

استفاده از نگار DSI به منظور تعیین ناهمسان‌گردی مخزن و جهت پیشینه تنش درجا

محمد صفرخان موذنی^{۱*}، بهمن سلیمانی^۱، فرهاد خوشبخت^۲ و محسن عزتی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- مطالعات مخازن، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۸

چکیده

ناهمسان‌گردی نشان دهنده تغییر یک یا چند خاصیت از ماده بر حسب جهت است. تعیین دقیق ناهمسان‌گردی در مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی، ژئوفیزیک مخزن، شناسایی مسیر مناسب برای حفاری چاه و جلوگیری از بروز مشکلاتی نظیر مشکل تولید ماسه بسیار مهم است. ابزار DSI کندی امواج برشی را در دو جهت عمود بر هم، به موازات محور چاه اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از نگار DSI و تکنیک ریاضی چرخش آلفورد، می‌توان زون‌های ناهمسان‌گرد و همچنین جهت پیشینه تنش درجا را تعیین نمود. میزان اختلاف بیشتر میان نگار حداقل و حداکثر انرژی به خصوص در شرایطی که نگار حداقل انرژی میزان کمی داشته باشد، نشان دهنده زون‌های با ناهمسان‌گردی چشمگیر است. در این مطالعه ناهمسان‌گردی یک مخزن کربناته بررسی و جهت پیشینه تنش درجا تعیین شده است. در بازه مورد بحث زون‌های همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد، از یکدیگر تفکیک گردید. جهت پیشینه تنش درجا حاصل از DSI در راستای E30N به دست آمد که با جهت N30E به دست آمده از FMI (N ۱۹ E) و پیشینه تنش در زاگرس مطابقت دارد.

کلمات کلیدی: DSI، ناهمسان‌گردی، چرخش آلفورد، امواج استونلی، پیشینه تنش درجا

مقدمه

کمیت تراوایی، در الکتریسیته به کمیت رسانایی الکتریکی و گذردهی الکتریکی و در امواج الکترومغناطیس به نفوذپذیری الکتریکی بستگی دارد [۳]. در آغاز دهه ۱۹۵۰، مفهوم ناهمسان‌گردی لرزه‌ای در اکتشاف، به خصوص در ارتباط با محیط‌هایی شامل لایه‌های نازک و همچنین در مورد همسان‌گردی عرضی بررسی شد [۴]. البته تعیین مقدار ناهمسان‌گردی با روش‌های اندازه‌گیری در آن زمان قابل تشخیص نبود. در حقیقت آغاز به کارگیری ناهمسان‌گردی در اکتشافات، بر پایه مطالعات انجام شده در دهه ۱۹۸۰ می‌باشد. در آن هنگام دو مقاله بنیادین از سوی تامسون [۵] و آلفورد [۶] به چاپ رسید.

در قرن نوزدهم، فیزیک‌دانان انتشار امواج در محیط ناهمسان‌گرد را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۸۷۹ روتلگ عبارت ناهمسان‌گردی را اولین بار برای توصیف خواص انتشار نور در بلورها مورد استفاده قرار داد [۱]. ناهمسان‌گردی نشان دهنده تغییر یک یا چند خاصیت از ماده بر حسب جهت است [۲]. این خاصیت در حوزه‌های متفاوت به عوامل ساختاری محیط وابسته است. مثلاً در ارتباط با امواج لرزه‌ای به ضریب کشسانی، در شماره‌ها به

*مسئول مکاتبات

DSI و مشبک کاری در جهت عمود بر آن می توان تولید ماسه را تا حد زیادی کاهش داد [۸].

روش مطالعه

در این مطالعه با استفاده از لاگ های عادی، مدل پتروفیزیکی مخزن ایجاد و ستون لیتولوژی در چاه ترسیم گردید. با استفاده از داده های حاصل از مد ۳ ابزار DSI، نگار زمان عبور موج استونلی استخراج گردید و تراوایی سازند با استفاده از روش کالیبراسیون FZI محاسبه و به صورت نگار تراوایی در برابر عمق ترسیم شد. با استفاده از تکنیک ریاضی چرخش آلفورد، ناهمسان گردی مخزن محاسبه شد. سپس زون های ناهمسان گرد مخزنی شناسایی و جهت بیشینه تنش در جای میدان تعیین گردید. با توجه به اینکه ابزار DSI در حین برداشت اطلاعات در چاه، حول محور خود می چرخد؛ در ابتدا این چرخش از داده های خام حذف گردید. این کار با به کارگیری نگار چرخش دستگاه انجام پذیرفت. در نهایت تراکم شکستگی، لایه بندی و جهت بیشینه تنش محاسبه شده حاصل از نگار تصویرگر FMI^۶ با نتایج به دست آمده تلفیق گردید.

معرفی ابزار DSI

در سال ۱۹۹۰ ابزار DSI به منظور مطالعه ناهمسان گردی سازندهای درون چاه، تولید شد. دستگاه DSI با دارا بودن دو فرستنده و مجموعه ای از گیرنده های عمود بر هم قادر به اندازه گیری کندشدگی^۷ موج برشی در دو جهت می باشد. ابزار DSI دارای ۸ ایستگاه دریافت کننده با آرایش خطی، یک فرستنده تک قطبی و دو فرستنده دو قطبی است. شکل ۱ شمایی از ابزار DSI را نشان می دهد.

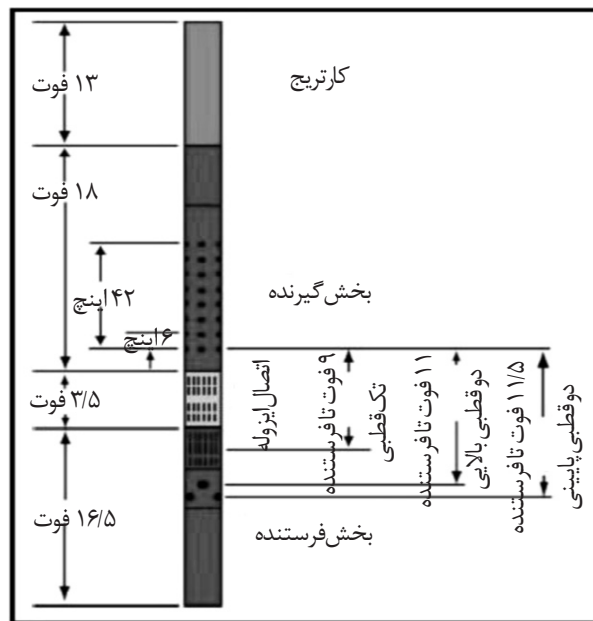
مدهای ابزار

ابزار DSI دارای مدهای متعددی است که در هنگام چاه نگاری، بسته به اطلاعات مورد نیاز، تعداد مدها تعیین می شود. مهم ترین و پرکاربردترین این مدها شامل موارد زیر می باشد:

1. Fast
2. Slow
3. Polarization
4. Dipole Sonic Shear Imager
5. Array Induction
6. Formation Micro Imager
7. Slowness

تامسون روابط میان پارامترهای ناهمسان گردی را برای ناهمسان گردی های ضعیف بیان کرد. تکنیک ارائه شده توسط آلفورد که بعدها به چرخش آلفورد شهرت یافت، مبنای محاسبه پارامتر ناهمسان گردی در درون چاه قرار گرفت. هنگام عبور موج برشی از سازند ناهمسان گرد، به دلیل اینکه سازند در یک جهت متراکم تر، از جهات دیگر است، امواج برشی در امتداد متراکم تر سریع تر حرکت کرده و موج برشی به دو مولفه تند^۱ و کند^۲ قطبی شده^۳ می شود. با استفاده از داده های حاصل از ابزار DSI^۴ و بهره بردن از تکنیک ریاضی چرخش آلفورد، می توان ناهمسان گردی برشی سازند را در درون چاه محاسبه کرد. از دیگر روش های موجود جهت تعیین ناهمسان گردی مخزن می توان به آنالیز مغزه، لاگ های الکتریکی القایی آرایه ای^۵، داده های لایه آزمایی و چاه آزمایی و داده های لرزه ای اشاره کرد [۷]. مهم ترین عامل ایجاد ناهمسان گردی در مخازن هیدروکربوری، تنش های درجا، شکستگی های طبیعی و مرزهای لایه بندی مشخص می باشد. در این مطالعه ناهمسان گردی مخزن و همچنین جهت بیشینه تنش درجا با استفاده از نگار DSI مورد بررسی قرار گرفته است. با تعیین ناهمسان گردی مخزن، جهت بیشینه تنش موجود در میدان مشخص می گردد.

مطالعه ناهمسان گردی مخزن و تعیین جهت بیشینه تنش در موارد مختلفی از جمله تعیین وزن مناسب گل، ایجاد شکاف هیدرولیکی موثر، جلوگیری از بسته شدن شکاف های طبیعی مخزن و همچنین تعیین جهت بهینه مشبک کاری اهمیت دارد. محاسبه جهت بیشینه تنش در چاه های جهت دار و افقی به منظور تعیین مناسب ترین مسیر حفاری در میدان که منجر به پایداری دیواره چاه گردد و همچنین تعیین جهت حفاری در امتدادی که بیشترین شکستگی باز قطع شود، اهمیت فراوانی دارد. با حفاری در جهت عمود بر جهت بیشینه تنش، بیشترین شکستگی باز قطع خواهد گردید. یکی از مشکلات مهم در سازندهای سست و استحکام نیافته، مشکل تولید ماسه در هنگام برداشت نفت می باشد. در گذشته، در این سازندها برداشت موج برشی به دلیل سرعت کم این موج در سازندهای سست، امکان پذیر نبوده است. با تعیین جهت بیشینه تنش با استفاده از نگار



شکل ۱- شمایی از ابزار DSI و ابعاد آن [۹]

شکل موج‌های به دست آمده شامل چهار دسته خواهد بود. دو دسته از شکل موج‌ها توسط گیرنده‌های موازی با فرستنده‌های X و Y و دو دسته از شکل موج‌ها توسط گیرنده‌های عمود بر هر یک از فرستنده‌ها دریافت می‌شود. در نهایت در هر عمق ۳۲ موج کامل برداشت می‌گردد که به صورت XY، YX، XX و YY نمایش داده می‌شود. جهت اول نشان دهنده امتداد فرستنده و جهت دوم نشان دهنده امتداد گیرنده است.

در صورتی که جهات محورهای دستگاه نمودارگیری صوتی با جهات محورهای ناهمسان‌گردی هم‌راستا باشد، دستگاه می‌تواند مقدار و جهت ناهمسان‌گردی را مشخص کند. شکل ۳ یک محیط ناهمسان‌گرد را نمایش می‌دهد. ناهمسان‌گردی در این شکل در نتیجه حضور شکستگی‌ها^۱ و یا ریزش‌شکستگی‌های عمودی در امتداد محور Y سازند ایجاد شده است. به همین دلیل موج برشی تند که با طول موج بالاتری حرکت می‌کند، در جهت امتداد شکستگی‌ها قطبیده شده و موج برشی کند نیز در جهت عمود بر این راستا منتشر شده است.

از آنجایی که در اکثر موارد جهت داده‌های خام برداشت شده با جهت ناهمسان‌گردی سازند هم‌راستا نیست، با استفاده از تکنیک ریاضی چرخش آلفورد می‌توان محورهای دستگاه را بر جهات محورهای اصلی ناهمسان‌گردی منطبق کرد [۶].

مد استونلی M3

در این مد هشت شکل موج از فرستنده تک‌قطبی که در فرکانس پایین انرژی ساطع می‌کند، به دست می‌آید. این مد کندشدگی موج استونلی را به منظور تخمین تراوایی اندازه‌گیری می‌کند.

مد فشارشی و برشی M4

در این مد هشت شکل موج از فرستنده تک‌قطبی که در فرکانس بالا انرژی ساطع می‌کند، به دست می‌آید. این مد به منظور تعیین کندشدگی موج فشارشی و برشی سازند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مد دوقطبی متقاطع MX

در این مد در یک برداشت استاندارد مجموعاً ۳۲ شکل موج از هر دو فرستنده دوقطبی ثبت می‌گردد. این مد به منظور مطالعه ناهمسان‌گردی سازند استفاده می‌شود.

در این مطالعه از مد MX به منظور محاسبه ناهمسان‌گردی مخزن و همچنین تعیین جهت بیشینه تنش درجا به صورت پیوسته و در کل بازه نمودارگیری استفاده گردید. محاسبه تراوایی نیز با استفاده از مد M3 امکان‌پذیر شده است. شکل ۲ مدهای مختلف ابزار DSI را نمایش می‌دهد.

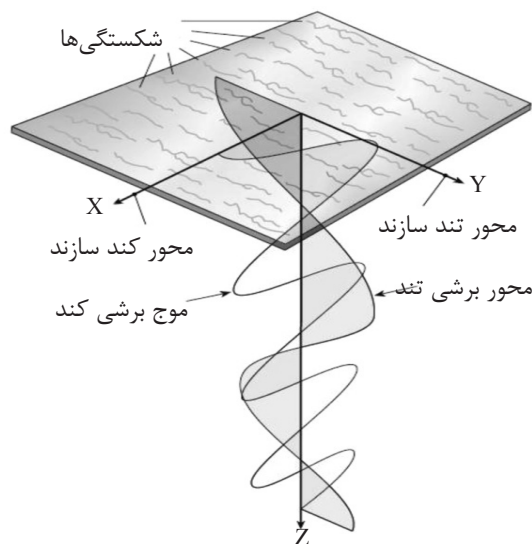
روش تعیین ناهمسان‌گردی مخزن

اندازه‌گیری‌های ابزار DSI شامل برداشت شکل موج‌ها در جهات موازی و عمود بر فرستنده‌ها می‌باشد [۹]. بنابراین

1. Microcracks

		S و P مد ۴	فرستنده تک قطبی با فرکانس بالا: Δt - فشارشی Δt - برشی در سازندهای تند
		استونلی مد ۳	فرستنده تک قطبی با فرکانس پایین: Δt - استونلی تراوایی
		استونلی مد ۲	فرستنده دو قطبی با فرکانس بالا و فرکانس پایین: Δt - برشی در تمامی سازندها
		دو قطبی بالایی مد ۱	
		گیرنده‌های مقاطع مد X	هر دو فرستنده دو قطبی: ناهمسان گردی
kHz ۳۰۰/۳ تک قطبی kHz ۱۵-۵ تک قطبی kHz ۵۰۰/۸ دو قطبی بالایی kHz ۵۰۰/۸ دو قطبی پایینی			

شکل ۲- مدهای مختلف ابزار DSI [۱۱]



شکل ۳- تفکیک موج برشی به دو مولفه در سازند انیزوتروپ [۱۱]

اختلاف انرژی دو گیرنده هم راستا حداقل می‌شود، مقدار چرخش موج‌های کامل برداشتی را نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان جهت و بزرگی ناهمسان گردی را در مخزن تعیین کرد [۷].

با محاسبه ناهمسان گردی، در نهایت دو نگار که نشان دهنده حداقل و حداکثر انرژی می‌باشد، به دست می‌آید.

با استفاده از این تکنیک جهت مبنای دستگاه در جهت محور اصلی ناهمسان گردی سازند قرار می‌گیرد. مبنای چرخش آلفورد بدین صورت است که در حالتی که جهات مختصات X و Y دستگاه هم‌راستا با جهت محور ناهمسان گردی سازند باشد، دو گیرنده هم راستا انرژی یکسانی خواهند داشت. بنابراین زاویه‌ای که در آن مقدار

حداکثر جهت تنش بسته و شکستگی‌های موازی با آن باز می‌شوند و یا باز باقی می‌مانند. در چنین محیطی امواج برشی تند در امتداد شکستگی‌های باز و در نتیجه بیشترین تنش موجود حرکت کرده و امواج برشی کند در جهت عمود بر آن و به موازات شکستگی‌های بسته حرکت می‌کنند.

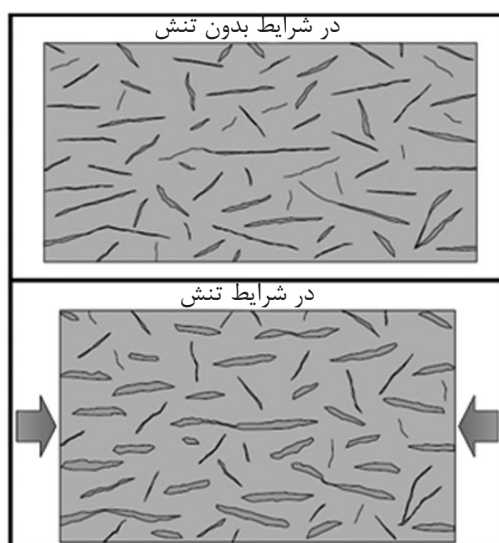
با تعیین ناهمسان‌گردی مخزن، راستایی که امواج برشی در آن راستا با سرعت بیشتری حرکت کرده‌اند، به صورت نگاری به نام AZIM_FAST نشان داده می‌شود. در حقیقت این نگار نشان دهنده راستایی است که سنگ‌ها در آن جهت متراکم‌تر بوده‌اند. بدین ترتیب در تمامی اعماق می‌توان جهت بیشینه تنش افقی را مشخص نمود.

با استفاده از جهت Breakout که در لاگ‌های تصویرگر قابل مشاهده است، می‌توان جهت بیشینه تنش درجا را در مخزن تعیین کرد. زمانی می‌توان از نگار FMI برای تعیین جهت بیشینه تنش درجا استفاده نمود که یکی از دو نوع شکستگی به وجود آمده پس از حفاری، یعنی Breakout و یا Induced Fracture در سازند تشکیل شده باشد. این شکستگی‌ها در تمام بازه نمودارگیری موجود نبوده و عواملی نظیر وزن گل، اختلاف مقدار تنش افقی حداقل و حداکثر، مقدار انحراف چاه از محور قائم و همچنین خواص الاستیکی سنگ در تشکیل این شکستگی‌ها و جهت آن‌ها مؤثر می‌باشد.

در سازند همسان‌گرد مقادیر ناهمسان‌گردی انرژی صفر می‌باشد. در سازندهای ناهمسان‌گرد مقدار قرائت به شدت ناهمسان‌گردی بستگی دارد. نگار حداقل انرژی نشان دهنده انرژی موجود در مولفه‌های متقاطع در حالتی می‌باشد که محور دستگاه با محور ناهمسان‌گردی سازند در یک جهت قرار گرفته باشد. در حالت ایده‌آل در سازندهای همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد، میزان انرژی حداقل برابر صفر می‌باشد. بنابراین، هر چه این نگار مقادیر کمتری را نشان دهد، به این معناست که بر اساس مدل چرخش آلفورد، انطباق بیشتری بین جهت ناهمسان‌گردی سازند و جهات اصلی دستگاه حاصل شده است. نگار حداکثر انرژی نیز نشان دهنده شدت ناهمسان‌گردی می‌باشد. میزان تفاوت بیشتر این دو نگار به خصوص در شرایطی که نگار حداقل انرژی میزان کمی داشته باشد نشان دهنده زون‌هایی با ناهمسان‌گردی چشمگیر می‌باشد. هر چند ناهمسان‌گردی انرژی به صورت کیفی است، اما کمتر تحت تاثیر اثرات جانبی حاصل از پردازش قرار می‌گیرد و جزء اندازه‌گیری‌های اساسی ناهمسان‌گردی محسوب می‌شود [۸].

چگونگی تعیین جهت بیشینه تنش درجا

در شکل ۴ می‌توان تاثیر فشار جهت‌دار را بر روی ریزشکستگی‌ها مشاهده کرد. در سنگی با ریزشکستگی‌های فراوان، شکستگی‌های باز می‌توانند در هر جهتی تشکیل شوند. با اعمال تنش جهت‌دار، شکستگی‌های عمود بر



شکل ۴- تأثیر تنش جهت‌دار در ایجاد انیزوتروپی در سنگ [۱]

نتایج و بحث

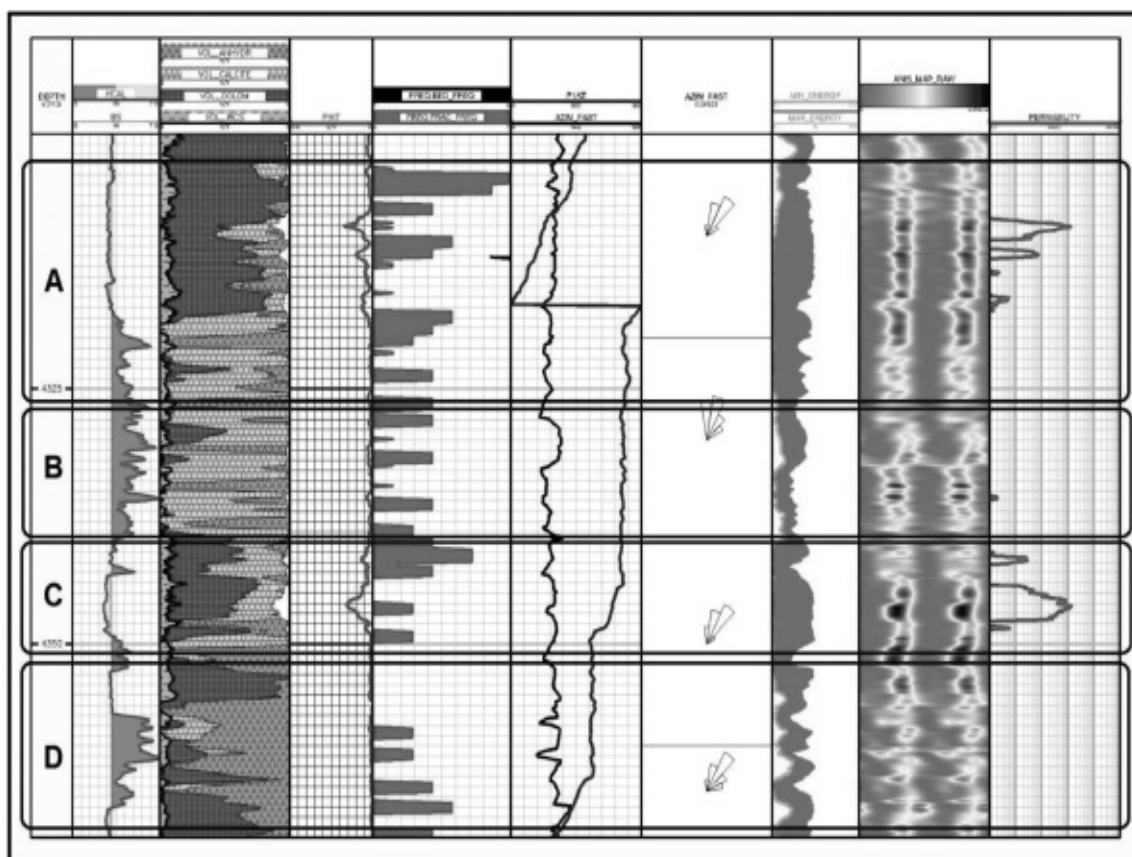
بررسی ناهمسان گردی مخزن

به منظور تعیین ناهمسان گردی سازند از تکنیک چرخش آلفورد استفاده گردید و نگارهای حداقل و حداکثر انرژی، نقشه ناهمسان گردی^۱ و جهت بیشینه استرس در مخزن تعیین شد. در شکل ۵ می توان بخشی از بازه مورد مطالعه را از عمق ۴۳۰۰ تا ۴۳۷۰ m مشاهده کرد. همان گونه که گفته شد، افزایش میزان تفاوت بین نگارهای حداقل و حداکثر انرژی به خصوص در شرایطی که نگار حداقل انرژی میزان کمی داشته باشد، نشان دهنده زون هایی با ناهمسان گردی چشمگیر می باشد. پس از تولید نگارهای حداقل و حداکثر انرژی، به منظور مطالعه بازه مورد بحث، زون های همسان گرد و ناهمسان گرد از یکدیگر تفکیک و به ترتیب زیر نام گذاری گردید. زون A (عمق ۴۳۰۳ تا ۴۳۲۶ m)، زون B (عمق ۴۳۲۶ تا ۴۳۴۰ m)، زون C (عمق ۴۳۴۰ تا ۴۳۵۱ m) و زون D (عمق ۴۳۵۱ تا ۴۳۶۹ m). زون های A و C، دارای ناهمسان گردی بالایی می باشند. در

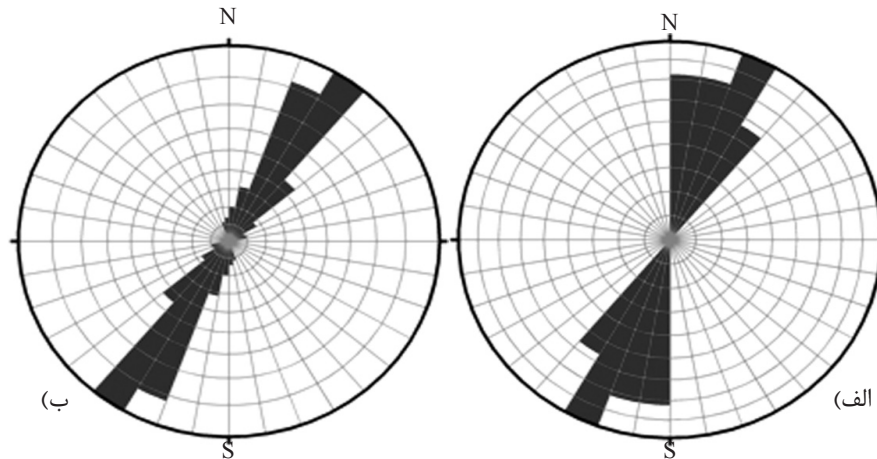
این دو زون نگار حداقل انرژی در حالت کمینه بوده و نگار حداکثر انرژی مقادیر بالایی دارد. نگار تراکم شکستگی حاصل از FMI نیز نشان دهنده تراکم شکستگی بیشتر در این دو زون می باشد. تراوایی بالای محاسبه شده از امواج استونلی و همچنین ایجاد سله گل در این دو زون، نشان از تراوا بودن شکستگی های تشخیص داده شده دارد. این دو زون در دو لایه دولومیتی که دارای تخلخل مناسب نیز می باشند، واقع شده اند. در زون های B و D در بعضی از عمق ها، نگار حداکثر انرژی ناهمسان گردی بالایی را نشان می دهد، اما به دلیل نوسان شدید نگار حداقل انرژی و کمینه نبودن مقادیر این نگار، می توان گفت این دو زون ناهمسان گردی بالایی ندارند. همچنین این دو زون تخلخل و تراکم شکستگی کمتری را نشان داده و فاقد تراوایی می باشند.

جهت بیشینه تنش درجا

شکل ۶ نشان دهنده جهت بیشینه تنش حاصل از ابزار DSI و FMI می باشد که در کل بازه مورد مطالعه به دست آمده است.



شکل ۵- نگارهای ریزش دیواره چاه، لیتولوژی، تخلخل کل، تراکم شکستگی، چرخش دستگاه و جهت بیشینه تنش، حداقل و حداکثر انرژی، نقشه انیزوتروپی و نگار تراوایی محاسبه شده از موج استونلی



شکل ۶- رز دیاگرام بیشینه تنش حال حاضر مخزن حاصل از الف FMI و ب DSI

بودن این زون‌ها به دلیل ایجاد سله گل محتمل است که تروایی بالای محاسبه شده از امواج استونلی این مسأله را تایید می‌کند. این دو زون در دو لایه دولومیتی که دارای تخلخل مناسبی می‌باشند، واقع شده‌اند.

۳. در زون‌های B و D در بعضی از عمق‌ها نگار حداکثر انرژی ناهمسان‌گردی بالایی نشان می‌دهد اما به دلیل نوسان شدید نگار حداقل انرژی و کمینه نبودن مقدار آن این دو زون ناهمسان‌گردی بالایی ندارند. همچنین این دو زون تخلخل و تراکم شکستگی کمتری را نشان داده و فاقد تروایی می‌باشند.

۴. جهت بیشینه تنش درجا در میدان با استفاده از ابزار DSI محاسبه گردید و با جهت بیشینه تنش تشخیص داده شده از نگار FMI مقایسه شد. بیشینه تنش درجا حاصل از DSI در راستای E30N به دست آمد که با جهت N30E به دست آمده از FMI (N 19 E) و بیشینه تنش در زاگرس مطابقت دارد.

بیشینه تنش افقی حاصل از DSI راستای N30E و بیشینه تنش افقی حاصل از FMI راستای N19E را نشان می‌دهد. داده‌های DSI مربوط به ۴۳۸۶ نقطه و داده‌های FMI مربوط به ۲۰ مورد Breakout شناسایی شده در کل بازه نمودارگیری شده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. در بازه مورد بحث دو زون ناهمسان‌گرد و دو زون غیر ناهمسان‌گرد تشخیص داده شد. زون‌های A و C به عنوان دو زون با ناهمسان‌گردی بالا مشخص شد. در زون‌های A و C نگار حداقل انرژی در حالت کمینه می‌باشد و نگار حداکثر انرژی مقادیر بالایی را نشان می‌دهد.
۲. نگار تراکم شکستگی حاصل از FMI حاکی از وجود تراکم بالایی از شکستگی در دو زون A و C می‌باشد. تراوا

مراجع

- [1]. Armstrong P., Ireson D., Chmela B., Dodds K., Esmersony C., Miller. D., Hornby B., Sayers C., Schoenberg. M., Leaney. S., and Lynn. H., The Promise of Elastic Anisotropy., Oilfield Review Vol. 6, No. 4, pp. 36-47, 1994.
- [2]. Winterstein D. f., "Velocity anisotropy terminology for geophysicists", Geophysics, Vol. 55, pp. 1070-1088, 1990.
- [3]. Schlumberger, *Fractured reservoir characterization using seismic anisotropy*, 2003.
4. Helbig K. and Thomsen L., "75-plus years of anisotropy in exploration and reservoir seismics: A historical review

of concepts and methods", Geophysics, Vol. 70, No. 9-23, 2005.

[5]. Thomsen L., "Weak elastic anisotropy", Geophysics, Vol. 51, pp. 1954-1966, 1986.

[6]. Alford R. M., "Shear Data in the Presence of Azimuthal Anisotropy", Dilley, Texas, 56th SEG Annual International Meeting, Houston, pp. 476-479, 1986.

[۷]. خوشبخت، ف.، ارزیابی ناهمسان‌گردی یک مخزن کربناته با استفاده از لاگ دو قطبی- برشی DSI، مجموعه مقالات سی‌امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۰.

[8]. Brie A., Endo T., Hoyle D., Codazzi D., Esmersoy C., Hsu K., Denoo S., Mueller M.C., Plona T., Shenoy R., and Sinha, B., "New Directions in Sonic Logging", Oilfield Review, Vol.4, No.1, pp. 40-55, 1998.

[9]. Brie A., Endo T., Johnson D. L., and Pampuri F., "Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves", SPE Reservoir Eval. Eng, Vol.3, No.2, pp. 109-117, 2000.

[10]. Esmersoy C., Kane M., Boyd A., and Denoo S., "Fracture and stress evaluation using dipole-shear anisotropy logs", Transaction of the SPWLA 36th Annual Logging Symposium, Paris, France. 1995.

[11]. Schlumberger Wireline and Testing, DSI Dipole Shear Sonic Imager. Houston, Texas, USA, 1995.