

## کاربرد نگار صوتی DSI برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ناهمسانگردی و جهت یابی تنش برجا در مخزن کربناته: مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غربی ایران

فرشید رومیانی<sup>۱</sup>، محمدحسین صابری<sup>۲\*</sup>، محمد علی ریاحی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶

### چکیده

امروزه اندازه گیری صوتی برشی دو قطبی بطور گسترده ای در صنعت نفت مورد استفاده قرار می گیرد و داده های ارزشمندی را برای تفسیر لرزه ای، ارزیابی سازندی و کاربردهای مکانیکی سنگ ارائه می دهد. داده های مورد استفاده از میدان سفیدزاخور در پهنه فارس گرفته شده است. در این مطالعه، کاربردهای مختلف پردازش مدهای لاگ صوتی برشی دو قطبی و لاگ تصویری به عنوان مکمل جهت ارزیابی ژئومکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. انواع ناهمسانگردی های حاصل از لاگ DSI محاسبه و با دیگر پدیده های ساختاری، آبشویی و لیتولوژی مقایسه گردید. برای نیل به این هدف ابتدا موج برشی به دو مولفه سریع و کند تفکیک و سپس بر مبنای اختلاف انرژی که دارند ناهمسانگردی مخزن تعیین شد. نتایج نشان داد که در اعماق پایین چاه حداقل انرژی در حالت کمینه و نگار حداکثر انرژی مقادیر بالایی دارد. مناطقی از چاه که حالت ریزشی هستند امواج عبوری پیک شدیدتری دارند که این باعث شده ناهمسانگردی در زون های شکستگی و ریختگی های دیواره افزایش یابد. فاکتورهای موثر بر بازتاب امواج استونلی و حضور ساختارهای جناغی نشانگر آن بود که ریختگی های دیواره چاه مهم ترین عامل تاثیرگذار برای ظهور آنهاست. با ارزیابی نتایج نگارهای صوتی و تصویری در زمینه تنش های برجا حداکثر جهت بیشینه تنش در امتداد NE-SW10 تعیین گردید. همچنین دو جهت بیشینه تنش NE-SW45 و SE-NW45 برای سازند مورد مطالعه مشاهده شد که با بیشینه تنش در زاگرس مطابقت دارد.

**کلید واژه ها:** لاگ صوتی برشی دو قطبی (DSI)، ناهمسانگردی، امواج استونلی، ساختارهای جناغی، تنش بیشینه برجا.

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی نفت دانشگاه سمنان

۲. استادیار، گروه اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران mh.saberi@semnan.ac.ir

۳. استاد تمام موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

در چند دهه اخیر، در طول سالیان با توجه به توسعه صنعت نفت، محاسبه بسیاری از پارامترها به ویژه آنالیزهای مکانیک سنگ و بررسی تنش‌های سازند، بیشتر مورد بحث قرار گرفته است. در اواخر دهه ۱۹۷۰، شرکت شلومبرژه برای اولین بار دستگاه نمودارگیری شکل موج صوتی را معرفی کرد که قادر بود داده‌های موج برشی را محاسبه کند، بنابراین امکان محاسبه پارامترهای مکانیک سنگ فراهم شد. پس از آن در اوایل دهه ۱۹۹۰ به منظور بهبود کیفیت داده‌های موج برشی، ابزار دو قطبی برشی را معرفی نمود (Shuwen, y. et al., 1995). تکنولوژی ابزار DSI (Dipole Shear Sonic Imager) قادر است امواج برشی را در سازندهای نرم همانند سازندهای سخت اندازه‌گیری نماید (Brie et al., 1995). این ابزار فناوری جدید فرستنده‌های دو قطبی (Dipole) را به همراه آخرین پیشرفت‌های فرستنده‌های تک قطبی (Monopole) در درون یک سیستم واحد دارا می‌باشد و بهترین روش قابل دسترس برای به دست آوردن کندشدگی (Slowness)، امواج استونلی، برشی و تراکمی است.

استفاده اصلی از اندازه‌گیری‌های ابزارهای صوتی تخمین کندی از سه موج اصلی اولیه (P, S, ST) تولید شده توسط یک منبع تک قطبی است (Bennett., 2019). کاربردهای گسترده ابزار صوتی دو قطبی در صنعت نفت آن را به یکی از ابزارهای محبوب تبدیل کرده است. موارد استفاده اصلی ابزار DSI عبارت انداز: آنالیز خواص مکانیکی سنگ، مطالعه پایداری چاه، تشخیص و ارزیابی شکستگی‌های طبیعی و ارزیابی لیتولوژی، تعیین کمی تراوایی و تخلخل، محاسبه ناهمسانگردی برشی سازند، و توصیف‌های ژئوفیزیکی شامل تفسیر لرزه‌ای برشی، سائزموگرام‌های مصنوعی برشی (Schlumberger., 2004).

یکی از پارامترهای اصلی مخزن ناهمسانگردی است که توسط مد X ابزار دو قطبی برشی محاسبه می‌شود. ناهمسانگردی نشاندهنده تغییر یک یا چند خاصیت از ماده بر حسب جهت است (Ezati., 2015). عمدتاً دلایلی نظیر شکستگی‌های

جهت‌دار، تنش‌های اصلی نابرابر، منافذ جهت‌دار و لایه‌بندی ساختارها منجر به ناهمسانگردی مخزن می‌شوند (De et al., 1997). با اندازه‌گیری جهت‌یابی امواج برشی می‌توان جهت و درجه ناهمسانگردی سازند را استنباط کرد (Zakharova and Goldberg., 2015). میتوان گفت در مناطقی از سازند که ناهمسانگردی وجود دارد، اندازه‌گیری چاه‌های انحرافی با پاسخ‌های مورد انتظار متفاوت خواهد بود (Hornby, Howie, and Ince., 1999). پارامتر دیگری که در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته و نقش مهمی در آنالیزهای ژئومکانیکی مخزن دارد تعیین جهت تنش بیشینه است. در سنگ مخزن دارای شکستگی و نیز سایر مخازن، تنش‌های برجا می‌تواند بر خواص مخزن و عملکرد آن تاثیر بگذارد.

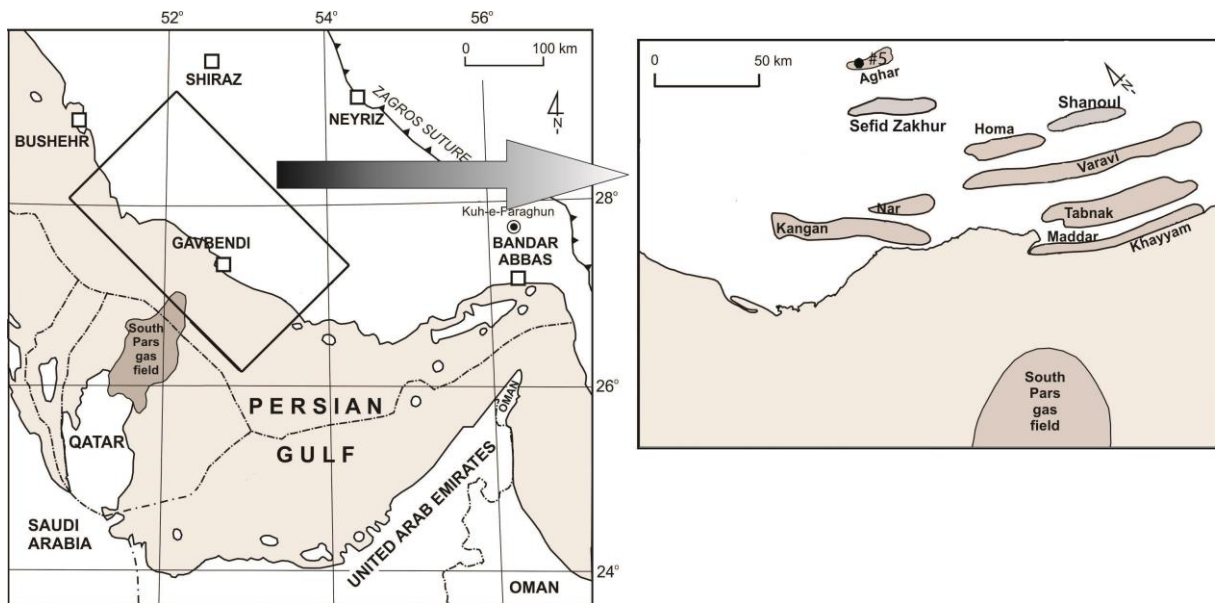
علاوه بر این نقش مهمی در مسائل مربوط به ثبات گمانه، بهره‌وری و تزریق دارند. محاسبه جهت تنش بیشینه در چاه‌های افقی و جهت دار به منظور تعیین مناسب‌ترین مسیر حفاری که منجر به پایداری دیواره چاه (Well Borehole Stability) گردد و همچنین تعیین جهت حفاری در امتدادی که بیشترین باز قطع شود، اهمیت فراوانی دارد (Ameen., 2003). امروزه در بحث چاه پیمایی مطالعات زیادی در زمینه آنالیز ناهمسانگردی و جهت‌یابی تنش و عوامل ایجاد کننده آنها صورت گرفته است (Brie, et al., 1998). (Lei, (Prioul, et al., 2010), (Khoshbakht, et al., 2009), (Ting et al., 2012), (Khoshbakht, et al., 2012).

## ۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

میدان مورد مطالعه در جنوب غربی ایران واقع شده و از لحاظ تقسیم بندی‌های ساختاری در پهنه فارس قرار دارد. این منطقه ادامه شمالی طول سازند سفیدزخور تقریباً ۴۰ کیلومتر و عرض آن ۸ کیلومتر است که سازندهای بختیاری، آغاجاری، میشان، گچساران و آسماری در آن رخنمون دارد و توسط تعدادی دیگری تاقدیس از جمله لار و هالگان احاطه می‌شود. قله غربی آن تقریباً امتداد شرقی - غربی دارد اما قله شرقی که تحت تاثیر گسل عرضی به پایین افتاده از روند معمولی

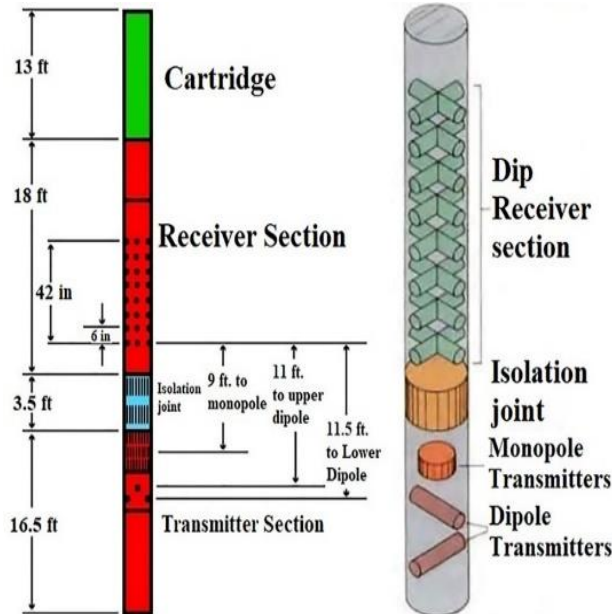
تقسیم‌بندی نمود. شکل چین‌خوردگی و مقدار فشردگی در این دو بخش متفاوت است. چین در بخش شرقی بازتر و تا حدودی جعبه‌ای شکل است در حالی که بخش غربی چین‌خوردگی فشرده‌تری دارد (سپهری و همکاران، ۱۳۹۵). سنگ مخزن این ذخائر واحدهای کربناته گروه دهرم به سن پرموتریاس هستند، که توسط شیل‌های ارگانیک سیلورین زیرین به عنوان سنگ منشأ شارژ شده و با تبخیری‌های تریاس به عنوان سنگ پوش پوشیده شده است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۳).

حوضه زاگرس یعنی شمال غربی - جنوب شرقی برخوردار است در بخش مرکزی پیشانی پهنه فارس واقع شده است (Sepehr and Cosgrove., 2004). تاقدیس سفیدزاخور یک ساختار نامتقارن با دو قله است که شیب دامنه شمالی آن بیشتر است. بخش شرقی نسبتاً متقارن بوده اما به سمت بخش غربی به تدریج بر عدم تقارن آن به سمت شمال افزوده می‌شود به نحوی که شیب یال شمالی آن ۳۵ تا ۵۵ درجه و شیب یال جنوبی آن ۲۰ تا ۴۰ درجه می‌گردد. بطور کلی آن را می‌توان به دو قسمت شرقی و غربی که توسط گسلی با راستای شمال غربی - جنوب شرقی از یکدیگر جدا شده‌اند



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی پهنه قدیمی فارس (پیشانی فارس مرکزی). موقعیت تاقدیس سفیدزاخور و همچنین محل میدان‌های گازی پرموتریاس مشخص شده است (Saberi and Rabbani, 2015)

### ۳. مواد و روش‌ها

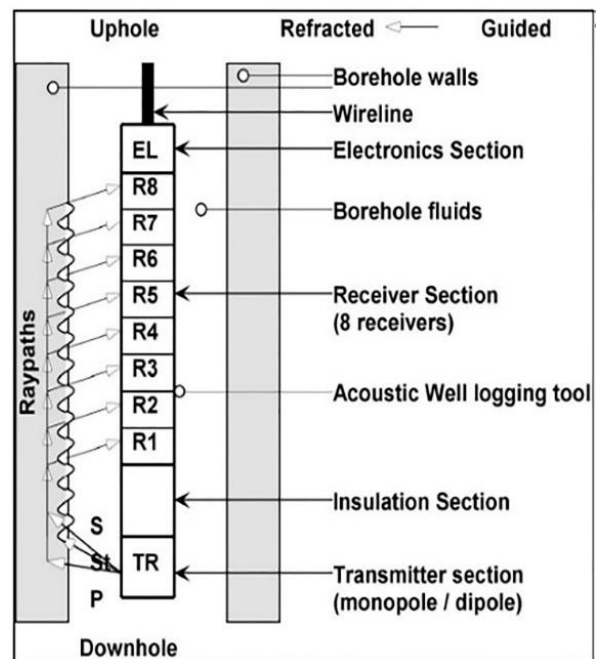


شکل ۳. شماتیکی از بخش‌های مختلف تصویرگر صوتی دو قطبی DSU همراه با فواصل میان گیرنده و فرستنده. ابزار شامل دو فرستنده دو قطبی (بالا و پایین) و یک فرستنده تک قطبی است (Serra., 2005).

بطور کلی ابزار DSU دارای شش مد می‌باشد که در هنگام چاه نگاری، بسته به اطلاعات مورد نیاز، تعداد مدها تعیین می‌شوند. سرعت چاه نگاری نیز بستگی به تعداد مدهای اندازه‌گیری شده دارد. بطوری که سرعت چاه نگاری با راندن تنها یک مد ۳۶۰۰ فوت بر ساعت و برای شش مد ۱۰۰۰ فوت بر ساعت خواهد بود (Liu., 2017).

لازم به ذکر است که مدهای ابزار هر کدام برای هدف مشخصی مناسب است. در این مطالعه از مدهای M5، M4، M6 برای آنالیز کندشدگی موج برشی و تراکمی، ارزیابی شکل موج‌ها و تعیین ناهمسانگردی مخزن و همچنین جهت‌یابی تنش بیشینه برجا استفاده شده است. شکل ۴ مدهای مختلف ابزار DSU را نشان داده است.

ابزار DSU دارای گیرنده‌های مختلفی هستند که با آرایش خطی (Linear Array) در هشت ایستگاه گیرنده آرایش یافته اند و یک فرستنده تک قطبی و دو فرستنده دو قطبی عمود برهم در این دستگاه تعبیه شده است. گیرنده‌های این ابزار قابلیت آرایش‌پذیری تک قطبی و دو قطبی را دارا هستند. نحوه آرایش گیرنده‌ها امکان نمونه برداری فضایی و گسترده‌تری را از تمام میدان موج منتشر شونده برای آنالیز شکل کامل موج (Full Wave Form) فراهم می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲. نحوه آرایش گیرنده‌های ابزار صوتی DSU برای دست‌یابی به مجموعه داده‌های شکل کامل موج (Chabot et al., 2001).

این ابزار قابل ترکیب با سایر ابزارهای چاه پیمایی است و باعث کم شدن زمان لازم برای نمودارگیری گردیده و اندازه‌گیری‌های معمولی صوتی را انجام می‌دهد بطوری که نتایج آن قابل مقایسه با ابزارهای صوتی قبلی است (Qobi., 2001).

#### ۴. بحث و نتایج

##### ۴-۱. استخراج نمودارهای زمان عبور امواج

در این پژوهش به منظور استخراج امواج عبوری تراکمی، برشی و استونلی از روش همدوسی (Coherency) زمان-کندی (STC) استفاده شد. با انجام پردازش همدوسی زمان-کندی می‌توان لاگ‌های "DtP" و "DtS" را از شکل موج‌های مد چهار استخراج کرد. روش STC از جهت یافتن بیشترین مقدار شباهت (Semblance) جستجو می‌کند.

ابتدا برش‌هایی از نمودار کندشدگی برای هر عمق در مقابل زمان گرفته شد و سپس این برش‌ها بر روی هم قرار گرفته تا نمودار STC رسم شود. این روش یک الگوریتم شبیه‌سازی مشابه با آنچه که در برنامه‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد را برای شناسایی ورودی‌های منسجم در آرایه گیرنده‌ها و برآورد کندی آنها بکار می‌گیرد. در نهایت با محاسبه نمودار تصویر STC نمودار پیوسته از مولفه‌های امواج تراکمی، برشی و استونلی بر حسب زمان گذر نسبت به عمق استخراج شد.

شکل ۶ نمودار STC مربوط به مدهای سه و چهار به همراه نمودارهای زمان عبور امواج استخراج شده برای هر سه موج مشاهده می‌شود. واضح است نمودار تصویر STC میانگین گیری شده کیفیت بالاتری را به خصوص در مناطقی که با ریزش همراه بوده نشان می‌دهد. همچنین با بدست آوردن این پارامتر، نمودار زمان عبور موج‌های فشاری، برشی و استونلی استخراج و مشخص گردید مناطقی از چاه که دارای ریزش هستند نمودارهای امواج عبوری پیک شدیدتری دارند.

##### ۴-۲. تعیین ناهمسانگردی مخزن

عمدتا دلایلی نظیر شکستگی‌های جهت‌دار، تنش‌های اصلی نابرابر، منافذ جهت‌دار و لایه‌بندی ساختارها منجر به ناهمسانگردی مخزن می‌شوند (De et al., 1997) و (Zakharova and Goldberg., 2015).

<b>P&amp;S Mode 4</b>	High frequency Monopole Transmitter: - $\Delta t_{\text{compressional}}$ - $\Delta t_{\text{shear}}$
<b>Stoneley Mode 3</b>	Low frequency Monopole Transmitter: - $\Delta t_{\text{stoneley}}$ - permeability
<b>Upper Dipole Mode 2</b>	Low frequency High frequency Dipole Shear Transmitter: - $\Delta t_{\text{shear}}$
<b>Lower Dipole Mode 1</b>	In all formation
<b>Both Cross-Receiver Mode X</b>	Both Dipole Transmitter: Anisotropy

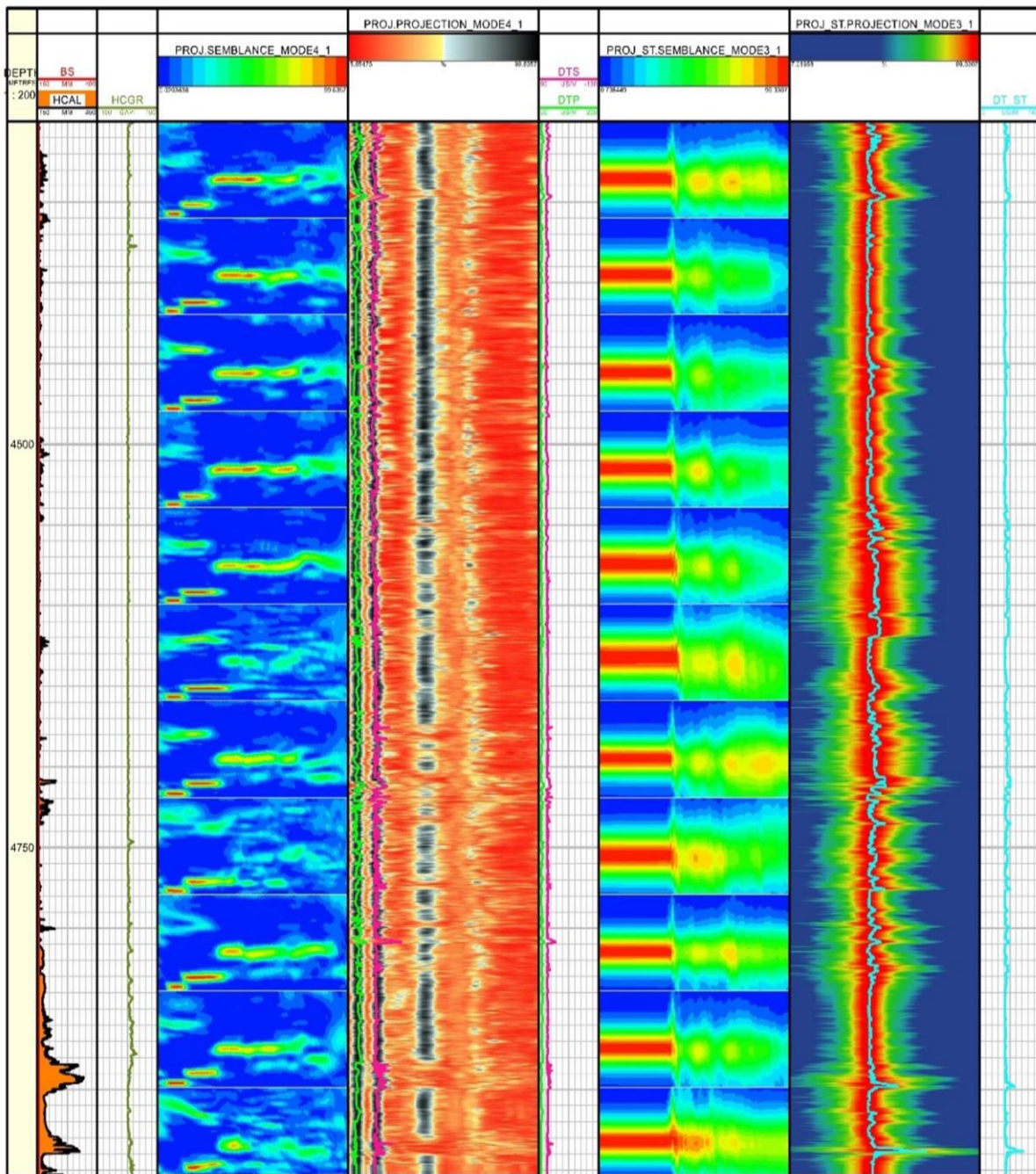
شکل ۴. مدهای ابزار DSI (مسلمان نژاد، ۱۳۸۴).

در این تحقیق از داده‌های مخزن سفیدزاخورد در چاه قائم شماره یک استفاده شد. با استفاده از اطلاعات حاصل از مد ۳ و ۴ ابزار دو قطبی DSI، نگار زمان عبور موج استونلی استخراج گردید. همچنین با استفاده از تکنیک ریاضی چرخش آلفورد، ناهمسانگردی مخزن محاسبه شد. سپس جهت‌یابی بیشینه تنش بر جای میدان و زون‌های ناهمسانگرد مخزنی شناسایی و تاثیر حضور شکستگی‌ها و لایه بندی بر روی آنها بررسی می‌شود. در نهایت به منظور صحت نتایج محاسبه شده از نگار تصویری FMI به عنوان مکمل استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات پتروفیزیکی چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. تمامی پردازش‌های انجام شده در این پژوهش توسط نرم افزار ژئولاگ نسخه ۸,۰ صورت گرفته است.

جدول ۱. میانگین پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه شده در

##### چاه مورد مطالعه

Effective porosity (V/V)	Water saturation (V/V)	Shale Vol. (V/V)
٪ 6.2	٪ 36	٪ 15



شکل ۵. نمایش اثر ریزش چاه در مقابل نمودار STC مربوط به مدهای ۳، ۴ و همچنین نمودارهای زمان عبور استخراج شده در آنالیز تابع هم‌دوسی

می‌شوند. در حالی که برک اوت در اثر استفاده از گل حفاری سبک روی دیواره چاه در محل تلاقی با تنش افقی حداقل ظاهر می‌شوند. برک اوت مستقل از سنگ‌شناسی، شیب، شکستگی‌های موجود یا گسل‌ها هستند و نشانگر جهت‌گیری میدان تنش کنونی می‌باشند. در این مطالعه برای شناسایی شکستگی‌های کششی و برک اوت از نمودار تصویری FMI استفاده گردید. همانطور که مشخص است شکستگی‌های کششی بصورت نماهای کاملاً مشخص و باریک توسعه یافته‌اند. اما برک اوت‌ها در دو قسمت متقابل از دیواره به صورت شکستگی یا ورقه‌ای شدن (Spaling) ایجاد گردیده‌اند.

در مرحله بعد با استفاده از نگارهای FMI و DSI، حداکثر جهت تنش بیشینه برجا حاصله مقایسه شده است. داده‌های FMI مربوط به ۱۴۰ عدد برک اوت در کل بازه نمودارگیری از چاه قابل تشخیص بود که حداکثر جهت بیشینه تنش امتداد NE-SW10 را نشان می‌دهد.

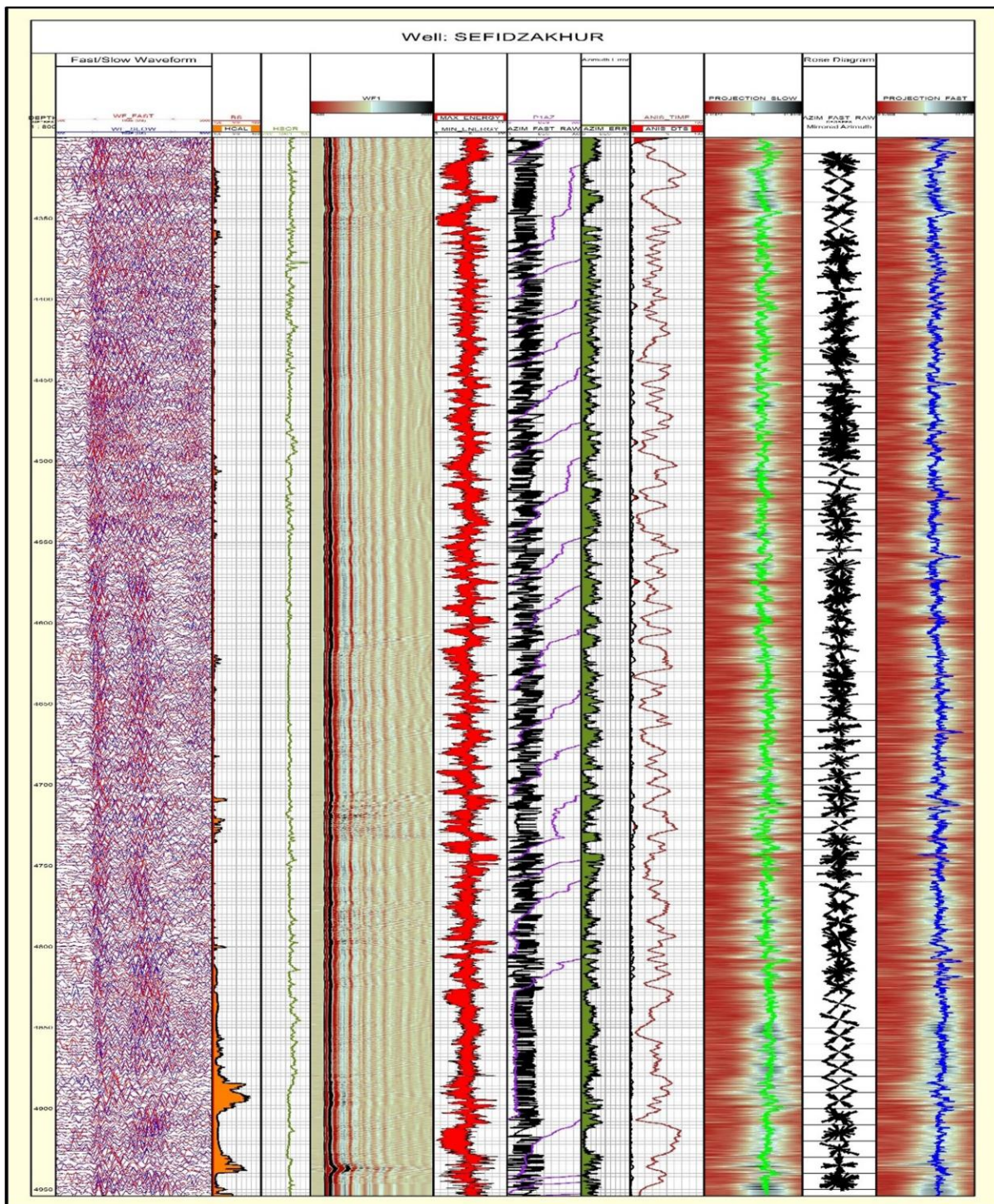
داده‌های DSI مربوط به ۲۱۰۱ نقطه در کل بازه نمودارگیری است که دو جهت بیشینه NE-SW45 و SE-NW45 را نشان می‌دهد. در چاه مورد مطالعه تنش افقی بیشینه در بیشتر جاها برابر با تنش قائم و تنش افقی کمینه کمتر از تنش افقی است. بر اساس این نمودارها برک اوت‌های شناسایی شده که بیانگر جهت کمترین تنش وارده بر حفره چاه ( $\sigma_h$ ) هستند دارای امتداد NW-SE و هم‌راستا با روند معمول زاگرس (شمال شرقی - جنوب غربی) می‌باشند. همچنین شکستگی‌های کششی که نشان‌دهنده تنش افقی حداکثر ( $\sigma_H$ ) هستند مانند ریزش‌های دیواره چاه دارای امتداد NW-SE می‌باشند. در مناطقی که دیواره گمانه تحت تاثیر پدیده‌های برک اوت و شکستگی کششی قرار گیرد، امتداد دیواره دستخوش تغییراتی می‌شود. در شکل ۹ میزان تغییرات آزمون این دو پدیده در عمق‌های مختلف چاه مورد مطالعه مقایسه شده است. تغییرات آزمون شکستگی‌های کششی در تمام زون‌های چاه تقریباً به صورت متناوب هست این در حالی هست که برک اوت در عمق‌های مختلف دارای مقدار تغییرات بالایی می‌باشند.

به منظور محاسبه و تعیین ناهمسانگردی مخزن نگارهای شکل موج مورد پردازش قرار گرفت. ساختارهای جناغی (Chevron Pattern) به عنوان نوفه (Noise) مشاهده می‌شوند ولی این نوفه‌ها به عنوان یکی از شواهد در شناسایی شکستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت اعمال فیلتر بر روی فرکانس و جدا کردن بخش فرکانسی مورد نظر از فیلتر فرکانس استفاده می‌شود. بر روی داده‌های مد ۳ نیز فیلتر برش بالای ۶ khz اعمال شد. همچنین از فیلتر F-K برای جداسازی مولفه‌های بالارو و پایین رو ساخت‌های جناغی استفاده شد. به دلیل تراکم شکستگی بالا و حضور ساخت‌های جناغی محاسبه شده از موج استونلی اعماق پایینی دارای ناهمسانگردی بالایی هستند. در برخی اعماق بالایی که ناهمسانگردی مخزن بطور کمی افزایش پیدا می‌کند انتظار می‌رود به جهت حضور ریزش‌های شدید چاه باشد. ریزش‌های متقارن دیواره چاه یکی از پدیده‌های مهم در ارزیابی ژئومکانیکی مخزن مورد مطالعه می‌باشد که امتداد آنها نشانگر جهت تنش افقی کمینه است.

در نهایت با محاسبه ناهمسانگردی سازند دو نگار که نشان‌دهنده حداقل و حداکثر انرژی است حاصل می‌شود. در حالت ایده‌آل، در سازندهای همسانگرد و ناهمسانگرد میزان انرژی حداقل برابر صفر می‌باشد. بدین ترتیب هرچه این نگار مقادیر کمتری نشان دهد به این معناست که انطباق بیشتری بین جهت ناهمسانگردی سازند و جهات اصلی ابزار حاصل شده است. در این تحقیق در اعماق پایینی چاه گراف نگار حداقل انرژی در حالت کمینه و نگار حداکثر انرژی مقادیر بالایی را نشان می‌دهد.

#### ۳-۴. شناسایی جهت تنش‌های برجا

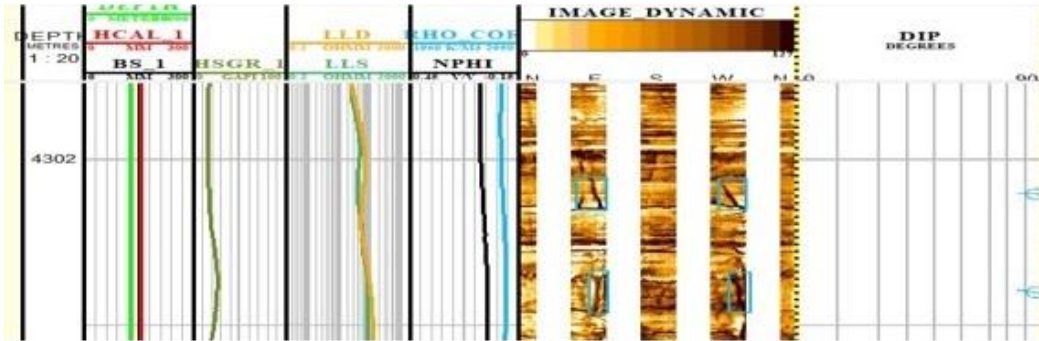
شکستگی‌های کششی (Induced Fracture) و گسیختگی دیواره چاه یا برک اوت‌ها (Breakout) دو پدیده مهم زمین‌شناسی هستند که با استفاده از آنها تنش‌های برجا آنالیز می‌شود. شکستگی‌های کششی به صورت نماهای کاملاً مشخص و باریک توسعه می‌یابند. تقریباً موازی با محور گمانه هستند. در چاه‌های عمودی با محل تلاقی جهت تنش افقی حداکثر ظاهر



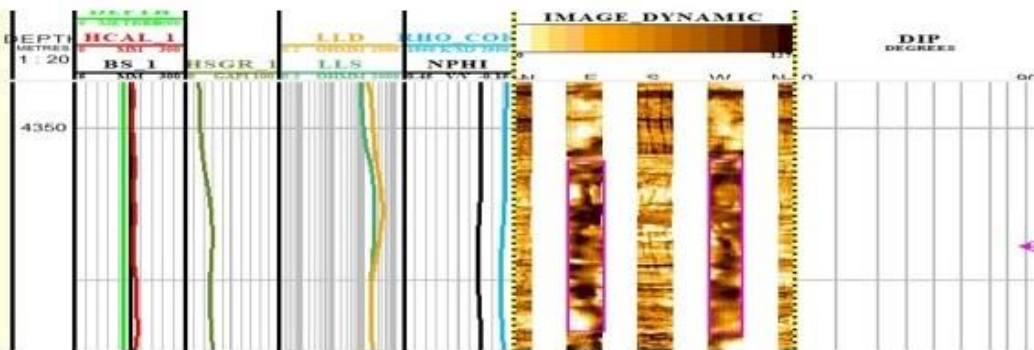
شکل ۶. استخراج پارامترهای ژئومکانیکی در چاه مورد مطالعه. نگارهای شکل موج کند و سریع، ریزش دیواره چاه و گاما، ساخت‌های جناغی، حداقل و حداکثر انرژی، چرخش ابزار و جهت بیشینه تنش حاصل از موج استونلی



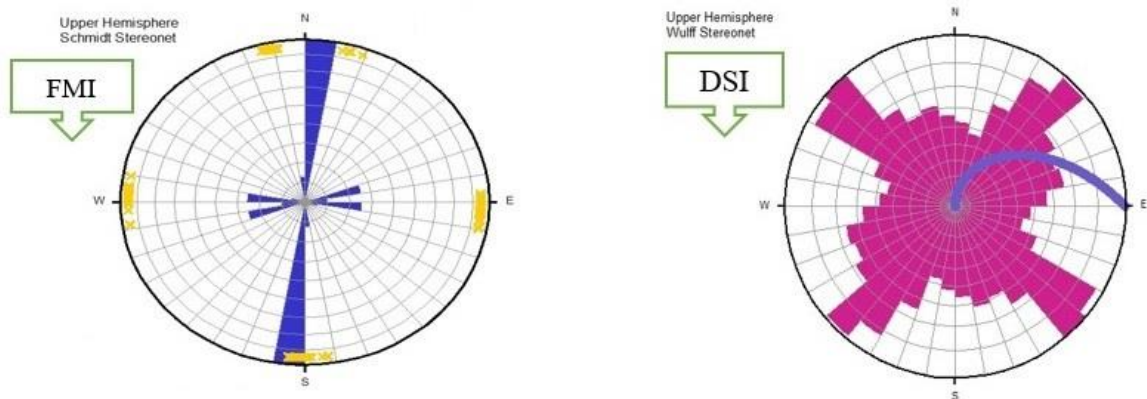
Tensile fracture



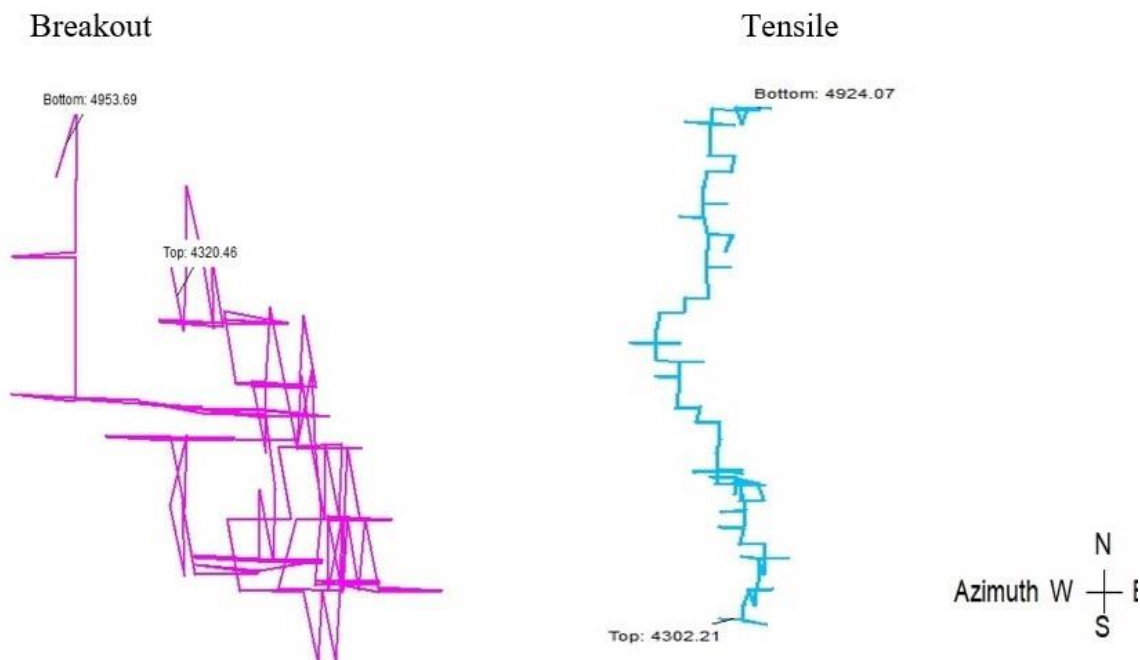
Breakout



شکل ۷. نمونه‌ای از شکستگی کششی ناشی از حفاری و برک اوت‌ها در مخزن مورد مطالعه



شکل ۸. رز دیاگرام حداکثر جهت تنش بیشینه در مخزن با استفاده از نگار DSI و FMI



شکل ۹. شماتیک طرح بیرونی دیواره گمانه (Walkout plot) در ارتباط با پدیده های برک اوت و شکستگی کششی

هستند. در برخی اعماق که ناهمسانگردی مخزن بطور کمی افزایش پیدا می‌کند، می‌تواند به جهت حضور ریزش‌های شدید چاه باشد. تراکم شکستگی کمتر و همچنین تخلخل کمتر موجب همسانگردی مخزن شده بود.

• جهت‌یابی بیشینه تنش برجا در میدان با استفاده از ابزار DSI محاسبه و با جهت بیشینه تنش تشخیص داده شده از نگار FMI مقایسه شد. داده‌های FMI مربوط به ۱۴۰ عدد برک اوت در کل بازه نمودارگیری از چاه قابل تشخیص بود که حداکثر جهت بیشینه تنش امتداد NE-SW10 را نشان می‌دهد. داده‌های DSI مربوط به ۲۱۰۱ نقطه در کل بازه نمودارگیری است که دو جهت بیشینه NE-SW45 و SE-NW45 را نشان می‌دهد و با بیشینه تنش در زاگرس مطابقت دارد.

### ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، برای بررسی کارایی ابزار صوتی DSI در زمینه پارامترهای ژئومکانیکی، داده‌های مختلف مدهای این ابزار در یکی چاه‌های مخزن سفیدزاخور در یکی از میادین جنوب غرب ایران مورد پردازش و ارزیابی قرار گرفت.

- با محاسبه نمودار تصویر STC نمودار پیوسته از مولفه‌های امواج تراکمی، برشی و استونلی بر حسب زمان گذر نسبت به عمق استخراج شد. این نمودار تایید کرد که مکان‌هایی از چاه که دارای ریزش هستند نمودارهای امواج عبوری پیک شدیدتری دارند.
- انواع ناهمسانگردی‌های حاصل از لاگ DSI محاسبه و با دیگر پدیده‌های ساختاری، آبشویی و لیتولوژی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در اعماق پایینی چاه حداقل انرژی در حالت کمینه و نگار حداکثر انرژی مقادیر بالایی است. همچنین به دلیل تراکم شکستگی بالا و حضور ساختارهای جناغی محاسبه شده از موج استونلی، اعماق پایینی دارای ناهمسانگردی بالایی

## منابع

- مسلمان نژاد، ح، ۱۳۸۴، ارزیابی تراوایی با استفاده از امواج استونلی حاصل از ابزار DSI برای یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، ۱-۹۸ ص.
- نجفی، م، یساقی، ع، ورجس، ج، بحرودی، ع، شرکتی، ش، ۱۳۹۳، تحلیل ساختاری سه بعدی از تاقدیس سفیدزاخور در پهنه فارس، به منظور تعیین هندسه افق مخزن گازی پرموتریاس. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، (۱۰)، ۱۰-۱۸ ص.
- سپهری، ا.، حیدری، ا.، معتمدی، ح، عبادتی، ن، ۱۳۹۵، تحلیل شکستگی سازندهای هیدروکربوری میدان سفیدزاخور (جنوب فارس) و تاثیر آن در افزایش پتانسیل مخزنی. کنفرانس بین المللی نوآوری در علوم و تکنولوژی، بارسلون-اسپانیا، ۱-۲۵ ص.
- Ameen, Mohammed S. 2003, Fracture and In-Situ Stress Characterization of Hydrocarbon Reservoirs: Definitions and Introduction. Geological Society Special Publication, 209, 1-6.
- Aquila, F, Barajas, j, Mesa, H, Herrera, R, Kessler, C. 2003, Using Cross Dipole Sonic Anisotropy Data to Improve Reservoir Understanding in the Southern/Marine Areas of Mexico. In Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, , 1335-1346.
- Bennett, Nicholas N. 2019, 3D Slowness Time Coherence for Sonic Imaging. Geophysics 84(5), 179-189.
- Brie, A, F. Pampuri, A. F. Marsala, and O. Meazza. 1995, Shear Sonic Interpretation in Gas-Bearing Sands. In Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, , 701-710.
- Brie, A., Endo, T., Hoyle, D., Codazzi, D., Esmersoy, C., Hsu, K., Denoo, S., Mueller, M.C., Plona, T., Shenoy, R., Sinha, B. 1998. New Directions in Sonic Logging. Oilfield Review: 4, 40-55 .
- Chabot, L., D. C. Henley, R. J. Brown, and J. C. Bancroft. 2001, Single-Well Imaging Using the Full Waveform of an Acoustic Sonic. In 2001 SEG Annual Meeting, 583-600.
- De, G.S, Winterstein, D.F, Johnson, S.G, Higgs, W.G, Xiao, H. 1997, Predicting Natural or Induced Fracture Azimuths from Shear-Wave Anisotropy. Proceedings of the Middle East Oil Show, 163-170.
- Ezati, M, Soleimani B. 2015, Anisotropy and Maximum I-Situ Stress Determination Using DSI Log. 19.
- Hornby, B.E, Howie, J.M and Donald W. 1999, Anisotropy Correction for Deviated Well Sonic Logs: Application to Seismic Well Tie. SEG Annual Meeting, 464-471.
- Khoshbakht, F., Memarian, H., Mohammadnia, M., 2009. Comparison of Asmari, Pabde hand Gurpi formation's fractures, derived from image log. Journal of Petroleum Science and Engineering: 67, 65-74 .
- Khoshbakht, F., Azizzadeh, M., Memarian, H., Nourozi, G. H., Moallemi, S. A., 2012. Comparison of electrical image log with core in a fractured carbonate reservoir. Journal of Petroleum Science and Engineering: 86-87, 289- 296 .
- Lei, Ting & Sinha, Bikash & Sanders, Michael. (2012). Estimation of horizontal stress magnitudes and stress coefficients of velocities using borehole sonic data. Geophysics. 77. 181-. 10.1190/geo2011-0277.1. 1-181.
- Liu, H. 2017. Principles and Applications of Well Logging. Springer Principles and Applications of Well Logging, 1-363.
- Qobi, L. Atlas, B. and Kuijper, A. 2001, Permeability determination from Stoneley waves in the Ara group carbonates Oman, GeoArabia. 1-18.
- Rai, C.S, Hanson, K.A. 1988, Shear-Wave Velocity Anisotropy in Sedimentary Rocks: A Laboratory Study. Geophysics 53(6): 800-806.

- 
- Prioul, Romain and Jocker, J. 2010. Identification of elastic anisotropy mechanisms from a joint interpretation of borehole images and sonic logs. 1-15.
- Schlumberger, 2004, DSI Dipole Shear Sonic Imager. slb.com/rc. 1-2.
- Saberi, M. H., Rabbani, A. r., 2015, Origin of natural gases in the Permo-Triassic reservoirs of the Coastal Fars and Iranian sector of the Persian Gulf. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 26, 558-569.
- Shuwen, y. Guizhao, C. Yongmin, z. 1995, The Application of Acoustic Full Waveform Logging in Petroleum Engineering. society of petroleum engineers, 323-33.
- Sepehr, M. Cosgrove, J.W. 2004, Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. Marine and Petroleum Geology 21(7): 829-43 .
- Serra, O. Serra, L. 2005, Well Logging Data Acquisition and Applications. 1-675.
- Wang, Sheng and Tkalčić, Hrvoje. 2021. Shear- wave Anisotropy in the Earth's Inner Core. Geophysical Research Letters. 10.1029/2021GL094784. 1-14.
- Zakharova, N.V. Goldberg D.S. 2015, Data Report: Analysis of Shear Wave Anisotropy in Upper. Oceanic Crust, ODP/IODP Hole 1256D. 1-12.