

## تعیین جهت تنش‌های برجا در سازند آسماری تاقدیس رگ سفید با استفاده از نمودارهای تصویرگر

مهدی یوسفی

دانشجوی دکتر، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

سید مرتضی موسوی

استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

محمد مهدی خطیب

استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۲

mmoussavi@birjand.ac.ir

### چکیده

نمودارهای تصویرگر در تاقدیس رگ سفید، دو جهت تنش بیشینه افقی کنونی را نشان می‌دهند که تحت دو فاز تکتونیکی در دزفول جنوبی شامل چین خوردگی ناشی از همگرایی زاگرس و فعالیت مجدد گسل‌های پی سنگی توسعه یافته‌اند. در بخش شرقی شکستگی‌های کششی القایی و ریختگی‌ها به ترتیب آزیموت‌های N25 و N115 دارند. به دلیل عملکرد گسل امتداد لغز هندیجان-ایذه، چرخش راستگرد محور تاقدیس و تغییر در جهت شکستگی‌های القایی در بخش خمیده تاقدیس رخ داده است. از اینرو شکستگی‌های القایی در بخش غربی منحرف شده‌اند و امتداد N70E را نشان می‌دهند و همچنین ریختگی‌های چاه‌ها دارای امتداد N160 می‌باشند. میانگین جهات تنش افقی بیشینه کنونی در بخش‌های غربی و شرقی تاقدیس به ترتیب N25E و N70E می‌باشد. برآیند جهات تنش بیشینه افقی مشاهده شده در چاه‌های بخش غربی و شرقی تاقدیس رگ سفید در تطابق با جهات کوتاهشدگی افقی بدست آمده با استفاده از حل سازوکار کانونی زلزله‌ها و حرکت مطلق ورقه عربی در فروافتادگی دزفول می‌باشد. در اثر تجدید فعالیت گسل‌های راستگرد مثل هندیجان-ایذه، علاوه بر چرخش محور تاقدیس، جهت کلی کوتاه‌شدگی در چین‌های کمر بند زاگرس می‌تواند تغییر کند و به دو امتداد در فروافتادگی دزفول تجزیه گردد.

**کلمات کلیدی:** تاقدیس رگ سفید، گسل هندیجان-ایذه، نمودار تصویرگر، تنش برجا، شکستگی القایی

### مقدمه

از چاه‌های نفت در ایران موجود است (Heidbach et al., 2009). به علاوه همه داده‌های رایج تنش برای ایران از حل سازوکار کانونی زلزله‌ها از رخدادهایی بدست می‌آیند که عموماً در عمق ۱۰ کیلومتر یا بیشتر هستند به خصوص در مناطقی که احتمالاً توسط نمک یا گسل‌های کم زاویه جدایش یافته‌اند (Rajabi et al., 2010). علاوه بر این اکثر این حل سازوکار کانونی زلزله‌ها در امتداد مرز بین ورقه‌های عربی و اوراسیا قرار دارند و نگرانی‌هایی پیرامون اعتبار اطلاعات تنش ناشی شده از زلزله‌ها نزدیک مرز های ورقه‌ای وجود دارد (Heidbach et al., 2009). برای مثال جهات تنش‌های منتج شده از حل فوکال مکانیزم زلزله در امتداد پهنه گسلی سان آندریاس و گسل سوماتران بزرگ اغلب با داده‌های بدست آمده از صنایع نفتی و قابل اعتماد ناسازگار هستند (Zoback et al., 1987; Heidbach et al., 2010). در این مطالعه ما نمودارهای تصویرگر را برای بدست آوردن جهات تنش کنونی بوسیله ریختگی‌ها (borehole breakout) و شکستگی‌های القایی (induced fractures) در سازند کربناته آسماری میدان رگ سفید در فروافتادگی دزفول جنوبی بررسی می‌کنیم و این جهات کوتاه‌شدگی را با جهات کوتاهشدگی ناشی از سازوکار زلزله‌ها مقایسه می‌کنیم.

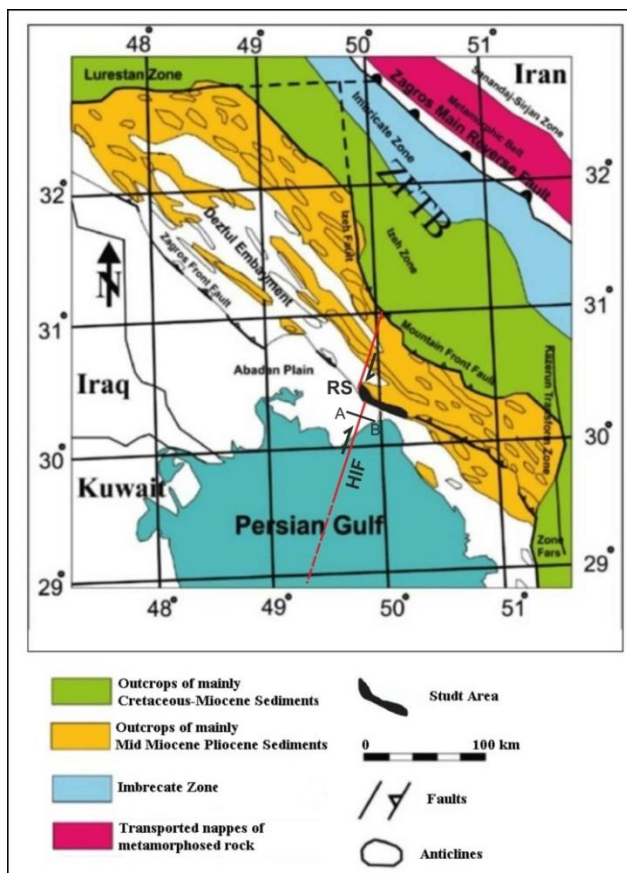
آگاهی از جهت تنش تکتونیکی زمان حال، موضوع مهم در حفاری‌های اکتشافی و تولید و به خصوص یک شاخص کلیدی در پایداری چاه، الگوی زهکشی و شنواری مخازن بطورطبیعی شکاف دار شده و شکستگی‌های هیدرولیکی می‌باشد (Tingay et al., 2009; Rajabi et al., 2010). حالت کنونی تنش بوسیله تعیین بردار تنش توصیف می‌شود. بطور معمول فرض شده است که یکی از تنش‌های اصلی به صورت قائم در حوضه رسوبی عمل می‌کند و بنابراین بردارهای تنش می‌توانند به ۴ مولفه ساده شوند (Bell, 1996; Tingay et al., 2009). از این ۴ مولفه، تعیین جهت تنش بیشینه افقی ( $S_{Hmax}$ ) توجهات زیادی را در ۲۰ ساله اخیر بخصوص برای کنترل تنش‌های برجا در جریان یافتن سیالات زیرسطحی و فعالیت مجدد گسل به خود جلب کرده است (Tingay et al., 2010). آگاهی از جهت تنش کنونی به خصوص برای ایران دارای اهمیت است که دارای اکتشافات هیدروکربونی بالغ و صنایع تولیدی بزرگی می‌باشد و همچنین در معرض تنش‌های وابسته به خطرات طبیعی از جمله زلزله می‌باشد (Rajabi et al., 2010).

تاکنون پایگاه داده‌های نقشه جهانی تنش اطلاعات بسیار کمی از وضعیت تنش کنونی برای ایران را ارائه داده است؛ مضاف بر اینکه داده‌های محدودی

### زمین شناسی ناحیه ای و ساختاری تاقدیس رگ سفید

فروافتادگی دزفول (شکل ۱) بخشی از پیش گودال (ForeDeep) زاگرس می باشد که در آن سازند آسماری فاقد رخنمون است. در مورد زمان شروع شکل گیری فروافتادگی دزفول، اگر چه قدیمی ترین شواهد حرکتی در کرتاسه بالایی دیده شده است اما بنظر می رسد ساختمان های درون این فروافتادگی و خطواره های محاط آن احتمالاً در تریاس و ژوراسیک فعال بوده اند که این فعالیت تا میوسن میانی همچنان ادامه داشته است. بنابراین در شکل گیری این فرو افتادگی و تکوین کمر بند چین خورده- تراستی زاگرس، گسل ها و خطواره های پی سنگی قطر- کازرون، ایذه، خمش های بالارود و جبهه کوهستانی موثر بوده اند (Sepehr and Cosgrove, 2004). از لحاظ ساختاری تاقدیس رگ سفید در بخش جنوبی فرو افتادگی دزفول از زیر پهنه زاگرس چین خورده قرار دارد. این تاقدیس به شکل بومرنگ در جنوب غرب ایران و در ۱۵۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز واقع شده است. رخنمون های سطح الارضی در این منطقه متشکل از تپه ماهوری های کم ارتفاع از سازند آغاچاری می باشد. سازند میشان فقط در دو پنجره فرسایشی

در امتداد بخش جنوب غربی ساختار دیده می شود و سازندهای قدیمی تر از میشان در سطح زمین رخنمون ندارند. این تاقدیس در افق مخزنی آسماری دارای طول تقریبی ۵۴ کیلومتر و عرض متغیر ۴ تا ۵/۵ کیلومتر در بخش جنوب شرق و ۵ تا ۸ کیلومتر در بخش شمال غرب می باشد. تاقدیس مذکور از نوع نامتقارن، و شیب زیاد در یال جنوب غربی متأثر از گسل های تراستی فراوان در یال جلویی می باشد. این تاقدیس بر روی افق آسماری دارای دو کوهانک یا برجستگی با دو روند محوری متفاوت می باشد: برجستگی یا کوهانک جنوب شرقی که کمترین عمق دسترسی به آن حدود ۱۷۵۰ متری زیر سطح دریا است و دارای روند محوری شمال غرب- جنوب شرق است که در منتهی الیه جنوب شرق توسط گسل عادی با جهت شیب احتمالی شمال شرق از تاقدیس بی بی حکیمه جدا می گردد. همچنین برجستگی یا کوهانک شمال غربی که کمترین عمق دسترسی به آن حدود ۱۳۴۰ متر زیر سطح دریا است و دارای روند تقریباً شمالی- جنوبی می باشد و روند محور تاقدیس نسبت به جهت عمومی میدان حدود ۳۰ درجه به سمت شمال چرخش پیدا کرده است.

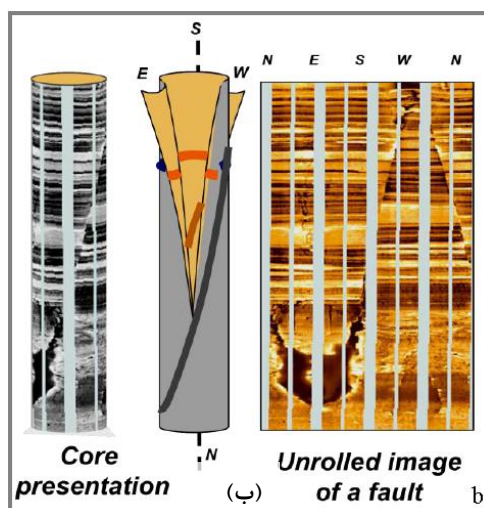
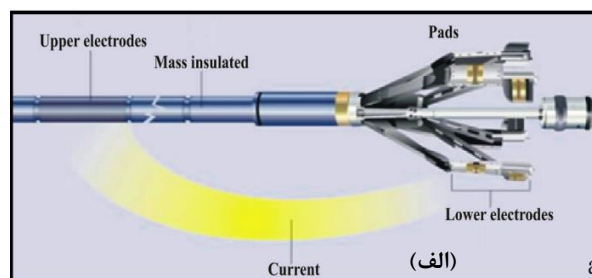


شکل ۱. نقشه زمین شناسی بخش جنوبی کمر بند زاگرس و موقعیت تاقدیس رگ سفید (Ganadian et al., 2017). امتداد AB، مکان نیمرخ بازتابی عمود بر گسل هندیمان-ایذه را نشان می دهند. HIF: گسل هندیمان- ایذه و RS: تاقدیس رگ سفید می باشند.

## روش مطالعه

تخلخل و محتوای سیال حساس هستند که شکستگی‌های طبیعی و فابریک سنگ را برجسته و نمایان می‌کنند. در این مطالعه نمودارهای تصویرگر با نرم افزار GEOMATRIX پردازش و تفسیر می‌شوند. زمانی که تصویر باز شود و در بازه آزیموتی ۰ تا ۳۶۰ درجه نمایش داده شود، شکستگی‌های خطی طبیعی که محور چاه را قطع می‌کنند، به صورت موج سینوسی تظاهر می‌یابند. نمایش دو بعدی تصاویر الکتریکی و صوتی دیواره چاه به شکل یک سیلندر باز شده می‌باشد که از شمال مغناطیسی (N) شکاف داده شده است. در این تصاویر عوارض صفحه‌ای (برای مثال مرزهای لایه‌بندی، گسل‌ها و شکستگی‌ها) که دیواره استوانه‌ای شکل چاه را با زاویه‌ای نسبت به افق قطع می‌کنند یعنی یک مولفه شیب دارند که به صورت منحنی سینوسی شکل تظاهر می‌یابند. دامنه این منحنی سینوسی تابعی از زاویه شیب است به شکلی که در یک چاه بدون انحراف، بزرگی شیب متناسب با دامنه سینوسی است و آزیموت شیب نیز به سمت پائین ترین نقطه موج سینوسی شکل قرار می‌گیرد (شکل ۲ ب). که نهایتاً اطلاعات اساسی را درباره سازند ها ایجاد می کند که دیگر نمودارهای تصویرگر قادر به ایجاد آن نیستند. تصاویر در محل چاه‌ها تولید می‌شوند و آنالیزها دقیق داده های تصاویر با نرم افزارهای قدرتمند انجام می‌شوند. هدف اصلی در این بخش مطالعه سیستماتیک ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی و تعیین جهت تنش‌های بیشینه افقی در سازند مخزنی آسماری در میدان رگ سفید است.

ابزار تصویرگر می‌تواند بطور وسیعی در محیط‌های زمین شناسی و حفاری بکار روند که تصاویری از بدنه سنگی چاه از کربناته های کارستیکی تا سکانس های شیلی ماری را تهیه می‌کنند. جنبه‌های کاربردی این ابزار تصاویر با کیفیت و پوشش کامل از درون چاه می‌باشد. نمودار تصویرگر یک تصویر از بدنه چاه است که خصوصیات دیواره چاه از جمله مقاومت الکتریکی و صوتی را نشان می‌دهد. در روش اول مقاومت دیواره چاه به تصاویری با وضوح بالا از دیواره چاه تبدیل می‌شوند. ۲، ۴، ۵ یا ۸ بالشتک در ابزارهای تصویری وجود دارد (شکل ۲ الف). هر بالشتک قسمت محدودی از دیواره چاه را پوشش می‌دهد (Serra, 1989). چیدمان الکترودهای EMI روی ۶ بازوی مستقل نصب شده اند که بهترین تماس بالشتک را ایجاد میکنند که این مورد تصاویری بسیار باکیفیت را برای آنالیزهای استراتیگرافیکی و ساختاری ایجاد می‌کنند (Serra, 1989). لایه بندی، شکستگی‌ها، گسل‌ها، رخساره‌های استراتیگرافیکی و بسیاری دیگر از ویژگی‌ها می‌تواند بطور دستی یا نیمه اتوماتیک تشخیص داده شوند (Ye and Rabiller, 1998). علاوه بر تشخیص شکستگی‌ها و گسل‌ها، ابزار تصویرگر چاه‌ها بطور معمول در تائید آنالیز مغزه گیری برای کاربردهای متنوع دیگر از جمله سکانس استراتیگرافی، بازسازی رخساره‌ای و آنالیزهای دیاژنتیکی استفاده می‌شوند (عقلی و همکاران، ۱۳۹۳). در کل، تصاویر الکتریکی نسبت به تنوع کانی شناسی و

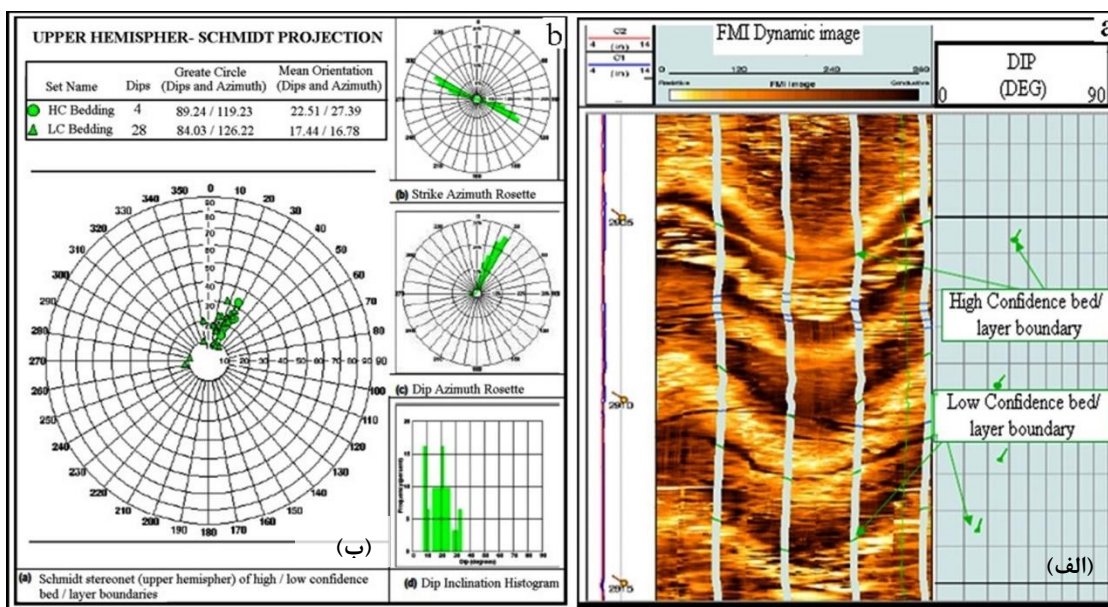


شکل ۲ (الف). ابزار FMI و بالشتک‌های آن (Soleimani et al., 2016). (ب) : تصویر دو بعدی برای محاسبه شیب و جهت شکستگی با استفاده از نمودار تصویرگر (Serra, 1989).

## توصیف ساختاری شیب

مرزهای لایه بندی در سکانس‌های کربناته به دلیل فرایندهای دیاژنتیکی در جهت تعیین شیب ساختاری، معمولا واضح و صفحه ای نیستند. در خطوط نمودارهای FMI و EMI، مشخص شدن سریع و اختلاف مقاومت به نسبت زیاد که همه تصاویر را قطع کند، برای شناسایی مرزهای لایه بندی قابل ارائه می‌باشند. این خطوط به راحتی از یک بالشتک به بالشتک دیگر قابل انطباق هستند و در تصاویر استاتیک آشکار و واضح هستند. خطوط این نمودارها مشابه سطوح یا مرزهایی هستند که دولایه یا لیتولوژی متفاوت را از هم جدا می‌کنند (Serra, 1989). دو روش برای تشخیص لایه بندی قابل شناسایی است: دسته اول که در آن شیب‌ها مشابه با مرزهای لایه بندی، آشکار و صفحه ای هستند و در دسته با اعتبار بالا قرار می‌گیرند (HC) در حالیکه در دسته دوم، شیب‌ها مشابه سطوح لایه بندی غیرآشکار و مبهم هستند و در دسته با اعتبار پایین قرار می‌گیرند (LC). از نمودارهای تصویرگر ۲ حلقه چاه در تاق‌دیس رگ سفید برای مطالعه سیستم‌های شکستگی وابسته به چین و گسل استفاده می‌کنیم. برای مثال نمودارهای تصویرگر چاه رگ سفید (RS-D) واقع شده در دامنه شمال شرقی ساختمان (شکل ۹)، جهت محاسبه ویژگی‌های هندسی مثل لایه بندی و الگوی شکستگی‌های برج‌ها نشان داده شده است. به جز بعضی فواصل کوتاه، تمام مقاطع نمودار

های سازند آسماری دارای لایه بندی به شکل مطبق هستند و از لایه‌های مقاوم و متخلخل آهکی با ضخامت‌های متفاوت تشکیل شده است (شکل ۳ الف). در مجموع ۳۲ مرز لایه بندی از نمودارهای تصویری FMI استخراج شد. اکثر مرزهای لایه بندی به اندازه کافی واضح نیست که عمدتاً به دلیل فرایندهای دیاژنتیکی قابل مشاهده نیستند. همانطور که گفته شد، از آنجایی که دقت شیب ساختاری وابسته به صفحه‌ای بودن و آشکاری مرزهای لایه بندی است، مرزهای لایه بندی در دسته‌های اعتبار بالا و کم اعتبار دسته بندی می‌شوند. در چاه رگ سفید (RS-D)، تعداد ۴ مرز لایه بندی واضح وجود دارد که در دسته با اعتبار بالا قرار می‌گیرد و ۲۸ مرز لایه بندی کمتر واضح و نسبتاً مبهم وجود دارد که در دسته کم اعتبار قرار می‌گیرند. از آنجایی که تعداد مرزهای لایه بندی با اعتبار زیاد کمتر هستند، بنابراین شیب‌های لایه بندی با اعتبار کم برای تعیین شیب ساختاری در نظر گرفته می‌شوند. در این چاه طرح‌های آماری شیب‌های لایه بندی در (شکل ۳ ب) نشان داده شده است که میانگین شیب ۲۲/۵ به سمت جهت N27E و امتداد لایه بندی N63W-S63E را نشان می‌دهد. همچنین نتایج تحلیل شیب نشان می‌دهد در چاه (RS-G) واقع در بخش غربی تاق‌دیس، میانگین شیب ۵۱ به سمت جهت S65W و امتداد لایه بندی N25W-S25E می‌باشد.



شکل ۳ الف). مرزهای واضح و صفحه ای، شیب‌های لایه بندی با اعتبار بالا (HC) را در سازند آسماری چاه رگ سفید (RS-D) را نشان می‌دهد. همچنین مرزهای ناآشکار و مبهم، شیب‌های لایه بندی با اعتبار کم (LC) را در سازند آسماری چاه رگ سفید (RS-D) نشان می‌دهد. (ب). طرح‌های آماری مربوط به شیب همه مرزهای لایه بندی با اعتبار کم اعتبار در سازند آسماری چاه رگ سفید (RS-D).

تعیین جهت تنش‌های برجا با استفاده از نمودارهای تصویرگر ریختگی چاه‌ها (borehole breakout) و شکستگی‌های القایی (induced fracture)، شاخص‌های مهمی برای تعیین جهت گیری تنش‌های افقی بخصوص در مناطق بی لرزه و عمق‌های متوسط (کمتر از ۵ کیلومتر) هستند. تقریباً ۱۹ درصد از نشانگرهای جهت گیری تنش در پایگاه داده‌های نقشه جهانی تنش از ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی مشخص شده‌اند. علاوه بر این ریختگی‌های چاه و شکستگی‌های القایی، اکثریت جهت گیری تنش در سیستم‌های نفتی و ژئوترمال را ایجاد می‌کنند (Tingay et al., 2008). ریختگی‌های چاه، طولیل شدگی القا شده در اثر تنش‌ها در مقطع چاه هستند (Bell, 1996). وقتی که حفاری صورت می‌گیرد در حقیقت میدان تنش را در منطقه محل حفاری بهم می‌ریزد. چاه که یک منطقه کم فشار محسوب می‌شود، در داخل سازند پرفشار حفاری شده است و از آنجایی که در عمق که تمامی منافذ با سیالات پر شده است، در نتیجه فشار هیدروستاتیک نقش اصلی را در تغییر شکل اطراف چاه بازی می‌کند. با توجه به اینکه همیشه سیالات تمایل دارند از محل پرفشار به محل کم فشار حرکت کنند. این پدیده باعث تغییر تنش برجا می‌شود. با فرض اینکه  $S_v$  تنش اصلی قائم است، پس تنش‌های مؤثر ( $\sigma_{ij} = S_{ij} - \delta_{ij} P_p$ ) در اطراف چاه قائم به شعاع R در دستگاه مختصات استوانه‌ای براساس فرمول معروف کرش (Kirsch) مطابق روابط زیر است (شکل ۴) (Nelson, 2005).

(رابطه ۱)

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(S'_{Hmax} + S'_{Hmin})(1 + \frac{R^2}{r^2}) - \frac{1}{2}(S'_{Hmax} + S'_{Hmin})(1 + 3\frac{R^4}{r^4})\cos 2\theta - \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

(رابطه ۲)

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(S'_{Hmax} + S'_{Hmin})(1 - \frac{R^2}{r^2}) + \frac{1}{2}(S'_{Hmax} - S'_{Hmin})(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4})\cos 2\theta + \frac{\Delta PR^2}{r^2}$$

(رابطه ۳)

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(S'_{Hmax} - S'_{Hmin})(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4})\sin 2\theta$$

(رابطه ۴)

$$\sigma_{zz} = S'_v - 2\nu(S'_{Hmax} - S'_{Hmin})\cos 2\theta - P_p$$

که  $\tau_{r\theta}$  تنش برشی شعاعی،  $U$  نسبت پواسون،  $\Delta P$  اختلاف فشار گل و فشار منفذی ( $P_w - P_p$ ) و  $\theta$  زاویه‌ای است که از آزیموت  $S_{Hmax}$  اندازه‌گیری می‌شود. سه تنش اصلی موجود در دیواره چاه مطابق شکل ۴ به صورت زیر می‌باشند: تنش مؤثر شعاعی که عمود بر چاه عمل می‌کند، تنش محوری مؤثر که موازی با محور چاه عمل می‌کند و تنش مماسی مؤثر که عمود بر صفحه و می‌باشد.

(رابطه ۵)

$$\sigma_{\theta\theta} = (S'_{Hmax} + S'_{Hmin}) - 2(S'_{Hmax} - S'_{Hmin})\cos 2\theta - \Delta P$$

$$\sigma_{rr} = 0$$

(رابطه ۶)

(رابطه ۷)

$$\sigma_{zz} = S'_v - 2\nu(S'_{Hmax} - S'_{Hmin})\cos 2\theta - P_p$$

اگر در رابطه ۵ مقادیر صفر و ۹۰ در نظر گرفته شود یعنی به ترتیب آزیموت تنش حداکثر ( $S_{Hmax}$ ) و حداقل ( $S_{Hmin}$ ) از روابط زیر به دست می‌آید.

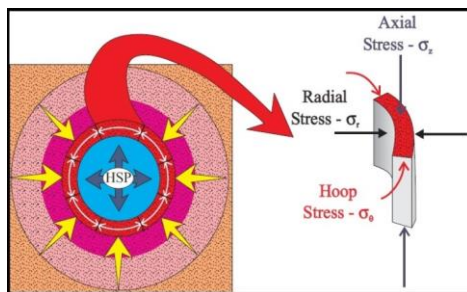
(رابطه ۸)

$$\theta = 0 \Rightarrow \sigma_{\theta}^{\min} = 3S_{Hmin} - S_{Hmax} - P_w - P_p$$

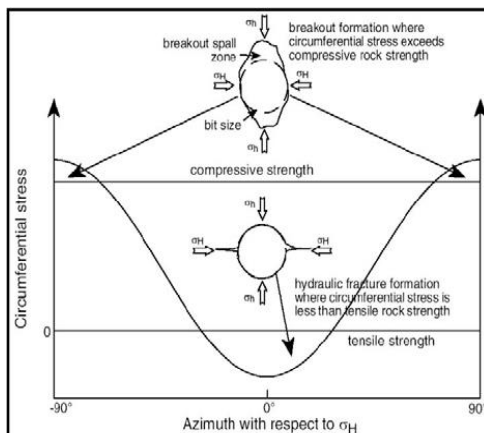
(رابطه ۹)

$$\theta = 90 \Rightarrow \sigma_{\theta}^{\max} = 3S_{Hmax} - S_{Hmin} - P_w - P_p$$

از روابط قبل می‌توان دریافت که حداکثر تمرکز تنش در  $\theta=90$  (آزیموت  $S_{Hmin}$ ) بدست می‌آید. اگر معادله حلقه تنش برای رابطه (۵) رسم شود (شکل ۵) نقاط  $\theta=90$  و  $\theta=0$  به ترتیب منطبق بر حداکثر و حداقل تمرکز تنش می‌باشد. اگر چنانچه مطابق شکل ۵ تمرکز تنش فراتر از مقاومت فشاری سنگ دیواره شود، به اصطلاح خردشدگی، بازشدگی یا پوسته‌ای شدن دیواره مشاهده می‌شود که ناشی از شکست‌های فشاری می‌باشد. مقدار خردشدگی بر حسب زاویه بازشدگی اندازه‌گیری شده، که به آن عرض خردشدگی می‌گویند (Tingay et al, 2008). ایجاد این شکستگی‌های القایی در دیواره چاه با در نظر گرفتن شرایطی خاص می‌تواند، نشان دهنده امتداد میدان تنش‌های اصلی کنونی باشد. طولیل شدگی دیواره چاه با توسعه سطوح برشی متقاطع ایجاد می‌شوند که در اثر آن بخشی از دیواره چاه ریخته می‌شود (شکل ۵). تنش متمرکز یافته حول چاه قائم در جهت تنش افقی کمینه ( $S_H$ )، بیشترین مقدار را دارا است. بنابراین محور بزرگ ریختگی‌ها تقریباً عمود بر تنش بیشینه فشاری افقی جهت دار می‌شود ( $S_H$ ; Plumb and Hickman, 1985). شکستگی‌های القایی زمانی رخ می‌دهند که تنش‌های محاطی از مقاومت کششی سنگ کمتر شود؛ و در نتیجه شکست‌های کششی در دیواره چاه ایجاد می‌شوند (Aadnoy, 1990). شکستگی‌های القایی در قالب سیماهای باریک و واضح توسعه می‌یابند که تقریباً به موازات محور چاه توسعه می‌یابند (شکستگی‌های القایی و ریختگی‌ها ممکن است در اعماق یکسان و در جهات عمود برهم تشکیل شوند). تمرکز تنش اطراف چاه قائم در جهت  $S_H$  کمترین مقدار است بنابراین شکستگی‌های القایی تقریباً به موازات جهت  $S_H$  تشکیل می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۴. تبدیل تنش برجا به تنش القایی در یک چاه قائم (Tingay et al, 2008) شامل تنش‌های مماسی ( $\sigma_{\theta\theta}$ )، محوری ( $\sigma_{zz}$ ) و شعاعی ( $\sigma_{rr}$ ).



شکل ۵. مقطع شماتیک از از ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی (Tingay et al, 2008). ریختگی‌ها زمانی شکل می‌گیرند که تنش‌های محاطی اطراف چاه از مقاومت فشاری چاه بیشتر شوند و بنابراین به موازات تنش افقی کمینه ( $\sigma_H$ ) قرار می‌گیرند. شکستگی‌های القایی زمانی شکل می‌گیرند که تنش‌های محاطی از مقاومت کششی سنگ کمتر شود و در نتیجه به موازات محور تنش افقی بیشینه ( $\sigma_H$ ) قرار می‌گیرند.

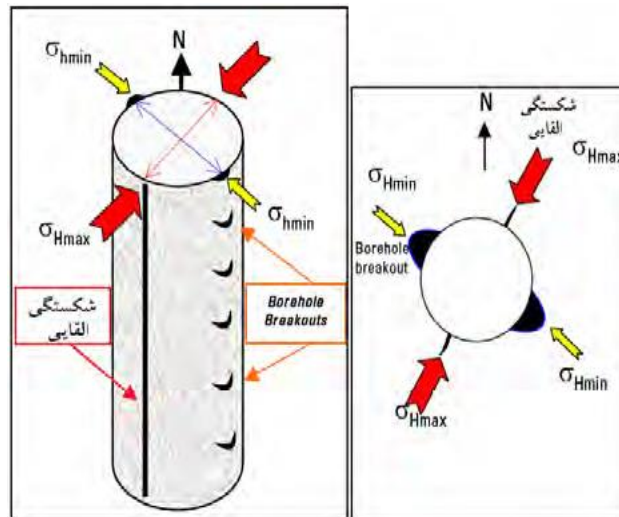
### جهت‌گیری تنش‌های افقی بیشینه در تاقدیس رگ سفید

از نمودارهای تصویرگر برای محاسبه امتداد تنش زمان حال در فروافتادگی دزفول جنوبی استفاده می‌شود و این جهت تنش را با میانگین جهات کوتاه شدگی بدست آمده از شکستگی‌های وابسته به چین و گسل مقایسه می‌شوند. کشیدگی پیرامون چاه قائم در جهت عمود بر جهت  $S_H$  قرار دارد. بنابراین ریختگی چاه‌ها عمود بر جهت تنش بیشینه کنونی قرار دارند (Kirsch, 1898). نمودارهای تصویرگر همچنین می‌توانند برای تفسیر شکستگی‌های القایی که به موازات جهت تنش بیشینه قرار می‌گیرند، تفسیر شوند (Bell, 1996). برای تعیین جهت تنش‌های بیشینه افقی، ما ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی در دو چاه شامل چاه رگ سفید (RS-D) در بخش شرقی و چاه رگ سفید (RS-G) در بخش غربی تاقدیس رگ سفید را تفسیر کردیم. شکستگی‌های القایی در چاه رگ سفید (RS-D) دارای امتداد N25E هستند (شکل ۷). بر پایه جهت شکستگی‌های القایی که به موازات تنش افقی بیشینه هستند، جهت تنش افقی بیشینه کنونی در بخش شرقی تاقدیس رگ سفید N25E می‌باشد (شکل ۹).

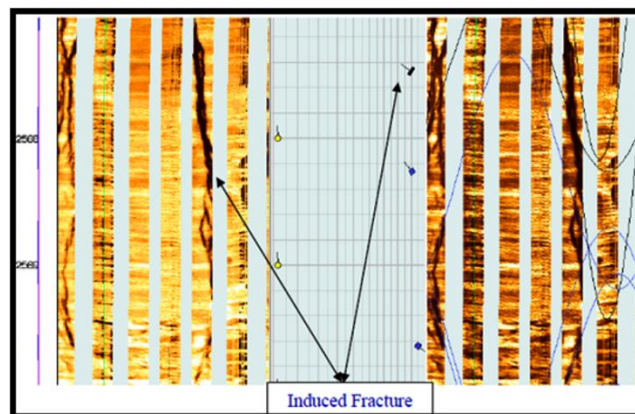
ریختگی‌ها در چاه رگ سفید (RS-G) دارای امتداد N20W هستند (شکل ۸). بر پایه جهت‌گیری ریختگی‌های چاه که عمود بر جهت تنش بیشینه افقی هستند، امتداد تنش بیشینه افقی در بخش غربی تاقدیس رگ سفید N70E می‌باشد (شکل ۹).

در مواردی که وزن گل حفاری یا تنش شعاعی (Radial stress) بسیار پایین باشد، حداکثر تنش محاطی از تنش شعاعی بیشتر می‌شود. در این حالت، اعمال تنش‌های برشی بر دیواره چاه، موجب بیضی‌شدگی چاه می‌شوند. این پدیده در تصاویر FMI به صورت دو ناحیه پهن و تیره و با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه، دیده می‌شود. در مقابل در حالتی که وزن گل حفاری بسیار زیاد باشد، تنش شعاعی افزایش یافته و تنش مماسی کاهش می‌یابد. در چنین حالتی سنگ‌های دیواره چاه تحت تنش کششی قرار گرفته و شکستگی‌های کششی در دیواره چاه رخ می‌دهند. شکستگی‌های ایجاد شده در اصطلاح شکستگی‌های القایی حفاری (Drilling Induced Fracture) نامیده می‌شوند که تحت نفوذ سیالات حفاری قرار می‌گیرند و نیز به صورت دو شکستگی با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دیده می‌شوند (Aadnoy, 1990).

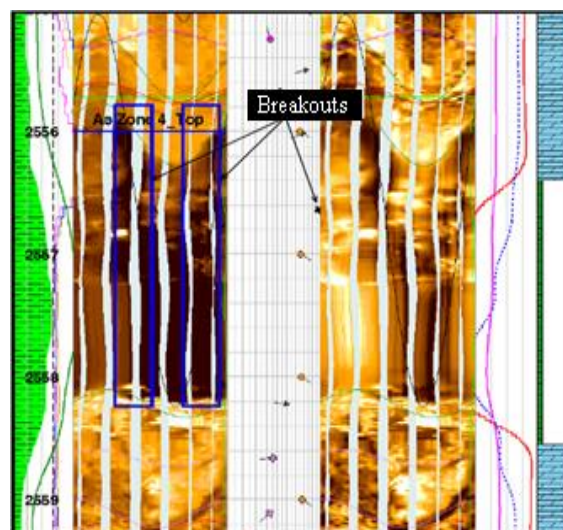
موقعیت تنش‌ها و شکستگی‌های ایجاد شده در تصاویر حاصل از FMI در (شکل ۶) نشان داده شده است. ایجاد این شکستگی‌های القایی در دیواره چاه با در نظر گرفتن شرایطی خاص می‌تواند، نشان دهنده امتداد میدان تنش‌های اصلی کنونی باشد. علیرغم شکستگی‌های طبیعی که تمایل دارند دیواره چاه را قطع کنند، شکستگی‌های القایی تقریباً به موازات محور چاه - های قرار می‌گیرند (Tingay et al., 2008).



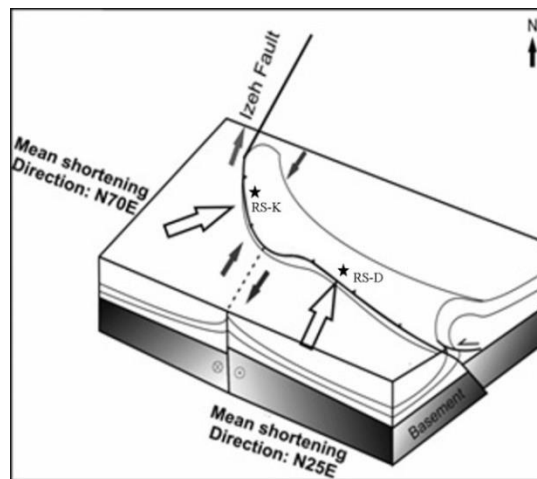
شکل ۶. شکستگی‌های ناشی از حفاری در راستای تنش‌های افقی بیشینه و کمینه.



شکل ۷. شکستگی القایی تفسیر شده از نمودار تصویرگر در چاه رگ سفید (RS-D). شکستگی‌های القایی سیماهایی باریک و خطی هستند که با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه به موازات محور چاه ظاهر می‌شوند. شکستگی‌های القایی، امتداد N25E را برای تنش بیشینه افقی در بخش شرقی تاقدیس رگ سفید نشان می‌دهند.



شکل ۸. ریختگی‌های تفسیر شده از نمودار تصویرگر در چاه رگ سفید (RS-G). ریختگی‌ها در نمودارهای تصویرگر این چاه در قالب مناطق تیره رنگ و خرد شده در امتداد‌های  $N160^\circ$  و  $N340^\circ$  قابل مشاهده هستند. ریختگی‌ها، امتداد N70E را برای تنش بیشینه افقی در بخش غربی تاقدیس رگ سفید نشان می‌دهند.



شکل ۹. مدل شماتیک از منطقه مطالعاتی نشانگر جهات تنش بیشینه افقی کنونی برای بخش شرقی و غربی تاق‌دیس رگ سفید که از شکستگی‌های القایی و ریختگی چاه‌ها بدست آمده‌اند. جهت تنش بیشینه افقی کنونی عمود بر امتداد کلی چین در هر بخش می‌باشد.

### بحث

بر پایه نقشه توپوگرافی و هم‌ضخامت که نشانگر تغییرات ضخامت در حوضه زاگرس بین فارس، ایذه، فروافتادگی دزفول و لرستان در خلال ژوراسیک پایینی تا کرتاسه بالایی هستند (Abdollahie Fard et al., 2006; Sepehr and Cosgrove, 2004) گسل پی سنگی هندلیجان-ایذه دارای امتداد N20E می‌باشد. مقطع لرزه‌ای که بطور عمود بلندی قدیمه هندلیجان-ایذه را قطع می‌کند (شکل ۱۰)، نشانگر کم ضخامت شدگی کرتاسه پایینی سازند فهلیان تا پلیوسن بالایی سازند آغاجری است که هم‌زمان با فعالیت گسل و برخاستگی بلندی هندلیجان-ایذه در خلال کرتاسه و ترشیاری است. ضخیم شدگی سازند آغاجری بالایی نشانگر شروع حرکات زاگرس است که برخاستگی گسل هندلیجان-ایذه را بوسیله نهشتگی زیاد آغاجری بالایی تا رسوبات عهد حاضر را متوقف می‌کند (Abdollahie Fard et al., 2006).

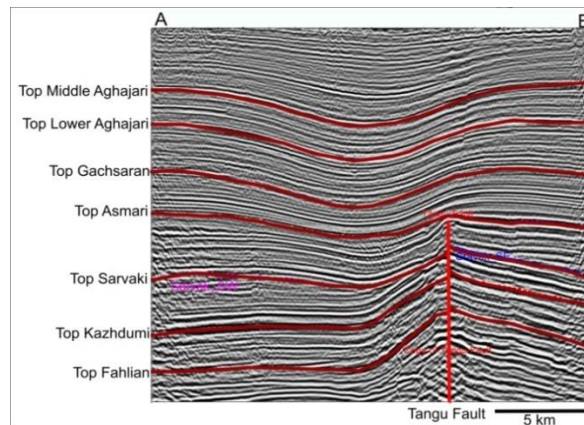
گسل پی سنگی و راستگرد هندلیجان-ایذه با امتداد N020E در دزفول جنوبی دارای دو قطعه موازی هم است که خم فشارشی و پهنه گسلی راستگرد را در بخش غربی تاق‌دیس رگ سفید ایجاد کرده است (شکل ۹). تشکیل این پهنه برش، موجب چرخش راستگرد در محور تاق‌دیس، برخاستگی بیشتر در کوهانک شمال غربی شمال سرسازند آسماری نسبت به کوهانک جنوب شرقی، تشکیل دسته‌های جدید شکستگی و همچنین توسعه و افزایش تراکم شکستگی در بخش خمش یافته تاق‌دیس رگ سفید می‌شود. گسل عرضی هندلیجان-ایذه با امتداد شمال شرقی-جنوب غربی بعضی تاق‌دیس‌ها را بصورت کشیدگی در محور و چرخش دگرشکل کرده است و یک سیستم جدیدی از شکستگی‌ها را ایجاد می‌کند. تاق‌دیس رگ سفید در امتداد گسل هندلیجان-ایذه جابجا شده است به نحوی که امتداد اثر محوری آن از حالت اصلی N68°W بیرون پهنه برشی به امتداد N20°W درون پهنه برشی تغییر کرده است (شکل ۹). به دلیل چرخش محور تاق‌دیس رگ سفید در پهنه برشی هندلیجان-ایذه، تعیین جهت و میزان زاویه چرخش با مقایسه جهت گیری شکستگی‌های القایی در پهنه گسلی و بیرون آن امکان پذیر است. مقدار چرخش چین‌ها در پهنه برش هندلیجان-ایذه که بوسیله جهت تنش افقی بیشینه کنونی ارائه می‌شود، به تابعیت از جهت گیری گسل هندلیجان-ایذه و تطابق با جهت برش راستگرد پهنه گسل تغییر میکند. در

این مطالعه تنش‌های افقی بیشینه بوسیله تفسیر ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی در نمودارهای تصویرگر بدست آمد. میانگین جهت کوتاه‌شدگی بدست آمده از ریختگی‌ها (70°E) در پهنه گسل هندلیجان-ایذه تقریباً عمود بر روند عمومی شمال، شمال غربی-جنوب، جنوب شرقی بخش غربی تاق‌دیس رگ سفید است. این میانگین جهت کوتاه‌شدگی در غرب تاق‌دیس رگ سفید مطابق با جهت کوتاه شدگی بدست آمده بوسیله شکستگی‌های القایی بیرون پهنه گسل نیست. لذا پیشنهاد می‌شود که در اثر تجدید فعالیت گسل‌های راستگرد مثل هندلیجان-ایذه، علاوه بر چرخش محور تاق‌دیس، جهت کلی کوتاه‌شدگی در کلیت چین‌های کم‌برند زاگرس (امتداد شمال شرقی) می‌تواند تغییر کند و به دو امتداد در فروافتادگی دزفول تجزیه گردد. اگرچه برآیند دوجبهت کوتاه شدگی (جهت کوتاه شدگی N25E در بخش شرقی و جهت کوتاه شدگی N70E در بخش غربی تاق‌دیس رگ سفید) دارای امتداد شمال شرقی است که باجهت کوتاه شدگی کلی زاگرس در تطابق است. همچنین تطابق بین جهات تنش بیشینه افقی کنونی بدست آمده از ریختگی‌ها در دزفول جنوبی و حل سازوکار کانونی زلزله‌ها در پروژه WSM دارای اهمیت زیادی می‌باشد. حل سازوکار کانونی زلزله‌ها ۷۲ درصد از پایگاه داده‌های را شامل می‌شود (Heidbach et al., 2010). جهت گیری تنش تفسیر شده از حل سازوکار کانونی بیان می‌دارد که حرکات زلزله در امتداد گسل‌هایی رخ می‌دهد که با جهت کنونی تنش، بهینه شده باشند. آنالیز جهت تنش از روش‌های گوناگون نزدیک مرز ورقه‌ها معلوم نموده که بعضی از مرزهای ورقه‌ای، بطور ویژه گسل سان آندریاس و گسل سوماتران بزرگ) بطور مکانیکی ضعیف هستند (ضریب اصطکاک داخلی پایین) و ممکن است بوسیله حالت ناهینه و میادین تنش بسیار مورب تجدید فعالیت کنند (Zoback et al., 1987). از اینرو خطاهای احتمالی بزرگتر در جهت تنش بدست آمده از حل سازوکار کانونی زلزله نزدیک مرزهای ورقه‌ها وجود دارد و این داده‌ها باید به عنوان داده‌های با قابلیت اعتباری کم در نظر گرفته شوند (Heidbach et al., 2010; Rajabi et al., 2010). نتایج ما نشان می‌دهد برآیند جهات تنش بیشینه افقی (NNE و ENE) مشاهده شده به ترتیب در چاه‌های واقع در بخش شرقی و غربی تاق‌دیس رگ سفید که بوسیله ریختگی‌ها و شکستگی‌های القایی بدست آمده‌اند، با جهات بدست آمده از حل سازوکار کانونی زلزله و حرکت مطلق

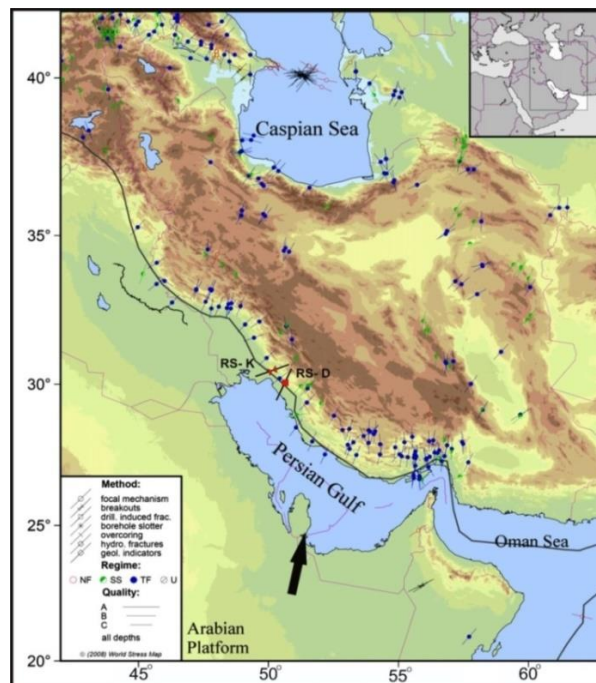


ورقه عربی در فروافتادگی دزفول جنوبی سازگار هستند (شکل ۱۱). میانگین آزمون کوتاهشدگی بر روند عمومی تاقدیس رگ سفید در هر بخش عمود است. در مبحث تنش‌های برجا، ازدیاد برداشت از مخازن نیز باید لحاظ گردد. تولید بهینه از مخازن بطور طبیعی شکاف دار شده، تابعی از آزمون محور چاه‌های حفاری است که بسیاری از شکستگی‌های هیدرولیکی رسانا را قطع کرده اند (Rajabi et al., 2010). از اینرو چاه‌های افقی که تقریباً در آزمون N25 در بخش شرقی و در آزمون N70 در بخش غربی تاقدیس رگ سفید حفر شوند، تعداد بیشتری از چاه‌ها را کم کنند.

شکستگی‌های باز را در منطقه مطالعاتی قطع می‌کنند (شکل ۸). انحراف از چاه‌ها بطرف تنش بیشینه ماکزیمم، تنش‌های تفاضلی مطلق و نسبی عمل کننده بر دیواره چاه را کم می‌کنند؛ بنابراین ریختگی‌ها و مشکلات حفاری وابسته به آن مثل گیرکردن لوله و ریزش‌ها را کاهش می‌دهند (Zoback, 1995). بنابراین پیشنهاد می‌شود که حفاری چاه‌های که در جهت تنش بیشینه افقی متمایل شده‌اند، هم می‌توانند بیشترین شکستگی‌های رسانا را قطع کنند و هم می‌توانند مشکلات ناپایداری در چاه‌ها را کم کنند.



شکل ۱۰. مقطع لرزه ای از سرسازند آغاچری میانی. به تغییرات ضخامت ضخامت در بلندی هندجیان-ایده توجه شود. کم ضخامت شدگی کوتاه پایینی سازند فهلیان تا پلیوسن بالایی سازند آغاچری هم زمان با فعالیت گسل و برخاستگی بلندی هندجیان-ایده در خلال کوتاه و ترشباری است. ضخیم شدگی سازند آغاچری بالایی نشانگر شروع حرکات زاگرس است که برخاستگی گسل هندجیان-ایده را بوسیله نهستگی زیاد آغاچری بالایی تا رسوبات عهد حاضر را متوقف می‌کند (مقطع AB در شکل ۱).



شکل ۱۱. جهات بیشینه تنش افقی در ایران و بدست آمده از پروژه جهانی تنش و چاه‌های آنالیز شده. نشانه‌ها و رنگ‌های مختلف نشانگر روش‌های محاسبه هستند (دایره‌ها حل سازوکار کانونی هستند. پیکان‌های توپر ریختگی‌ها هستند. رژیم‌های تنش: NF: گسل نرمال - SS: گسل امتداد لغز - TF: گسل راندگی - خطوط سیاه: رژیم تنش ناشناخته). طول خطوط کیفیت داده‌ها را نشان می‌دهد. تنها داده‌های حل سازوکار زلزله‌های با عمق بیش از ۱۰ کیلومتر برای ایران قابل دسترس هستند (Heidbach et al., 2009). برآیند جهات تنش بیشینه افقی NNE و ENE مشاهده شده در چاه‌های رگ سفید (RS-D) و رگ سفید (RS-G) با جهت تنش افقی بیشینه بدست آمده از حل سازوکار کانونی زلزله‌ها در فروافتادگی دزفول جنوبی سازگار است. پیکان ضخیم نشانگر جهت حرکت ورقه عربی نسبت به اوراسیا است. با اعمال تغییراتی از (Rajabi et al., 2010).

### نتیجه‌گیری

در بخش شرقی چین رگ سفید شکستگی های کششی القایی و ریختگی ها به ترتیب آزیموت های N25 و N115 دارند. شکستگی های کششی القایی در بخش غربی منحرف شده اند و جهت N70E را نشان می دهند و همچنین ریختگی چاه ها که عمود بر شکستگی های کششی هستند دارای جهت N160 می باشند. بر پایه جهت گیری شکستگی های القایی و ریختگی ها، میانگین جهات تنش افقی بیشینه زمان حال در بخش های غربی و شرقی تاقدیس رگ سفید به ترتیب N25E و N70E می باشد. جهات تنش بیشینه افقی مشاهده شده در چاه های بخش شرقی تاقدیس رگ سفید با جهت تنش بیشینه افقی از حل سازوکار کانونی زلزله ها و با جهت حرکت مطلق ورقه عربی در فروافتادگی دزفول در تطابق است و تاکید دارد که این بخش ساختار تحت فاز کوهزایی زاگرسی قرار دارد. همچنین جهات تنش بیشینه افقی مشاهده شده در چاه های بخش غربی تاقدیس رگ سفید وابسته به فعالیت مجدد گسل هندیجان-ایذه در فاز پس از کوهزایی است. برآیند جهات تنش بیشینه افقی شمال-شمال شرقی و شرق-شمال شرقی مشاهده شده در چاه های بخش غربی و شرقی

### منابع

- عقلی، ق.، چرچی، ع.، سلیمانی، ب.، فردین، ه.، ۱۳۹۳، استفاده از نمودارهای تصویرگر OBMI و UBI در تحلیل ساختاری شکستگی های سازند در تحلیل ساختار و شکستگی های مخزن آسماری و مقایسه با نمودارهای انحراف سرعت در یکی از میداین غرب ایران، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۱، ص ۱-۹.
- Aadnoy. B.S., 1990, Inversion technique to determine the in-situ stress field from fracturing data, *Petrol. Sci. Engin*, Vol:4, p: 12-141
- Abdollahi Fard. I., Braathen. A., Mokhtari. M., Alavi. S.A., 2006, Interaction of the Zagros Fold thrust belt and the Arabian type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran, *Petroleum Geoscience*, Vol: 12, p: 347-362
- Bell. J.S., 1996, *Petro Geoscience In situ stresses in sedimentary rocks (part 1): measurement techniques*, *Geosci. Can*, Vol:23, p:85-100
- Ghanadian. M., Faghhih. A., Abdollahie Fard. I., Kusky., T., Maleki. M., 2017, On the role of incompetent strata in the structural evolution of the Zagros fold-thrust belt, Dezful Embayment, Iran, *Mar Petrol Geol*, Vol:8, p: 320-333
- Heidbach. O., Tingay. M.R.P., Barth. A., Reinecker. J., Kurfieb. D., Müller. B., 2009, The World Stress Map based on the database release 2008, Commission of the Geological Map of the World, Paris, p: 46, doi:10.1594/GFZ.WSM.Map2009.
- Heidbach. O., Tingay. M.R.P., Barth. A., Reinecker. J., Kurfieb. D., Müller. B., 2010, Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008, *Tectonophysics*, Vol:482, p:3-15
- Kirsch. V., 1898, Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol:29, p:797-807
- Nelson. E.J., 2005, Transverse drilling-induced tensile fractures in the West Tuna area, Gipps land Basin, Australia, implications for the in situ stress regime, Vol:42, p:361-371.
- Plumb., R.A., Hickman. S.H., 1985, Stress-induced borehole elongation: A comparison between the Four-Arm Dipmeter and the Borehole Televiewer in the Auburn Geothermal Well, *J. Geophys. Res*, Vol:90, p:5513-5521
- Rajabi. M., Sherkatii., S., Bohloli. B., Tingay. M., 2010, Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran, *Tectonophysics*, Vol:492, p:192-200
- Sepehr. M., Cosgrove. J.W., 2004, Structural framework of the Zagros foldthrust belt, Iran, *Marine and Petroleum Geology*, Vol:21, p:829-843
- Serra. O., 1989, Formation MicroScanner image interpretation. Schlumberger Educational Services.
- Soleimani. B., Amiri. K., Samani. B., Shaban. L., 2016, Lithology effects on the fractures parameters using image log and petrophysical data, *Russian journal of earth science*, Vol:16, p:1-11, doi:10.2205/2016ES000581
- Tingay. M.R.P., Reinecker. J., Müller. B., 2008, Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs, *World Stress Map Project Stress Analysis Guidelines*, <http://www.world-stress-map.org>.
- Tingay. M.R.P., Hillis. R.R., Morley. C.K., King. R.C., Swarbrick. E., Damit. A.R., 2009, Present-day stress and neotectonics of Brunei: implications for petroleum exploration and production, *AAPG Bull*, Vol:93, p:75-100

### سپاسگزاری

این تحقیق با همکاری شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب انجام شده است. لذا بدین وسیله از معاونت محترم زمین شناسی گسترشی برای مساعدت و همکاری سپاسگزاری می شود.

- Tingay. M.R.P., Morley C.K., Hillis. R.R. Meyer. J., 2010, Present-day stress orientation in Thailand's basins, *J. Struct. Geol.*, Vol:32, p:235-248
- Ye., S., Rabiller. P., 1998, Automated fracture detection on high resolution resistivity borehole imagery, SPE annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, p: 777-784. <https://doi:10.2118/49300-MS>
- Zoback. M.L., Moun. V.S., Suppe. J., Eaton. J.P., Healy. J.H., Oppenheimer. D., Reasenber. P., Jones. L., Raleigh. C.B., Wong. I.G., Scotti. O., Wentworth. C., 1987, New evidence on the state of stress of the San Andreas Fault system, *Science*, Vol:238, p:1105-1111
- Zoback. M.D., 1995, Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ and rock strength, *J. Geophys. Res.*, Vol:100, p:12791-12811