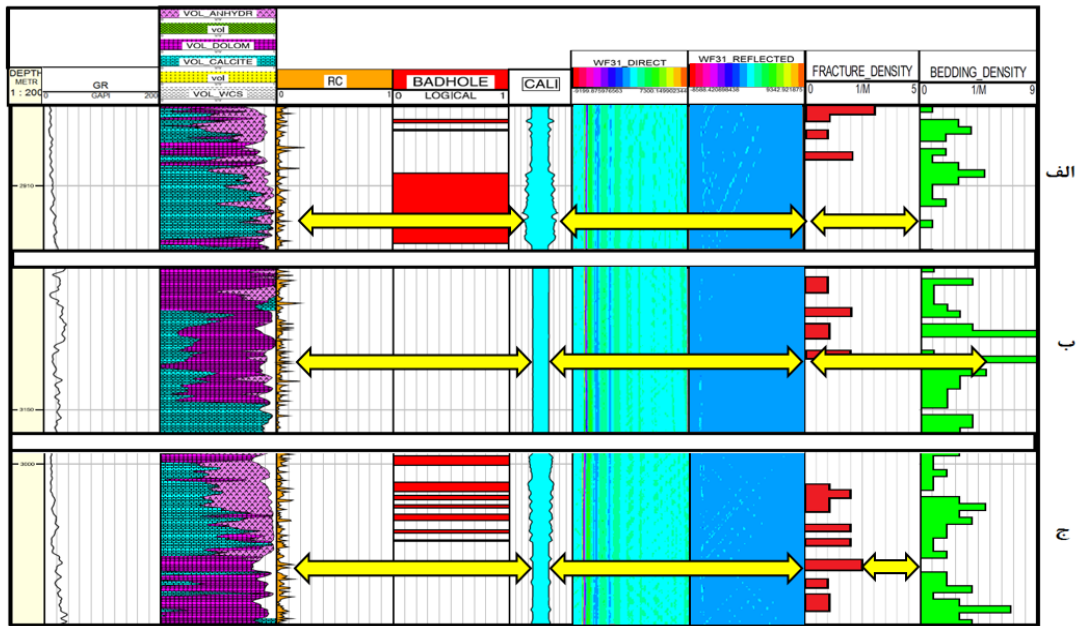
قسمت سوم: وجود شکستگی‌های تراوا به تنهایی می‌تواند باعث ایجاد پیک‌های متوالی در نگار ضرایب بازتاب شود. با دقت در قسمت (ج) از شکل ۹ می‌توان دریافت، وجود شکستگی در عمق مشخص شده علت اصلی بازتابش امواج

استونلی است. تغییرات لیتولوژیکی و همچنین ریختگی‌های شدید دیواره‌ای در این عمق صفر است.

قسمت چهارم: در مکان‌هایی که نگار ضرایب بازتاب پیک‌های به شدت بالایی را نشان می‌دهد، وجود دو یا سه عامل ذکر شده در قسمت‌های قبل به صورت هم‌زمان مورد تأیید قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در قسمت (الف) از شکل ۱۰، به علت وجود چگالی بالای شکستگی‌ها و تغییرات لیتولوژیکی شدید در یک عمق معین، ضرایب بازتاب بسیار شدیدی به وجود آمده است. همچنین در قسمت (ب) از شکل ۱۰، وجود ریختگی‌های شدید دیواره چاه و تغییرات لیتولوژیکی در یک عمق مشخص، باعث تشدید ضریب بازتاب در آن عمق گشته است. لازم به ذکر است در بسیاری از موارد وجود هم‌زمان چگالی بالای شکستگی‌ها با تغییرات لیتولوژیکی یا ریختگی‌های دیواره‌ای، منجر به تولید ضریب بازتاب شدیدی نمی‌گردد. علت این مسئله ناتراوایی شکستگی‌ها در آن عمق از چاه است.

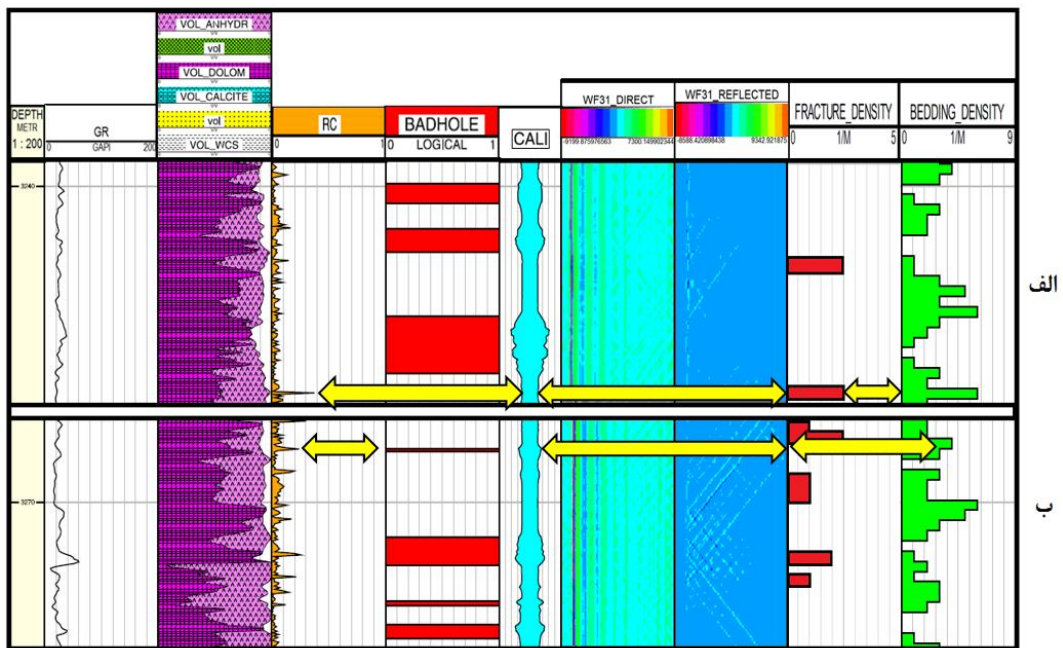
۳. نتیجه‌گیری

به دلیل اهمیت بالای شکستگی‌های تراوا در ازدیاد برداشت، شناسایی این‌گونه شکستگی‌ها از اولویت‌های اساسی به شمار می‌رود. روش‌هایی همچون نگاربرداری تصویری و مغزه‌برداری دقت بسیار بالایی در شناسایی شکستگی‌ها دارند اما قادر به تفکیک شکستگی‌های تراوا از شکستگی‌های ناتراوا نیستند. به همین دلیل استفاده از روش‌های مکملی نظیر به کارگیری امواج استونلی با استقبال فراوانی روبه‌رو شده است. در این مقاله از داده‌های کامل یک چاه هیدروکربنی در جنوب ایران استفاده شده است. از مقایسه ضرایب بازتاب به دست آمده از امواج استونلی با شکستگی‌های شناسایی شده توسط نگار تصویری FMI، شکستگی‌های تراوای موجود در دیواره‌ی چاه از شکستگی‌های ناتراوا تفکیک گردیده است. البته توجه به چگالی تغییرات لیتولوژیکی و ریختگی‌های شدید دیواره‌ای در این‌گونه تفاسیر امری ضروری است.



شکل ۹. در قسمت (الف)، ریختگی شدید دیواره‌ای، در قسمت (ب)، چگالی بالای تغییرات لیتولوژیکی و در قسمت (ج)،

وجود شکستگی‌های تراوا به تنهایی باعث ایجاد پیک در ضرایب بازتاب گردیده است.



شکل ۱۰. در قسمت (الف)، وجود هم‌زمان چگالی شکستگی و تغییرات لیتولوژیکی بالا و در قسمت (ب) وجود هم‌زمان

ریختگی دیواره‌ای و تغییرات لیتولوژیکی فراوان، موجب پیدایش پیک‌های بسیار شدید در ضرایب بازتاب گشته است.

۴. مراجع

- Arroyo franco, J., Mercado ortiz, M., Renlie, L., & Williams, S. (2006). Sonic investigations in and around the borehole. *Oilfield review*, 14-33.
- Bratton, T., Nelson, R., Schoderbek, D., & Hunt, D. (2006). The nature of naturally fractured reservoirs. *Oilfield review*, 4-23.
- Cheng, C., Zhang, J., & Burns, D. (1987). Effects of in situ permeability on the propagation of stoneley wave in a borehole. *Geophysics*, 1279-1289.
- Close, D., Cho, D., Horn, F., & Edmundson, H. (2009, may). The sound of sonic: a historical perspective and introduction to acoustic logging. *Schlumberger*, 34, 34-43.
- Ciuperca, C., Badulescu, C., Niculesco, B., & Negut, A. (2017, November). Identification Of Open Fractures Using Conventional Wireline Logs, Borehole Imaging And Stoneley Waves. *9th congress of the Balkan Geophysical Society*.
- Escandón, C., & Montes, L. (2010). Detecting and characterizing fractures in sedimentary deposits with stoneley waves. *Ciencia, tecnología y futuro*, 7-19.
- Hornby , E., Johnson , D., winkler , K., & plumb, R. (1989). Fracture evaluation using reflected stoneley-wave arrivals. *Geophysics*, vol54, 1274-1288.
- Hsu, K., Brie, A., & Plumb, R. (1987). A new method for fracture identification using array sonic tools. *Journal of petroleum technology*, 39(06).
- Paillet , F., & White , J. (1982). Acoustic modes of propagation in the borehole and their relationship to rock properties. *Geophysics*, 1215-1228.
- Rosenbaum, J. H. (1974). Synthetic microseismograms: logging in porous formations. *Geophysics*, 39, 14-32.
- Sinha, B., Plona, T., haldorsen, J., & winkler, K. (2006). Borehole acoustic waves. *Oilfield review*, 34-43.
- Yue, C., & Yue, X. (2017). Simulation of acoustic wave propagation in a borehole surrounded by cracked media using a finite difference method based on hudson's approach. *Journal of geophysics and engineering*, 633-640.