

تحلیل میدان تنش های برجا در سازندهای مختلف یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی

صابر تقی زاده^{۱*}، محمد آبدیده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه مهندسی نفت، امیدیه، ایران

۲- دکتری زمین شناسی، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، گروه مهندسی نفت، امیدیه، ایران

saber_taghizadeh268@yahoo.com

چکیده

تعیین میدان تنش یا به عبارت دیگر، محاسبه جهت و مقدار تنش های اصلی، نقش کلیدی در بسیاری از جنبه های تولیدی و اکتشافی نفت و گاز را ایفا می کند. دست یابی به راه حل های علمی و مهندسی در مسائل تنش های پیرامون چاه نیازمند اطلاع دقیق از موقعیت تنش در عمق می باشد. در این مقاله با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی، به بررسی ۵ سازند که از اهمیت بیشتری به لحاظ تنوع ساختار و لیتولوژی و نیز تأثیر آنها در تولید از مخزن مورد مطالعه برخوردار هستند پرداختیم. استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی از این جهت مورد توجه قرار گرفته است که به لحاظ وسعت محدوده و عمق نفوذ بسیار زیاد در لایه های مختلف زمین (از چند متری سطح زمین تا عمق های بسیار زیاد) نسبت به سایر روش ها امتیاز ویژه ای دارد. ابتدا به محاسبه مدول های الاستیک سنگ مخزن در حالت دینامیکی پرداخته و بعد از تبدیل آنها به حالت استاتیکی، به محاسبه مقاومت تک محوری سنگ مخزن مناسب با آن پرداخته شده است. سپس با استفاده از روابط موجود، تنش های اصلی در سازندهای مورد نظر محاسبه شده است. در نهایت نمودارهای مربوطه را رسم کرده و به تحلیل میدان تنش پرداخته شد. در مهندسی نفت پایه تمام محاسبات مکانیک سنگی همین تنش های ذکر شده می باشد که پایه ای جهت تصمیم گیری در عملیات های وابسته به ژئومکانیک مانند پیش بینی تولید ماسه، آنالیز پایداری دیواره چاه، شکست هیدرولیکی و فرونشست مخزن می باشد.

کلمات کلیدی: میدان تنش، لرزه نگاری سه بعدی، مدول های الاستیک، مکانیک سنگ، ژئومکانیک.

مقدمه

نتایج حاصل از برآورد تنش های برجا بخشی از داده های ورودی یک پروژه مکانیک سنگ را به خود اختصاص می دهند و نقش مهمی در صحت اجرای آن دارا هستند. تنش های طبیعی موجود در توده سنگ به نیروی ثقل، ژئواستاتیک، تکتونیک و شرایط ساختاری زمین وابسته می باشد. همچنین تنش های القاء شده ای وجود دارند که توسط انسان در عملیات مختلف، از جمله حفاری بر ساختار سنگ اعمال می شوند. برقراری ارتباط بین گرایش های مهندسی نفت از طریق داده های بدست آمده از هر گرایش و بدست آوردن نتایج جدید به منظور عملکرد دقیق تر و بازدهی بیشتر همواره از دغدغه های اساسی محققان در این زمینه می باشد. از این رو بر آن شدیم تا با تلفیق داده های لرزه نگاری که مهمترین ابزار ژئوفیزیستها برای اکتشاف نفت و گاز می باشد. همچنین بر مطالعه شکل امواج صوتی یا ارتعاشی استوار است و علم ژئومکانیک که به تحلیل رفتار زمین در برابر تنش ها می پردازد، به بررسی و تعیین میدان تنش در چند سازند در یکی از میادین نفتی پرداخته و نتایج حاصل از آن را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهیم.

لرزه نگاری و چگونگی عملکرد در عملیات اکتشاف نفت و گاز

لرزه نگاری مطالعه علمی گسترش امواج الاستیک در زمین می باشد و بعنوان یکی از شاخه های ژئوفیزیک شناخته می شود. از آنجا که امکان دسترسی به لایه ها و ساختارهای درون زمین میسر نمی باشد امواج الاستیک (با امواج اکوستیک) این امکان را فراهم می کند که به بازسازی آنچه در زیرزمین وجود دارد با استفاده از اطلاعات بدست آمده از این امواج بپردازند.

امواج لرزه‌ای همان امواج صوتی با طیف فرکانس گسترده تری هستند که به سه نوع کلی امواج فشاری (P-waves)، امواج برشی (S-waves) و امواج سطحی (Surface waves) طبقه بندی می‌شوند. سرعت انتشار امواج بستگی به جنس محیط دارد. [۱]

علم لرزه خود به دو گروه اصلی زلزله و نفت تقسیم می‌گردد. در شاخه زلزله، امواج زلزله که از همان امواج صوتی می‌باشند مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شاخه نفت اطلاعات لرزه‌ای با ایجاد امواج لرزه‌ای مصنوعی در سطح زمین و دریافت بازتاب این امواج از درون لایه‌های زیر سطحی به دست می‌آید. به دلایل اقتصادی و اهمیت اکتشاف و تولید نفت علم لرزه کاربردهای فراوانی در صنعت انرژی پیدا کرده است.

کاربرد علم لرزه در صنعت نفت خود به دو گروه لرزه نگاری اکتشافی و لرزه نگاری توسعه‌ای تقسیم می‌گردد. لرزه نگاری اکتشافی بیشتر بصورت دو بعدی ولی لرزه نگاری توسعه‌ای میداین شناخته شده بصورت سه بعدی و چهار بعدی انجام می‌گیرد. [۱]

تخمین ضرایب الاستیک با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی

۱- روابط

ابتدا باید از طریق روابط تجربی و رگرسیونی بین Δt_s و Δt_c برای سازندهای مورد مطالعه، مقدار Δt_s را بدست آوریم سپس به محاسبه ضرایب الاستیک پردازیم.

$$\Delta t_s = \Delta t_c * 1.7891 + 7.622$$

(۱) سازند آسماری

$$\Delta t_s = \Delta t_c * 1.5452 + 21.2057$$

(۲) سازند ایلام، سروک و فهلیان

$$\Delta t_s = \sqrt{3} \Delta t_c$$

(۳) سازند گچساران

که در این روابط: (Δt_s) سرعت موج برشی بر حسب $(\mu s/ft)$ (Δt_c) سرعت موج تراکمی (فشاری) بر حسب $(\mu s/ft)$ می باشند.

با توجه به تعدد لایه ها و پیچیدگی ساختاری و لیتولوژی و همچنین مخزنی نبودن سازند گچساران، نمی توان از روابطی تجربی مانند

سازندهای ذکر شده استفاده کرد و لذا از رابطه $\Delta t_s = \sqrt{3} \Delta t_c$ برای بدست آوردن Δt_s استفاده می کنیم.

برای محاسبه تنش های افقی حداقل و حداکثر از روابط پروالاستیک (بدلیل نبود آزمایشات برجا)، نیاز به شناخت ضرایب الاستیک تنها

(E و ν) داریم. در زیر روابطی که برای محاسبه ضرایب الاستیک (ν و E) لازم است بیان شده است. [۲]

$$v_d = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1} \quad (4)$$

$$E_d = \frac{\rho_b \left[3 - 4 \left(\frac{\Delta t_c}{\Delta t_s} \right)^2 \right]}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (5)$$

مقادیر استاتیک نسبت پواسون و مدول یانگ، بر اساس روابط همبستگی وانگ که از طریق تست های آزمایشگاهی بر روی مغزه ها

بدست آمده است، بصورت زیر می باشد:

$$v_s = v_d \quad (6)$$

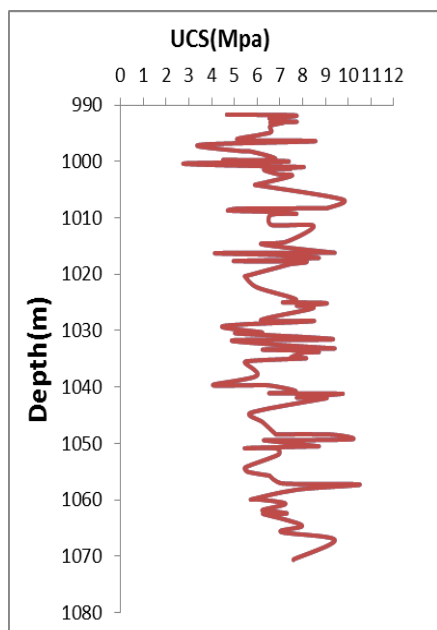
$$E_s = 0.4145E_d - 1.0593 \quad (7)$$

که در این روابط: (Δt_s) بر حسب (sec/km)، (Δt_c) بر حسب (sec/km)، بر حسب $(v_d, \text{gr/cm}^3)$ نسبت پواسون دینامیکی بدون بعد و (E_d) مدول یانگ دینامیکی بر حسب (GPa) است.

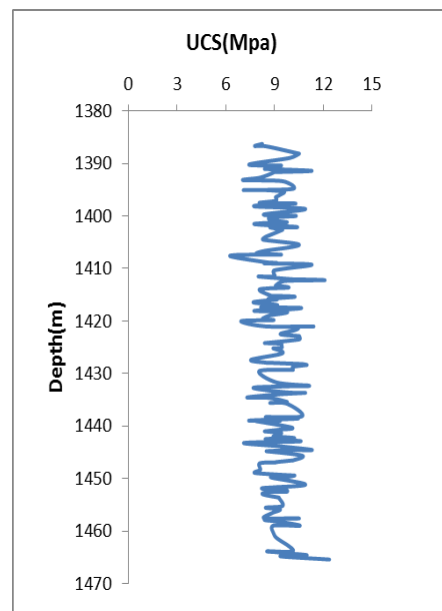
با بررسی محاسبه مدول یانگ استاتیکی (E) در سازندهای مورد نظر مشخص می شود که سازند گچساران کمترین مقدار (E)، معادل $1/88$ گیگا پاسکال و سازند فهلیان با $7/76$ گیگا پاسکال بیشترین مقدار (E) را دارا می باشند. علت این اختلاف در سازندهای مورد مطالعه تغییر در عمق و تخلخل آنها می باشد. به طوری که با افزایش عمق، تخلخل کاهش یافته و در نتیجه مقدار مدول یانگ استاتیکی (E) افزایش می یابد.

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی ناپایداری چاه توسط معیارهای شکست، مقاومت فشار تک محوره (UCS) می باشد که از رابطه زیر که توسط Mc Nally (1987) ارائه گردید، بدست می آید.

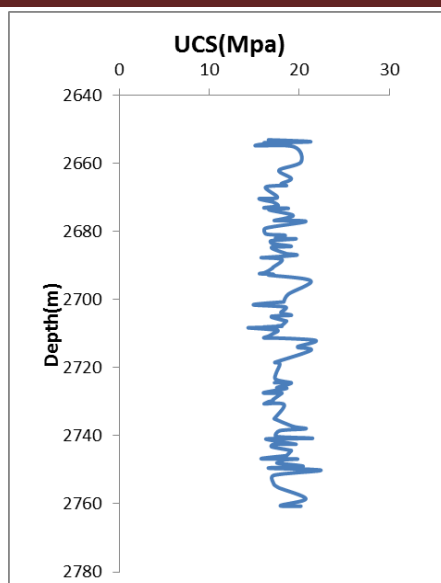
$$UCS = 1200 * e^{(-0.036 * \Delta t_c)} \quad (8)$$



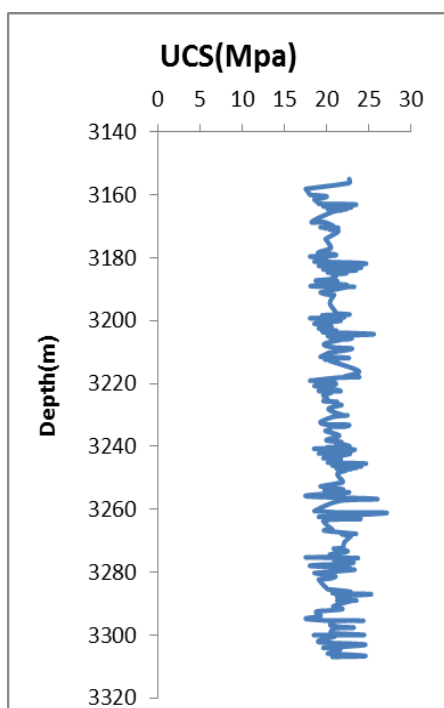
شکل ۱- تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند گچساران



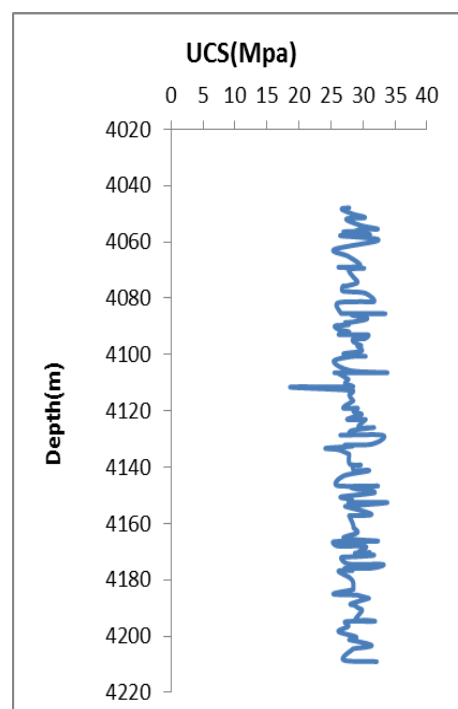
شکل ۲- تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند آسماری



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند ایلام



شکل ۴- تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند سروک



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند فهلیان

با بررسی نمودارهای تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازندهای مورد نظر می توان دریافت که سازند گچساران کمترین مقدار (UCS)، معادل ۲/۷۴ مگا پاسکال و سازند فهلیان با ۳۳/۷۹ مگا پاسکال بیشترین مقدار (UCS) را دارا می باشند. از دلایل وجود این اختلاف در سازندهای مورد نظر می توان به کاهش تخلخل با افزایش عمق اشاره کرد. به گونه ای که هرچه عمق افزایش یابد تخلخل کاهش یافته و در نتیجه (UCS) افزایش می یابد (شکل های ۱ تا ۵). از نگاهی دیگر می توان دریافت که دامنه تغییرات مقاومت فشار تک محوره (UCS) نسبت به عمق در سازند گچساران به نسبت بقیه سازندها بیشتر می باشد و دلیل این امر را می توان وجود ۷ بخش و لایه (Member) مختلف با تفاوت های ساختاری در این سازند بیان کرد (شکل ۱).

تعیین تنش های برجا

تنش های اصلی برجا شامل تنش روباره (S_v) است که ناشی از وزن طبقات بالایی است و دو تنش اصلی دیگر، تنش افقی حداکثر (SH_{max}) و تنش افقی حداقل (Sh_{min}) می باشد. خواص الاستیک سنگ نشان دهنده رفتار تغییر شکل سنگ در برابر تنش های وارده به آن است [۳]

تعیین تنش روباره (S_v)

بطور ریاضی، تنش روباره بوسیله انتگرال گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر بصورت زیر بدست می آید:

$$S_v = \int_0^z \rho(z)gz dz \cong \bar{\rho}gz \quad (9)$$

که $\rho(z)$ دانسیته سنگ که تابعی از عمق می باشد، g ثابت شتاب گرانشی، $\bar{\rho}$ دانسیته متوسط روباره می باشد. دانسیته متوسط در چاه مورد مطالعه برابر با $2.56 \frac{g}{cm^3}$ در نظر گرفته شده است [۳].

تعیین مقدار تنش افقی حداقل (Sh_{min}) و حداکثر (SH_{max})

روش های مختلفی برای تعیین تنش افقی حداقل وجود دارد از جمله: روش شکست هیدرولیکی، آزمایش نشت (Micro-fracture test) و (Mini-fracture test) که می توان مقدار تنش افقی حداقل را مستقیماً از این آزمایشات بدست آورد. در میان این روش ها، دو روشی که بیشتر برای تعیین تنش افقی حداقل استفاده می شود عبارتند از: روش شکست هیدرولیکی و آزمایش نشت [۴].

آقایان ویلیز و هابرت بحث کاملی را در مورد شکست هیدرولیکی که در آن شکستگی ایجاد شده عمود بر جهت تنش افقی حداقل گسترش می یابد، ارائه دادند. دلیل آنها این بود که کار انجام شده برای باز کردن یک ترک به یک مقدار معلوم متناسب با تنشی است که به طور عمود بر صفحه ترک در مقابل مقدار باز شدگی بوجود می آید. همچنین (Gjonnes et.al.) (1988) بیان کردند که فشار بسته شدن شکاف (P_c) معمولاً برابر با تنش افقی حداقل (Sh_{min}) گرفته می شود. نکته قابل ذکر این است که، مقدار تنش افقی حداکثر (SH_{max}) را نمی توان بطور مستقیم از روش شکست هیدرولیکی و آزمایش نشت بدست آورد.

در این تحقیق بدلیل نبود این آزمایشات، مقدار تنش افقی حداقل و حداکثر از روابط پروالاستیک بصورت زیر بیان شده است:

$$Sh = \frac{\nu}{1-\nu} S_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha Pp + \alpha Pp + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_y \quad (10)$$

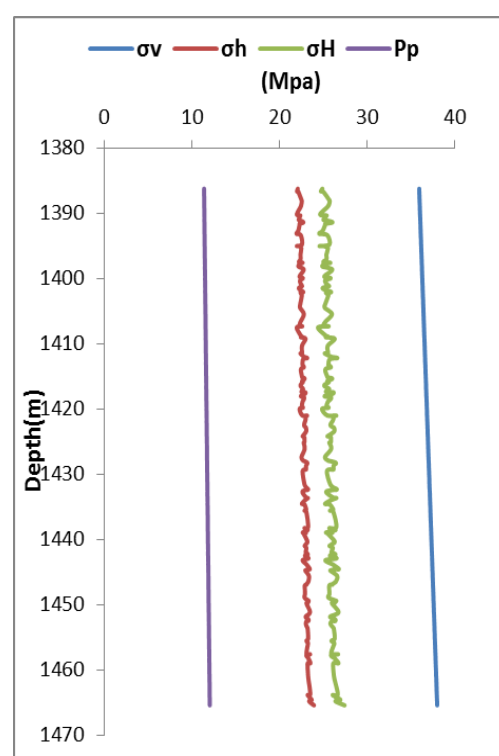
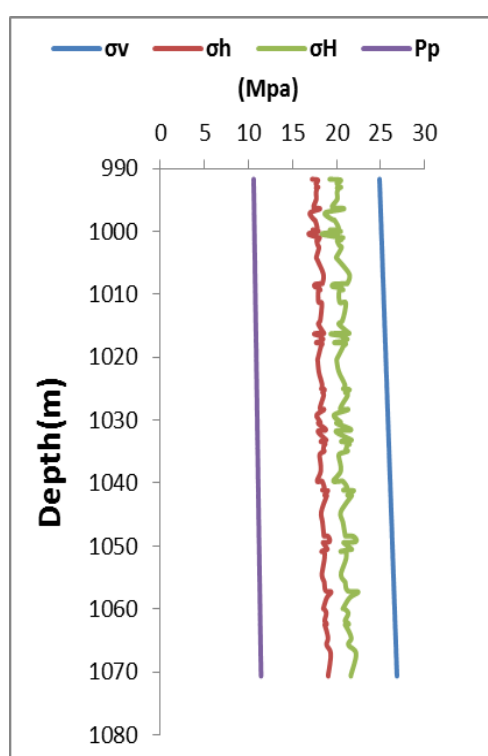
$$S_H = \frac{\nu}{1-\nu} S_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha Pp + \alpha Pp + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \epsilon_x + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_y \quad (11)$$

که در این روابط: (Sh و S_H) بترتیب تنش افقی حداقل و حداکثر بر حسب (MPa)، ν ضریب پواسون، S_v تنش قائم بر حسب (MPa)، α ضریب بایوت، Pp فشار منفذی بر حسب (MPa)، E مدول یانگ بر حسب (MPa)، و کرنش در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می باشد. ضریب بایوت برابر با یک، برابر یک و نیم و برابر یک در نظر گرفته شده است.

گرادیان فشار منفذی متوسط در سازندهای ایلام، سروک و فهلیان برابر 0.480 psi/ft ، سازند آسماری 0.365 psi/ft و سازند گچساران 0.744 psi/ft در میدان مورد مطالعه می باشد.

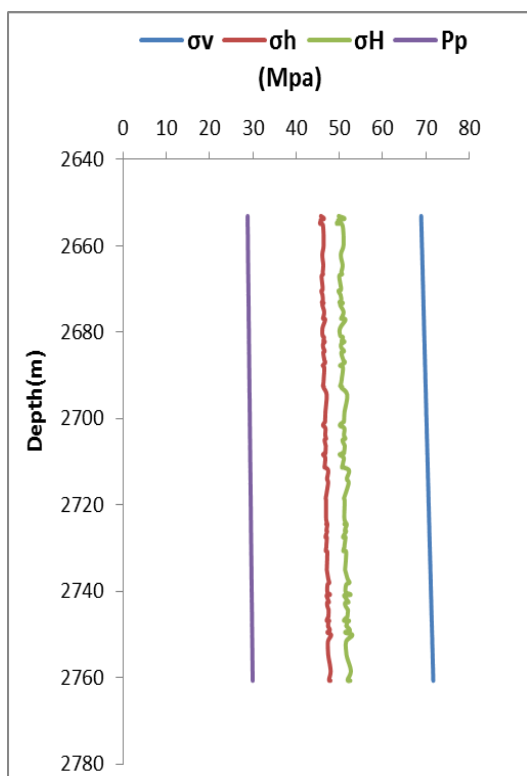
حال با توجه به این که کدام یک از سه تنش برجا (SH_{max})، Sh_{min} و S_v در موقعیت تنش های اصلی ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) قرار بگیرند می توان بر طبق تئوری گسلش آندرسون رژیم تنش در عمق را مشخص کرد. آندرسون تئوری گسلش خود را به صورت زیر بیان کرده است:

- ۱- در رژیم گسلش نرمال^۱ (NF) تنش وزنی $S_1 = S_v$ باعث گسلش شده و لغزش در امتداد گسل زمانی رخ می دهد که تنش حداقل (Shmin) با توجه به میزان فشار منفذی و عمق به اندازه کافی کوچک باشد [۶].
- ۲- در حالتی که میدان تنش خیلی فشاری باشد هر دو مقدار تنش افقی از تنش قائم فراتر می رود $S_3 = S_v$ و گسلش معکوس رخ می دهد در این حالت تنش افقی حداکثر (S_{Hmax}) به اندازه کافی بزرگ می باشد و به آن رژیم گسلش معکوس^۲ (RF) می گویند [۶].
- ۳- در حالت سوم تنش قائم، تنش متوسط بوده $S_2 = S_v$ و گسلش زمانی رخ می دهد که تفاوت بین (S_{Hmin} و S_{Hmax}) به اندازه کافی بزرگ بوده و این رژیم را امتداد لغز^۳ (SS) می گویند [۶].

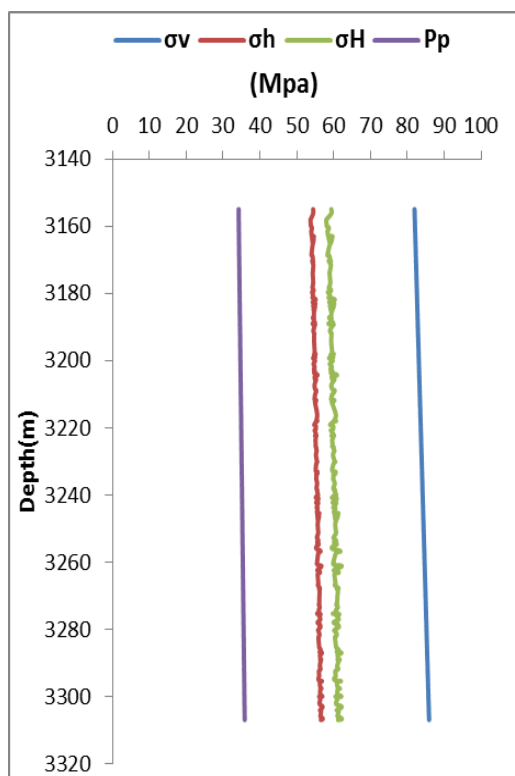


شکل ۷- سازند آسماری: رژیم تنش نرمال است ($\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h$) شکل ۶- سازند گچساران: رژیم تنش نرمال است ($\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h$)

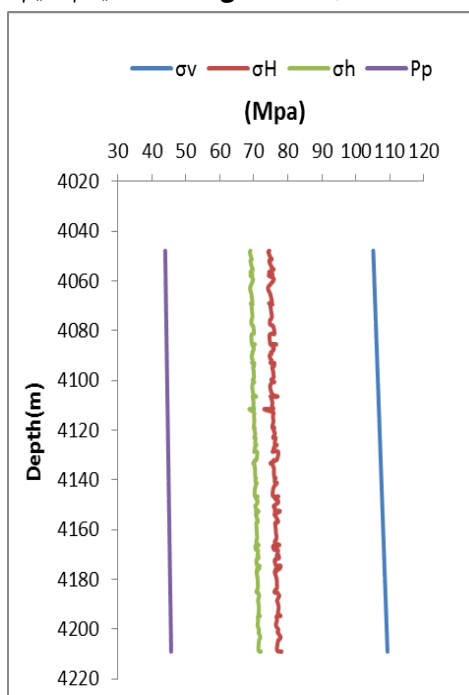
1. Normal Faulting
2. Reverse Faulting
3. Strike slip Faulting



شکل ۸- سازند ابلام: رژیم تنش نرمال است ($\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h$)



شکل ۹- سازند سروک: رژیم تنش نرمال است ($\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h$)



شکل ۱۰- سازند فهلیان: رژیم تنش نرمال است ($\sigma_1:S_v, \sigma_2:S_H, \sigma_3:S_h$)

نتیجه گیری

با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی که مکانیزم اثر آنها از طریق زمان عبور امواج صوتی فشاری (P) و برشی (S) می باشد، در ۵ سازند یکی از میادین نفتی ایران، تحلیلی از میدان تنش صورت گرفت که نتایج زیر حاصل گردید:

۱. در همه سازندها رژیم تنش، نرمال بوده ($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$) اما در هر مرحله با توجه به پیچیدگی های ساختاری و عمق های مختلف، خواص مکانیک سنگی و ژئومکانیکی در هر سازند، متفاوت بوده و رفتارهای مختلفی در برابر محاسبات تنش های مورد نظر در هر سازند مشاهده گردید.

۲. سازند گچساران دارای لیتولوژی نمک و گچ می باشد پس رفتار پلاستیک از خود نشان می دهد و به همین دلیل اختلاف بین تنش های افقی (فاصله بین S_H و S_h) در این سازند کم بوده و در قسمتهایی از نمودار برهم منطبق می شوند (شکل ۶).

۳. هر کدام از سازندها که اختلاف بین تنش های افقی (فاصله بین S_H و S_h) در آن بیشتر باشد مناسب برای عملیات شکست هیدرولیکی می باشد، که سازند فهلیان بیشترین اختلاف بین تنش های افقی (فاصله بین S_H و S_h) را در بین سازندهای دیگر دارد (شکل ۱۰).

۴. سازند سروک، ایلام و فهلیان به دلیل لیتولوژی آهکی سخت و با شکستگی محدود، ضرایب الاستیک مانند ضریب یانگ استاتیکی (E) و مقاومت فشار تک محوره (UCS) افزایش پیدا می کنند.

مزیت این روش در آن است که بدون انجام عملیات حفاری و فقط از طریق داده های لرزه نگاری سه بعدی که در میادین نفتی به منظور اکتشاف نفت صورت می گیرد، می توان به نتایج قابل توجه از وضعیت تنش ها در سازندهای مختلف دست پیدا کرد. که برای عملیات های بعدی مانند حفاری می تواند موثر و سودمند باشد و از طریق آن می توان نسبت به طراحی یک مدل ژئومکانیکی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری، اقدامات لازم را انجام داد.

منابع

- [۱]. ر. حسینی دخت، م طالبی کناری، بهینه سازی طراحی لرزه نگاری سه بعدی با استفاده از الگوریتم زنتیک در پروژه پردیس، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۸۳، مهرماه ۱۳۹۰.
- [۳]. ل. نریمی زاده، م آبدیده، مطالعه شکستگی های سنگ مخزن بوسیله تلفیق مدل ژئومکانیکی و نمودارهای تصویرگر، مطالعه موردی میدان نفتی مارون، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین. آذر ماه ۱۳۹۱
- [۴]. وی. اس. وتوکوری، ک. کاتسویوما، ترجمه محدفاروق حسینی، ۱۳۷۸، "درآمدی بر مکانیک سنگ"، نشر کتاب دانشگاهی
- [2]. Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkbeiner, T., Grollimund, B. R., Moos, D. B., Peska, P., Ward, C. D., Wiprut, D. J., Int. J. Rock Mech. Mini. Sci. vol. 40, p. 1049-1076. "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells" 2003.
- [5]. Hubbert, M. K., Willis, D. G., 1957, "Mechanics of hydraulic fracturing". Pet. Trans. AIME, vol. 210, pp. 53-63. [6]. Zoback, M., 2007, "Reservoir Geomechanics", CAMBRIDGE University.
- [6]. Zoback, M., 2007, "Reservoir Geomechanics", CAMBRIDGE University.