

تعیین محدوده‌ی تنش برجا در اطراف چاه‌های آسیب‌دیده‌ی میدان نفتی مارون

میشم فارسی‌مدان^{۱*}، مرتضی احمدی^۲، کاوه آهنگری^۳، جاسم دشت بزرگی^۴

^۱ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده علوم پایه

^۲ عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس

^۳ عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

^۴ کارشناس شرکت ملی نفت ایران، اداره کل حفاری مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز

*Geoblog@yahoo.com

(دریافت: آبان ۱۳۹۲، پذیرش: تیر ۱۳۹۳)

چکیده

تعیین محدوده‌ای دقیق از تنش برجا در میادین نفتی از اهمیت ویژه‌ای جهت عملیات حفاری، تکمیل و نگهداری چاه و همچنین در علم ژئومکانیک نفت برخوردار می‌باشد. به زبانی ساده‌تر تعیین مقدار و جهت تنش‌های القایی ناشی از حفاری در اطراف چاه‌های حفاری شده اولین گام در بررسی ژئومکانیکی و تحلیل پایداری چاه می‌باشد. در این مقاله به دلیل اهمیت موضوع مچالگی لوله‌های جداری در میدان مارون، در گام نخست مطالعات ژئومکانیکی به تعیین محدوده‌ی تنش برجا در چاه‌های آسیب‌دیده پرداخته شده است. مقدار تنش قائم (S_v) در بازه ۸۵ تا ۹۰ مگاپاسکال برای تمامی چاه‌ها برآورد شد. برای تخمین مقدار محدوده‌ی تنش افقی حداکثر (S_{Hmax}) از روش تئوری گسلش آندرسون و چندضلعی تنش استفاده شد که مقداری نزدیک به تنش قائم بدست آمد. همچنین تنش افقی حداقل (S_{Hmin}) به وسیله روش‌های مختلف محاسبه و مقایسه شد که دارای کم‌ترین مقدار تنش برجا بود. در انتها رژیم گسلش منطقه از نوع گسلش نرمال / امتداد لغز تعیین و مشخص شد که به دلیل لیتولوژی نمک و وجود فشار منفذی بالا در سازند گچساران (منطقه مشکل‌زا)، تنش‌ها دارای مقدار نزدیک به هم می‌باشند و می‌توان حالت تنش را نزدیک به تنش هیدرو استاتیک در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: تنش برجا، مچالگی لوله جداری و آستری، تنش هیدرو استاتیک، سازند گچساران، میدان نفتی مارون.

۱. مقدمه

تنش برجا از سه جزء تنش قائم (S_v)، تنش افقی حداقل (S_{hmin}) و تنش افق حداکثر (S_{Hmax}) تشکیل شده که در یک عمق خاص هر سه به صورت عمود برهم به سنگ اعمال می‌شوند. با انجام حفاری، توزیع و همچنین مقدار تنش برجا از حالت اولیه تغییر می‌کند و در اطراف چاه دچار اغتشاش خواهد شد [۳]. این به هم ریختگی تنش در دیواره چاه، سبب بروز مشکلاتی همچون ناپایداری دیواره چاه^۱، تنگ‌شدگی چاه^۲، ایجاد شکستگی‌های کششی-القایی^۳ و خردشدگی^۴ در دیواره چاه و حرکت خزشی لایه‌های نمکی به سمت چاه خواهد شد. از مزایای دانستن و تعیین تنش برجا قبل و بعد از حفاری می‌توان به تعیین فشار بهینه گل^۵، انتخاب بهترین مسیر حفاری^۶ جهت دار به منظور کاهش ریسک و هزینه‌های نگهداری چاه، بررسی پدیده مچاله شدن^۷ و برش لوله‌های جداری، پایداری دیواره چاه و طراحی مته مناسب به منظور حفاری چاه‌های بعدی، انتخاب لوله‌های جداری مناسب، جلوگیری از تولید ماسه و ریزش دیواره چاه، انتخاب استراتژی مناسب جهت تکمیل چاه و همچنین میزان برداشت مخزن اشاره داشت. شکستگی‌های کششی-القایی و خردشدگی‌ها هر دو نشانه‌هایی از ناپایداری در دیواره چاه می‌باشد [۴]. این دو ناپایداری زمانی که تمرکز تنش در دیواره چاه از مقاومت چاه بیشتر شود ایجاد می‌شوند. بدین صورت که شکستگی‌های کششی-القایی و خردشدگی‌ها هنگامی رخ می‌دهند که مقدار تنش در دیواره چاه به ترتیب از مقاومت کششی و مقاومت فشاری سنگ‌ها بیشتر شوند. جهت شکستگی‌های کششی-القایی و خردشدگی‌ها به ترتیب نشان‌دهنده جهت تنش افقی حداقل (S_{hmin}) و تنش افق حداکثر (S_{Hmax}) می‌باشد [۴]. خردشدگی‌ها در دیواره چاه از طریق چاه نمودارهای تصویری^۸ و قطر سنج^۹ قابل شناسایی و بررسی هستند [۵]. در صورتی که شکستگی‌های کششی-القایی فقط با چاه نمودارهای تصویری قابل شناسایی می‌باشند [۶ و ۷]. سنگ‌های رسوبی که حفاری چاه‌های نفت در آن‌ها صورت می‌گیرد متخلخل بوده و حاوی سیالانی می‌باشند. فشار منفذی به میزان سیال موجود در سازند اطلاق می‌گردد. فشار منفذی نرمال در عمق H عبارت است از وزن ستون سیال بالای آن عمق، به طور پیوسته فشار منفذی نرمال p_{fn} برابر است با

$$p_{fn} = \int_0^H \dots f(z) g dz \quad (1)$$

چگالی سیال منفذی برای آب شور دریا در بازه $1.03-1.07 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد. بنابراین افزایش فشار منفذی نرمال با عمق تقریباً 10 MPa/km است. در بیشتر مواقع فشار منفذی از مقدار نرمال منحرف شده که در این حالت به آن فشار منفذی غیر نرمال می‌گویند که با افزایش عمق در سنگ‌های رسوبی چیزی در حدود $10/5 \text{ MPa/km}$ می‌باشد [۸].

^۱ Wellbore Instability

^۲ Tight Hole

^۳ Drilling-Induced Tensile Fracture

^۴ Breakout

^۵ Optimum Mud Weight

^۶ Optimum Trajectory

^۷ Casing Collapse

^۸ Image Log

^۹ Caliper

برای تعیین مقدار تنش افقی حداقل می‌توان از آزمون‌هایی همچون آزمایش نشست ۱۰، آزمایش نشست ادامه داده شده^{۱۱}، آزمایش ریز ترک^{۱۲} و آزمایش شکست هیدرولیکی^{۱۳} استفاده کرد. همگی این آزمون‌ها در عمق مورد نظر به صورت برجا انجام می‌شوند. نحوه انجام این آزمون‌ها بدین صورت است که با بالا بردن میزان فشار سیال در یک عمق خاص سبب ایجاد شکست در سازند و یا باز کردن شکستگی‌های از قبل موجود می‌شوند. فشاری که در لحظه شکست ثبت می‌شود به دلیل اینکه بر مقاومت سازند غلبه کرده است، می‌تواند مقدار تنش افقی حداقل را بازگو کند [۹].

هرچند که تاکنون هیچ آزمایش برجای خاصی جهت تعیین مقدار تنش افقی حداکثر ارائه نشده است، یکی از روش‌های معمول برای بدست آوردن محدوده‌ای از تنش افقی حداکثر، استفاده از چندضلعی تنش ۱۴ می‌باشد. بدین صورت که با داشتن مقدار فشار منفذی، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، میزان انحراف چاه، آزمون تنش افقی حداکثر و عرض خردشدگی (wBO)^{۱۵}، تنش قائم و تنش افقی حداقل می‌توان حدود پایین و بالای تنش افقی حداکثر را تعیین کرد.

۲. توزیع تنش در سازندهای نمکی

نمک یکی از سنگ‌های تبخیری است که خاصیت شکل‌پذیری بالایی با افزایش دما و تنش‌های اعمالی دارد. در سازندهای نمکی حالت تنش بسیار پیچیده و متغیر است. این سنگ تحت تأثیر تنش برجا در منطقه می‌تواند در درازمدت رفتار ویسکوپلاستیک و وابسته به زمان (خزشی) از خود نشان دهد [۱۰]. آلمان‌دو و دوسالت^{۱۶} با انجام آزمون‌های خزش سه محوری بر روی نمک متوجه شدند که تنش‌های برشی هشت‌وجهی و تنش‌های انحرافی بر روی خزش نمک تأثیر بسزایی دارند [۱۱]. در این رابطه با انجام آزمون‌های خزشی در دما و فشارهای مختلف بر روی ۱۰ مغزه نمک از سازند گچساران رفتار ویسکوپلاستیک نمک به اثبات رسید [۱]. به دلیل وجود پوش سنگ‌های تبخیری بر روی مخازن هیدروکربنی و جلوگیری از فرار آن، استفاده از سازندهای نمکی جهت دفن زباله‌های اتمی و ذخیره کردن هیدروکربن، مشخص شده است که سنگ نمک دارای تخلخل و تراوایی بسیار کم می‌باشد. لذا با افزایش تنش، قابلیت تراکم‌پذیری کمی داشته و به صورت خمیری شروع به حرکت می‌کند. این پدیده به دلیل وجود نسبت پواسون بالا در نمک‌هاست. این بدان معنی است که با وارد شدن یک مقدار خاص تنش به نمک، به دلیل عدم توانایی در نگهداری و برقرار داشتن تنش‌های انحرافی^{۱۷} درون خود، حالت تنش در آن کاملاً هیدرو استاتیک یا نزدیک به آن می‌شود. تنش در نمک‌ها حالت رهایی و آزادی^{۱۸} پیدا می‌کند و در نهایت به هیدرو استاتیک تبدیل می‌شود اما با فاصله گرفتن از نمک‌ها به سمت سازندهای غیر نمکی شرایط و میزان تنش بهم می‌خورد و از حالت هیدرو استاتیک خارج می‌شود. یعنی میزان تنش قائم و افقی در آن‌ها متفاوت می‌شود [۱۲]. حالت ایزوتروپ تنش فقط در سنگ‌های ویسکوز و گل‌های خیلی نرم ایجاد می‌شود. بر این اساس با قبول ایزوتروپ بودن تنش

^{۱۰} Leak-off Test (LOT)

^{۱۱} Extended Leak-off Test (XLOT)

^{۱۲} Mini-frac Test

^{۱۳} Hydraulic Fracturing

^{۱۴} Stress Polygon

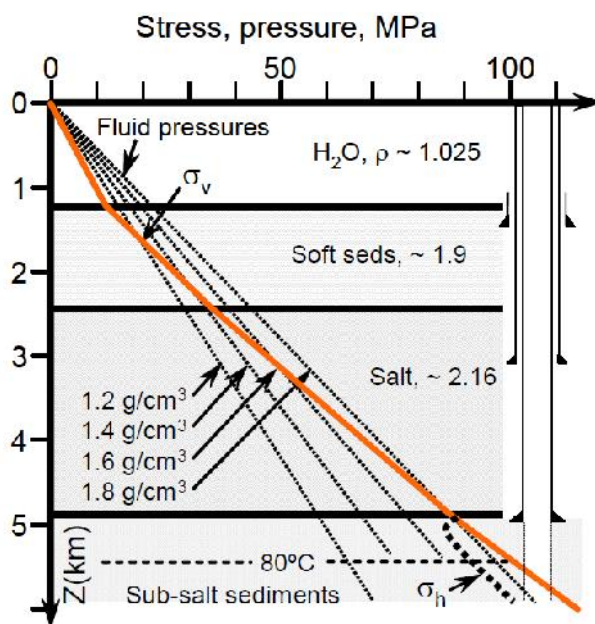
^{۱۵} Breakout Width

^{۱۶} Allemandou and Desseault

^{۱۷} Deviatoric Stresses

^{۱۸} Stress Relaxation

در نمک، مقدار تنش افقی تقریباً با وزن روباره برابر است. از این رو از واژه تحت تعادل در حفاری سازندهای نمکی استفاده می‌شود که به معنی کمتر بودن مقدار فشار گل از تنش قائم است (شکل ۱) [۱۳].



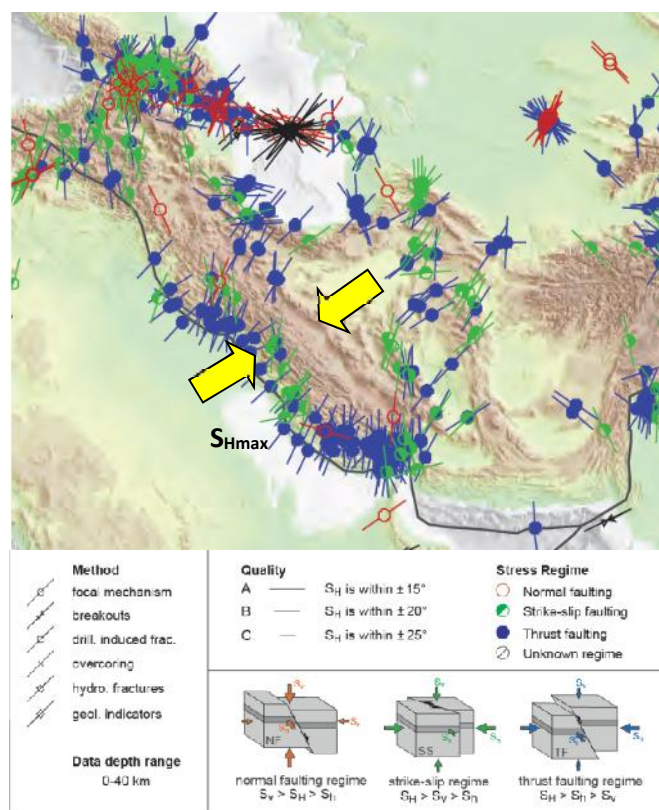
شکل ۱: تغییر گرادپان تنش در نمک [۱۳]

۳. میدان مارون و پدیده میچالگی لوله‌های جداری

میدان نفتی مارون در سال ۱۳۴۲ به روش لرزه نگاری کشف گردید. مخزن مارون در شمال شرقی شهر اهواز، هم‌جوار با میادین کوپال از شمال و آغاچاری از شرق و اهواز از شمال غرب می‌باشد. به طور کلی این میدان در قسمت شرقی حوزه عظیم فرو افتادگی دزفول قرار دارد. تا کنون در حدود ۴۰۰ حلقه چاه در آن حفر شده است. میدان مارون در قسمت غربی تا مرکزی با روند شمال غربی - جنوب شرقی و در قسمت انتهایی شرقی با روند شمال شرقی - جنوب غربی امتداد یافته و دارای ۶۵ کیلومتر طول و به طور متوسط ۷ کیلومتر عرض می‌باشد. فاصله بین ستیغ مخزن و عمیق‌ترین سطح آب و نفت در سازند آسماری حدود ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در میدان مارون گسلی به همین نام وجود دارد. گسل مارون در شمال غربی گسل آغاچاری و در کمر بند زاگرس چین خورده قرار دارد. طول آن نزدیک به ۵۰ کیلومتر است و روند شمال غربی - جنوب شرقی دارد. سازوکار گسل مارون از نوع راندگی است که در اثر عملکرد آن تاقدیس مارون به روی دشت مجاور رانده شده است.

طی گزارشی که در سال ۲۰۰۵ توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب و شرکت نفتی شلمبرژه در رابطه با مسئله میچالگی لوله‌های جداری در میدان مارون ارائه شد، مشخص شد که از زمان شروع تولید نفت در این میدان (سال ۱۹۵۰ میلادی) تا سال ۲۰۰۵، حدود ۴۸ حلقه چاه از ۲۶۷ حلقه چاه حفاری شده تا آن، زمان دچار مشکل میچالگی لوله‌های جداری شده‌اند. این میزان برابر با ۱۷/۵ درصد از کل چاه‌های حفاری شده می‌باشد [۱۴]. با استفاده از ابزارهای موجود، مشخص شد که اکثر این گسیختگی‌ها در بخش ۲-۴ سازند گچساران که از جنس نمک به همراه درصد کمتری از میان لایه‌های مارون و انیدریت می‌باشند صورت گرفته است، که بسته به محل قرارگیری چاه حفر شده، دارای ضخامت‌های متفاوتی می‌باشند (به علت تأثیرات تکتونیکی بر سازند گچساران که دارای خاصیت پلاستیک است این سازند در قسمت‌های مختلف میدان مارون دارای ضخامت‌های متفاوت می‌باشد). با توجه به لیتولوژی و رفتار خزشی نمک با گذر زمان، در صورتی که مقدار تنش اعمالی

حاصل از حرکت خزشی نمک‌های سازند گچساران به لوله جداری (در صورت عدم وجود سیمان در پشت لوله جداری) بیش از مقاومت فروریختگی لوله‌های جداری باشد، یقیناً سبب می‌چالگی آن‌ها خواهد شد. به همین علت، ضرورت تعیین مقدار تنش برجا جهت تحلیل و بررسی نرخ حرکت خزشی نمک‌های سازند گچساران در چاه‌های آسیب‌دیده میدان مارون احساس می‌شود. روند تاق‌دیس مارون به صورت شمال غربی- جنوب شرقی است. با مشاهده به نقشه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (شکل ۲) در جنوب غرب ایران می‌توان جهت تنش افقی حداکثر را بررسی کرد که آزمون‌های در حدود ۴۰ تا ۴۵ درجه دارد [۱۵].



شکل ۲: نقشه جهانی تنش برای ایران (آزمون کلی تنش افقی حداکثر بر اساس داده‌های کانونی زمین‌لرزه) [۱۵]

۴. تعیین تنش برجا در چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳

۴.۱ تعیین مقدار تنش قائم

مؤلفه تنش قائم از طریق چاه نمودارهای زمین‌شناسی و انتگرال‌گیری از مقدار چاه نمودار چگالی از سطح تا عمق مورد نظر قابل محاسبه می‌باشد.

$$S_v = \int_0^z \dots(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (2)$$

که g شتاب ثقل و z چگالی در عمق z و $\bar{\rho}$ چگالی میانگین روباره می‌باشد. چگالی سنگ‌های رسوبی از 2 gr/cm^3 تا 3 gr/cm^3 تغییر می‌کند. البته در بیشتر سنگ‌های رسوبی، چگالی میانگین $2/5 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد [۸]. در اعماق بالای مخزن

(روباره ۱۹) که معمولاً نمودار چگالی در آنجا وجود ندارد می‌توان چگالی سنگ‌ها را از روی نمودارهای گرافیکی زمین-سناسی ۲۰ و یا گزارشات حفاری روزانه برای هر لیتولوژی بدست آورد. برای محاسبه تنش قائم به دلیل قرارگیری سازند گچساران در بالای مخزن چاه نمودار دنیستی رانده نشده است. همان‌طور که گفته شد، از طریق میانگین‌گیری چگالی سنگ‌های سازندهای موجود، می‌توان مقدار تنش قائم را محاسبه نمود [۱۸]. با استفاده از چاه نمودارهای صوتی و آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مارن، انیدریت و نمک، چگالی متوسط هرکدام به ترتیب 2.35 gr/cm^3 ، 2.96 و 2.14 و چگالی متوسط آن‌ها برابر با 2.6 gr/cm^3 در نظر گرفته شد. لذا مقدار گرادیان تنش قائم در سازند گچساران برابر 0.026 MPa/m معادل با 1.15 psi/ft می‌باشد. بر این اساس با استفاده از رابطه ۱ مقدار تنش قائم در اعماق گسیختگی در چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ به ترتیب برابر با $85/3$ ، $88/86$ و $86/58$ مگاپاسکال محاسبه شد. لازم به ذکر است که اعماق گسیختگی در این سه چاه به ترتیب برابر با ۳۴۸۱، ۳۴۱۸ و ۳۳۳۰ متری است.

۲.۴ تعیین مقدار تنش افقی حداقل

برای محاسبه تنش افقی حداقل به دلیل عدم وجود آزمایش‌های شکست هیدرولیکی و نشت در سازند گچساران میدان مارون، از اطلاعات هرزروی گل در سازند ۲۱ به هنگام حفاری استفاده شد. بدین صورت که اگر وزن گل باعث ایجاد شکست در سازند یا باز شدن شکستگی‌های از قبل موجود شود، می‌توان وزن گل موجود را برابر با مقدار تنش افقی حداقل در نظر گرفت [۹ و ۱۷]. بر اساس اطلاعات وزن گل در گزارش‌های روزانه حفاری، میزان فشار منفذی در سازند گچساران در میدان مارون در بخش‌های ۴ تا پوش سنگ در حدود 1 psi/ft معادل 0.022 MPa/m می‌باشد. این مقدار حاکی از وجود مقدار زیاد آب شور ۲۲ در این اعماق است که پرفشار بودن سازند گچساران را نشان می‌دهد. میزان فشار منفذی در عمق گسیختگی در چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ به ترتیب برابر با $66/8$ ، $73/44$ و $71/55$ مگاپاسکال می‌باشد. در حفاری بخش ۴-۲ سازند گچساران در چاه مارون ۱۳۳ وزن گل تا 145 pcf یعنی گرادیان تنشی معادل با 0.0235 MPa/m هم رسیده که با هرزروی ۲۲ بشکه در ساعت مواجه و به 140 pcf کاهش داده شده است [۲]. فشار حاصل از وزن ستون گل یا همان فشار چاه در عمق گسیختگی برابر با $75/85$ مگاپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است که گرادیان شکست سازند گچساران برابر با 1 psi/ft معادل 0.024 MPa/m می‌باشد. بر اساس فشار شکست سازند گچساران، احتمالاً وزن گل 145 pcf می‌تواند سبب ایجاد شکستگی یا باز شدن ترک‌های از قبل موجود در عمق گسیختگی شود. به دلیل اینکه مشخص شده است که شکستگی ناشی از افزایش وزن گل تا بیش از مقاومت سازند، در جهت تنش افقی حداقل صورت می‌گیرد، با قرار دادن و تبدیل واحد وزن گل (pcf) به واحد فشار (MPa)، می‌توان مقدار وزن ستون گل در عمق گسیختگی را در حدود میزان تنش افقی حداقل دانست. در چاه مارون ۱۳۰ نیز در عمق گسیختگی وزن گل تا 150 pcf افزایش داده شده است [۲]. فشار چاه در این لحظه برابر با $80/54$ مگاپاسکال بوده و سپس وزن گل به 146 pcf کاهش یافته است. در چاه مارون ۴۲ نیز در عمق گسیختگی وزن گل تا 145 pcf افزایش یافته که به 135 pcf کاهش داده شده است [۲]. فشار چاه در عمق گسیختگی در این لحظه برابر با $74/74$ مگاپاسکال می‌باشد.

همچنین از رابطه‌ای که توسط هابرت و ویلیس (۱۹۵۷) ارائه شده است، استفاده شد (رابطه ۳). آن‌ها این رابطه را با انجام

^{۱۹} Overburden

^{۲۰} Graphic Well Log

^{۲۱} Formation Mud Losses

^{۲۲} Over Pressure

^{۲۳} Hubbert and Willis

و تحلیل آزمایشات شکست هیدرولیکی بسیار بدست آوردند [۱۹]. اما پس از آن‌ها زوباک و هیلی ۲۴ (۱۹۸۴) مشخص کردند که عدد ثابت ۰/۵ می‌تواند مربوط به تئوری گسلش اصطکاکی ۲۵ باشد که در این تئوری مقدار ضریب اصطکاک لغزش ۲۶ برابر با ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. بر این اساس مقدار تنش افقی حداقل در چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ محاسبه شد که به ترتیب برابر با ۷۶/۰۵، ۸۱/۱۵ و ۷۹/۰۶ مگاپاسکال می‌باشند.

$$S_{hmin} = 0.5 (Sv - Pp) + Pp \quad (۳)$$

برکلز و ون اکلن ۲۷ (۲۰۰۸) نیز از داده‌های آزمایش شکست هیدرولیکی در چندین منطقه استفاده کردند و رابطه بین تنش افقی و عمق را بدست آوردند. آن‌ها همچنین اثر فشارهای غیر نرمال موجود را در رابطه تأثیر دادند و روابط ۴ و ۵ را ارائه دادند [۸]:

$$h = 0.0053 H^{1.145} + 0.46 (P_f - P_{fn}) \quad \text{For } H < 3500 \quad (۴)$$

$$h = 0.026 H - 31.7 + 0.46 (P_f - P_{fn}) \quad \text{For } H > 3500 \quad (۵)$$

که در این روابط H عمق بر حسب متر، pf فشار منفذی بر حسب MPa ، P_{fn} فشار نرمال منفذی (با توجه به گرادبان MPa/km و $10/5$) و h تنش افقی حداقل بر حسب MPa می‌باشد. از رابطه‌های ۴، ۵، ۶ و همچنین از چندضلعی تنش برای تخمین مقدار تنش افقی حداقل نیز استفاده شد که نتایج بدست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. رابطه ۶ توسط ایتون ۲۸ (۱۹۶۹) بکار رفت [۲۱].

$$S_{hmin} = \frac{v}{1-v} (Sv - PP) + PP \quad (۶)$$

که در آن Pp و U به ترتیب فشار منفذی و نسبت پواسون هستند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار تنش افقی حداقل بدست آمده از رابطه ۶ خیلی نزدیک به تنش قائم می‌باشد. علت این امر خاصیت ویسکوپلاستیک نمک و نسبت پواسون بالای آن است.

۳.۴ تعیین حدود تنش افقی حداکثر

هرچند که در مقاطع نمکی مقدار تنش‌های قائم، افقی حداقل و حداکثر را با هم برابر می‌دانند اما جهت بررسی دقیق‌تر از روش چندضلعی تنش نیز این موضوع دنبال شد. در میدان مارون در هیچ یک از چاه‌های آسیب‌دیده تاکنون هیچ‌گونه چاه نمودار تصویری در سازندهای بالایی مخزن جهت تصویربرداری از شکستگی‌های کششی-القایی، خردشدگی‌ها و یا حتی شکستگی‌های طبیعی در دیواره چاه رانده نشده است. با مطالعات انجام‌شده توسط متخصصین ژئومکانیک نفت در سراسر دنیا مشخص شده است که ایجاد شکستگی‌های کششی-القایی و یا خردشدگی‌ها در دیواره چاه فاقد ارتباط با لیتولوژی است. بدین معنی که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در هر نوع لیتولوژی در طول مسیر چاه در حین حفاری ایجاد شوند. به همین علت در صورت راندن چاه نمودارهای تصویری همچون UBI و FMI می‌توان جهت و مقدار تنش‌های افقی حداقل و افقی حداکثر را شناسایی و تحلیل کرد. برای تعیین مقدار تنش افقی حداکثر با استفاده از چندضلعی تنش، نیاز به آزمون تنش افقی حداکثر و عرض خردشدگی است. به دلیل عدم وجود این دو پارامتر، حتی با داشتن مقدار تنش قائم، تنش افقی حداقل، مقاومت فشاری تک‌محوری، فشار منفذی و فشار چاه باز هم نمی‌توان مقدار دقیق تنش افقی حداکثر را در این چاه‌ها مشخص

²⁴ Zobak and Healy

²⁵ Friction Faulting Theory

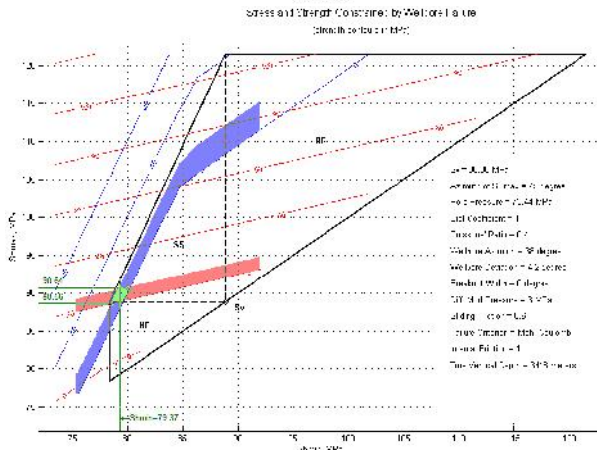
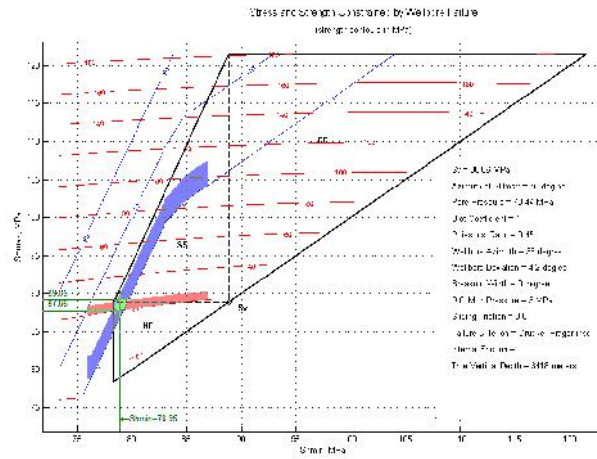
²⁶ Sliding Friction Coefficient

²⁷ Breckels and Van Eekelen

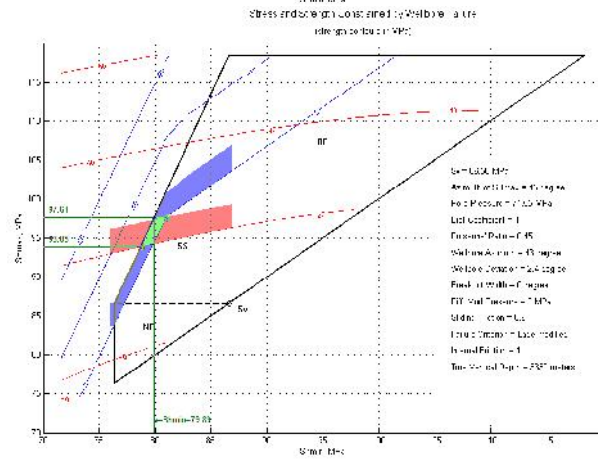
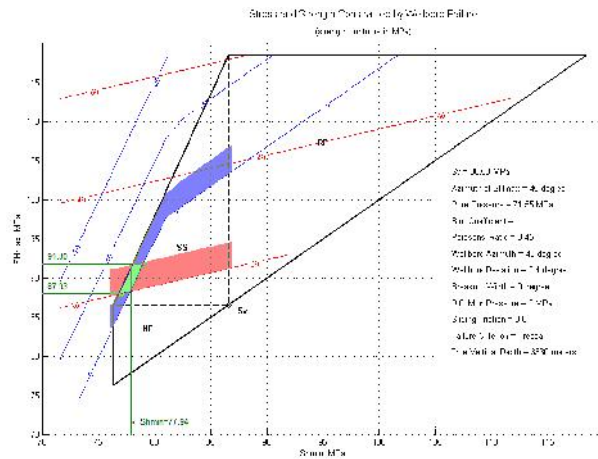
²⁸ Eaton

کرد. در شکل‌های ۳ تا ۱۱ چندضلعی‌های تنش با استفاده از معیارهای شکست Mohr-Coulomb, Lade modified, Tresca, و Drucker-Prager و Wiebols-Cook modified برای چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ رسم شده است.

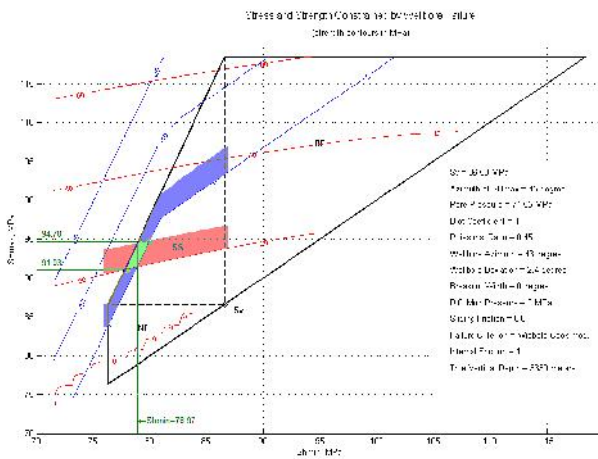
در شکل‌های ۳ تا ۱۱ اطلاعات لازم جهت رسم چندضلعی تنش در قسمت راست آن‌ها دیده می‌شود. در اینجا اطلاعاتی که در دسترس نیستند، شامل مقدار عرض خردشدگی (WBO) و آزیموت تنش افقی حداکثر می‌باشد. هر دوی این اطلاعات را می‌توان از تفسیر چاه نمودارهای تصویری بدست آورد. به همین دلیل، عرض خردشدگی (WBO) مساوی صفر درجه و آزیموت تنش افقی حداکثر بر اساس داده‌های کانونی زمین‌لرزه (شکل ۲) برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. خط‌های موازی قرمز رنگ کم‌شیب کنتورهای میزان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ می‌باشند که با انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمک‌های سازند گچساران ۲۲ مگاپاسکال بدست آمده است. همچنین مقدار نسبت پواسون برای نمک‌های سازند گچساران ۰/۴۵ برآورد شده است [۱]. خط‌های موازی آبی رنگ پرشیب نیز کنتورهای میزان مقاومت کششی سنگ هستند که برای نمک در حدود ۱- تا ۲- مگاپاسکال می‌باشد [۱]. بر این اساس با وارد کردن این دو مقدار و تلاقی آن‌ها منطقه‌ای بر روی چندضلعی تنش ایجاد می‌شود که می‌توان بر اساس آن مقدار تنش افقی حداقل و همچنین حدود بالایی و پایینی تنش افقی حداکثر را مشخص کرد. با توجه به نتایج حاصله از معیارهای شکست مختلف و همچنین دانستن این موضوع که حالت تنش در سازندهای نمکی به صورت هیدرو استاتیک است، لذا در تحلیل تنش در چاه، معیارهای شکست مور-کولومب و دراگر-پراگر از دقت بیشتری برخوردارند.



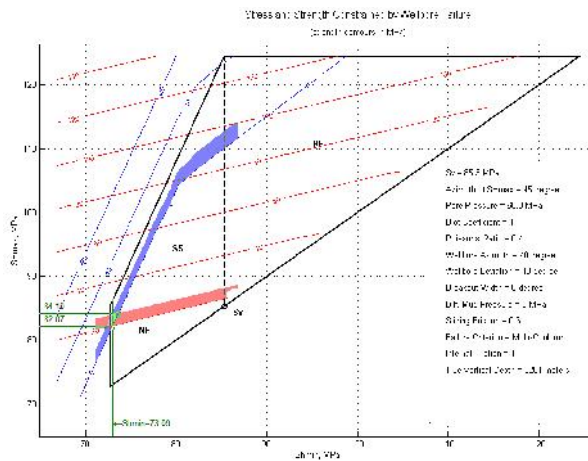
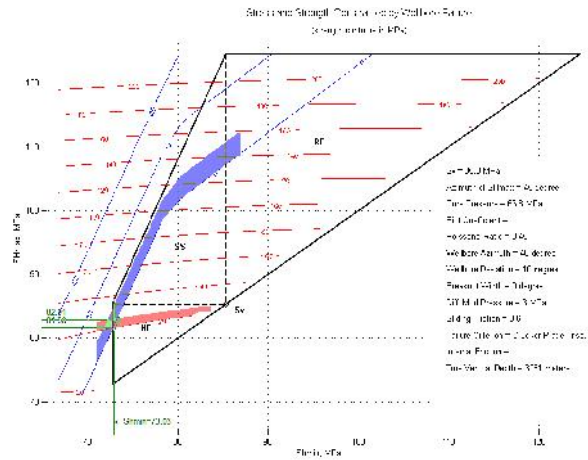
شکل ۳: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی Mohr-Coulomb (چپ) و Drucker-Prager (راست) برای چاه مارون ۱۳۰



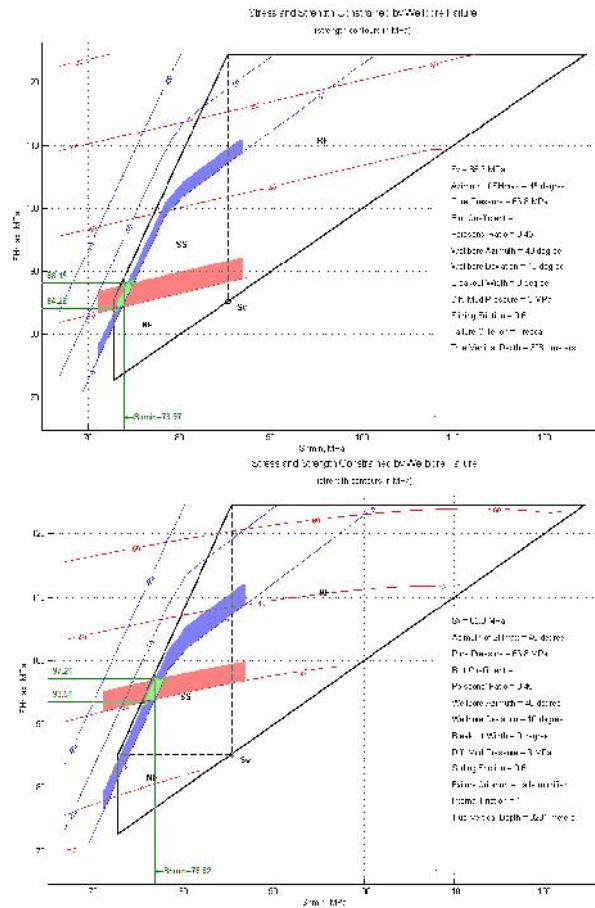
شکل ۷: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی **Lade modified** (چپ) و **Tresca** (راست) برای چاه مارون ۱۳۳



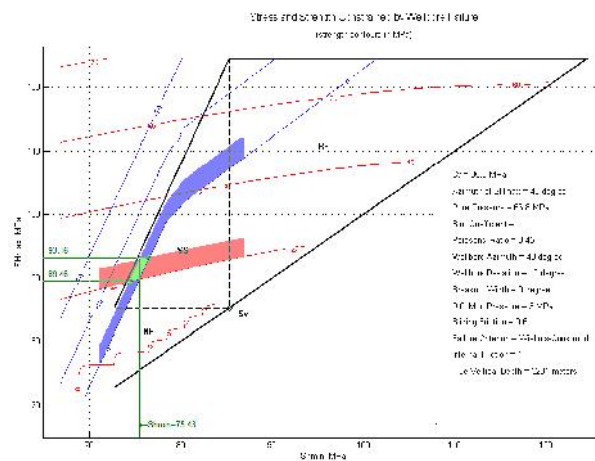
شکل ۸: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی **Wiebols-Cook modified** برای چاه مارون ۱۳۳



شکل ۹: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی Mohr-Coulomb (چپ) و Drucker-Prager (راست) برای چاه مارون ۴۲



شکل ۱۰: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی Lade modified (چپ) و Tresca (راست) برای چاه مارون ۴۲



شکل ۱۱: چندضلعی تنش بر اساس معیار گسیختگی Wiebols-Cook modified برای چاه مارون ۴۲

۵. تفسیر تنش برجا بر اساس معیار شکست مور- کولومب

با توجه به مراحل انجام شده جهت تعیین مقدار تنش برجا بر اساس معیارهای شکست مختلف، به دلیل جامعیت معیار شکست مور- کولومب در مباحث مکانیک سنگ و همچنین تراوایی اندک سازند گچساران (شرط لازم جهت استفاده از این معیار شکست)، در زیر به تفسیر چندضلعی های تنش که بر اساس این معیار شکست رسم شده اند پرداخته شده است.

در چاه مارون ۱۳۰ مقدار تنش افقی حداقل برابر با ۷۹/۳۷ مگاپاسکال محاسبه شده است که با مقدار ۸۰/۵۴ مگاپاسکال (رجوع به بخش ۴-۲) اختلافی اندک و در حدود ۱ مگاپاسکال دارد. در عمق گسیختگی چاه مارون ۱۳۰ مقدار تنش قائم برابر با ۸۸/۸۶ مگاپاسکال می باشد. همان طور که دیده می شود حد پایینی تنش افقی حداکثر برابر با ۸۸/۵۶ و حد بالایی آن برابر با ۹۰/۶۴ مگاپاسکال بوده و با مقدار تنش قائم اختلافی کم و در حدود ۲ مگاپاسکال دارد. همچنین رژیم گسلش در ناحیه بین گسلش نرمال و امتداد لغز قرار گرفته است (شکل ۳).

همچنین بر اساس نتایج حاصله از نرم افزار میزان تنش افقی حداقل برای چاه مارون ۱۳۳ در عمق گسیختگی برابر با ۷۶/۶۶ مگاپاسکال است که با مقدار ۷۵/۸۵ مگاپاسکال (رجوع به بخش ۴-۲) اختلافی کم و در حدود ۱ مگاپاسکال دارد. حدود بالایی و پایینی تنش افقی حداکثر در اینجا به ترتیب ۸۴/۱۵ و ۸۶/۰۹ مگاپاسکال و مقدار تنش قائم ۸۶/۵۸ مگاپاسکال است. این مقدار تنش قائم تقریباً با حد بالایی تنش افقی حداکثر برابر است. همچنین رژیم گسلش در ناحیه گسلش نرمال قرار گرفته است (شکل ۶).

در چاه مارون ۴۲ نیز میزان تنش افقی حداقل برابر ۷۳/۰۹ مگاپاسکال برآورد شد که با مقدار ۷۴/۷۳ مگاپاسکال (رجوع به بخش ۴-۲) اختلافی در حدود ۱ مگاپاسکال دارد. مقدار تنش قائم نیز ۸۵/۳ مگاپاسکال در عمق گسیختگی است که با حد بالایی تنش افقی حداکثر که برابر با ۸۴/۱ مگاپاسکال اختلاف اندکی دارد. همچنین رژیم گسلش در ناحیه گسلش نرمال قرار گرفته است (شکل ۹).

این اختلاف کم نشان دهنده نزدیک شدن مقدار و حالت تنش برجا به حالت هیدرو استاتیک در نمک های سازند گچساران می باشد. یکی از دلایل نزدیکی مقدار تنش برجا، مقدار بالای فشار منفذی است که باعث نزدیک شدن مقدار تنش برجا در چندضلعی تنش خواهد شد [۱۸]. مراحل تعیین تنش برجا برای کلیه اعماق سازند گچساران در چاه های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ انجام شد و گرادیان آن به همراه گرادیان فشار منفذی نرمال، فشار منفذی و فشار چاه در اشکال ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود از اعماق ۳۰۰۰ متری به بعد مقدار تنش افقی حداکثر و تنش قائم خیلی به هم نزدیک می شود اما از مقدار تنش افقی حداقل بیشترند. البته در ناحیه گسیختگی به دلیل وجود لیتولوژی نمک (خاصیت ویسکوپلاستیک) مقدار هر سه تنش به هم نزدیک می شود. رژیم گسلش نیز به صورت $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ می باشد که در واقع نشان دهنده رژیم گسلش نرمال / امتداد لغز است. در این تصاویر عمق گسیختگی ها به وسیله پیکان مشخص شده است. همان طور که دیده می شود در اعماق گسیختگی، به دلیل لیتولوژی نمک و میزان فشار منفذی بالا، تنش برجا محاسبه شده دارای مقدار بسیار نزدیک به هم می باشد و می توان حالت تنش را نزدیک به هیدرو استاتیک در نظر گرفت. همچنین نکته قابل توجه در ناحیه گسیختگی، افزایش مقدار تنش افقی حداقل نسبت به گرادیان فشار شکست سازند است. در جدول ۱ خلاصه ای از نتایج بدست آمده از مقدار تنش برجا در چاه های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳ آورده شده است.

جدول ۱: نتایج بدست آمده از مقدار تنش برجا در چاه‌های مارون ۴۲، ۱۳۰ و ۱۳۳.

Well No.	Depth (m)	P_p (MPa)	Max Mud Weight (pcf)	P_{frac} (MPa)	S_v (MPa)	S_{hmin} (Eaton) (MPa)	S_{hmin} (Excess of P_w) (MPa)	S_{hmin} (Hubbert and Willis) (MPa)	S_{hmin} (Breckels & van Eekelen) (MPa)	S_{hmin} (Stress polygon) (MPa)	S_{Hmax} (Stress polygon) (MPa)
MN#130	3481	73.44	145	85.04	88.86	86.06	80.54	81.15	76.16	79.37	88.56 - 90.64
MN#133	3330	71.55	150	82.85	86.58	83.84	75.85	79.06	74.02	76.66	84.15 - 86.09
MN#42	3281	66.8	145	81.63	85.3	81.94	74.74	76.05	71.12	73.09	82.07 - 84.1

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به اهمیت تعیین مقدار تنش برجا در چاه‌های نفت و گاز چه قبل از حفاری چه پس از آن در این مقاله سعی بر تخمین تنش برجا در بخش‌های نمکی سازند گچساران در چاه‌های آسیب‌دیده میدان مارون شد. با استفاده از تمامی اطلاعات موجود از چاه‌های آسیب‌دیده میدان مارون و به‌کارگیری آن‌ها در روابط و روش‌های مختلف جهت محاسبه مقدار تنش برجا، مشخص شد که تنش برجا در اعماق گسیختگی چاه‌های آسیب‌دیده میدان مارون دارای مقدار نزدیک به هم می‌باشد تا جایی که می‌توان حالت تنش را از نوع هیدرو استاتیک دانست.

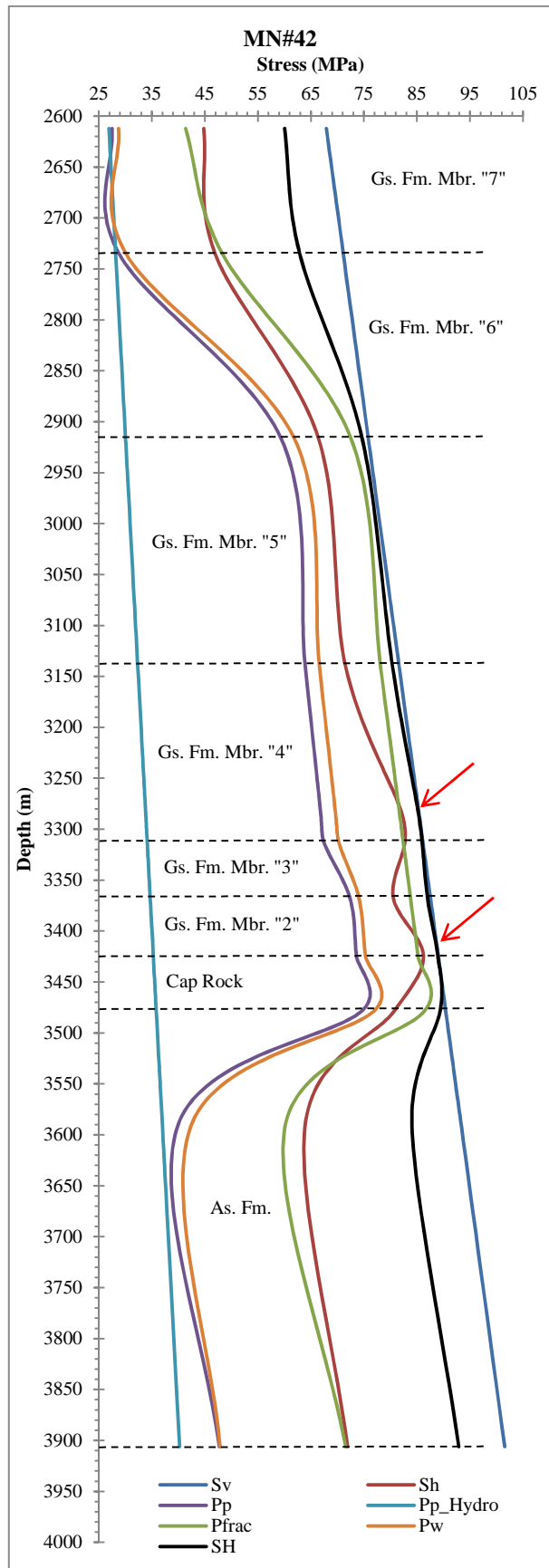
از مزایای تعیین مقدار تنش برجا، مشخص شدن رژیم گسلش منطقه است که در این تحقیق از نوع گسلش نرمال / امتداد لغز بدست آمد. لازم به ذکر است که اختلاف بین مقدار تنش افقی حداقل با تنش افقی حداکثر و تنش قائم (برای فرض حالت هیدرو استاتیک) در هر سه چاه می‌تواند به علت عدم وجود اطلاعات کامل، استفاده از روابط تجربی و از همه مهم‌تر وجود میان لایه‌های مارن و انیدریت در اعماق گسیختگی باشد. البته استفاده از رابطه ایتون (۱۹۶۹) (به دلیل پارامترهای موجود در خود)، مقدار نزدیک‌تری از تنش افقی حداقل را با تنش قائم در اعماق گسیختگی بدست می‌دهد. بنابراین برای تعیین تنش افقی حداقل، استفاده از این رابطه پیشنهاد می‌شود.

در نواحی گسیختگی مشخص شد که مقدار تنش افقی حداقل از میزان گرایان شکست سازند بیشتر می‌شود. این نکته می‌تواند نشان‌دهنده ناحیه گسیختگی و حتی ایزاری برای پیش‌بینی ناحیه مشکل‌ساز در حفاری چاه‌های جدیدتر باشد. با توجه به اینکه تاکنون در سازند گچساران میدان مارون چاه نمودار دنسیتی (جهت تعیین مقدار چگالی حقیقی سازندها و محاسبه مقدار تنش قائم)، چاه نمودار تصویری (همچون UBI، FMI جهت آنالیز شکستگی‌های کششی - القایی و خردشدگی - ها)، چاه نمودار صوتی (همچون DSI جهت تعیین مقدار دقیق پارامترهای الاستیک سازندها)، آزمایش نشت و شکست هیدرولیکی (جهت تعیین مقدار دقیق تنش افقی حداقل) و همچنین تعیین مقدار دقیق فشار منفذی صورت نگرفته است، پیشنهاد می‌شود که جهت تعیین مقدار تنش برجا و تحلیل‌های ژئومکانیکی پیشنهادات فوق در برنامه‌های آتی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب قرار گیرد.

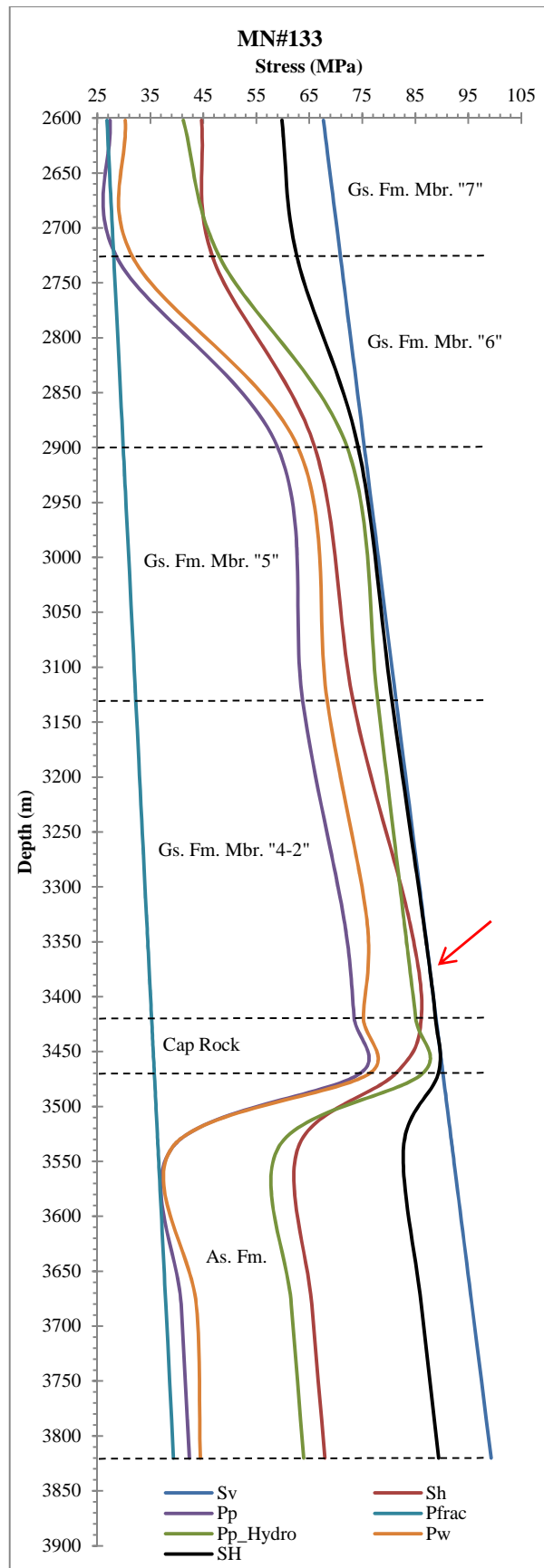
تشکر و قدردانی

در انتها لازم می‌دانیم که از اداره‌های زمین‌شناسی و پژوهش مناطق نفت‌خیز جنوب، به ترتیب آقایان حسین شیخ زاده و حمیدرضا عسکری جهت همکاری دوستانه و در اختیار قرار دادن اطلاعات مفید تشکر لازم را داشته باشیم.

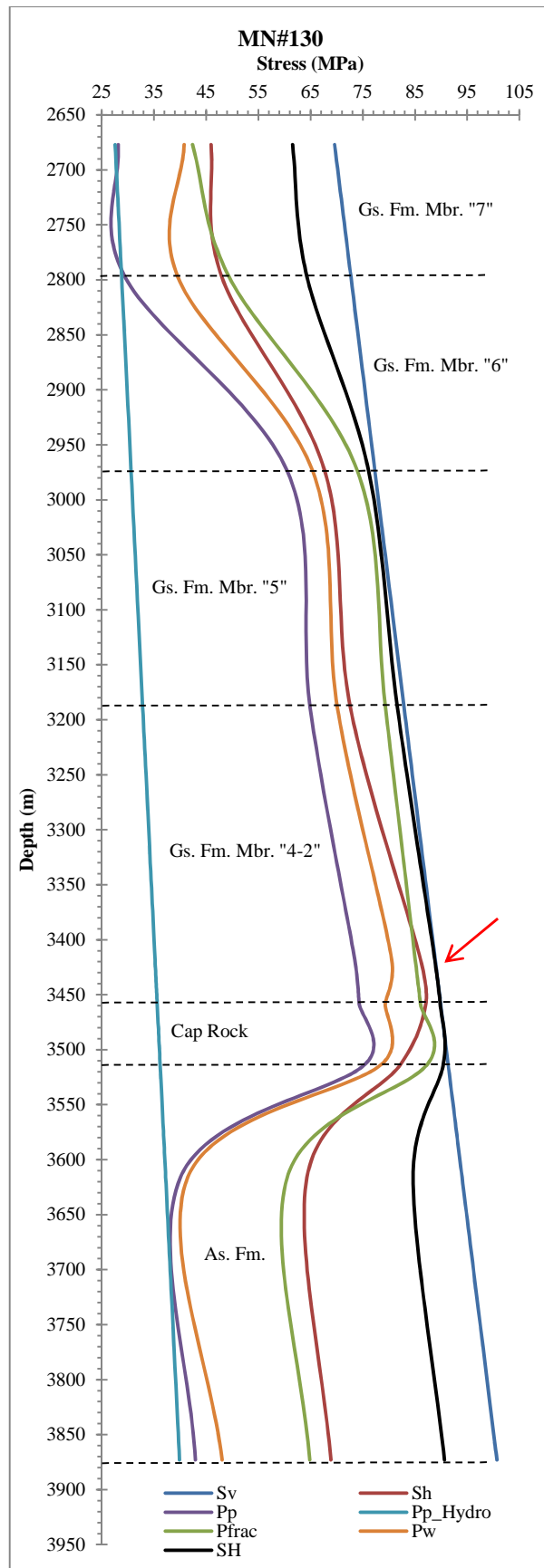
" هیئت تحریریه مجله از آقایان دکتر عزت اله کاظم زاده و دکتر بهرام حبیب نیا و مهندس بهزاد مهرگینی که داوری مقاله را به عهده داشته اند، تشکر و قدردانی می‌نماید "



شکل ۱۲: مقدار تنش برجا تعیین شده برای چاه مارون ۴۲



شکل ۱۳: مقدار تنش برجا تعیین شده برای چاه مارون ۱۳۳



شکل ۱۴: مقدار تنش برجا تعیین شده برای چاه مارون ۱۳۰

منابع

- [۱] فارسی مدان، م، ۱۳۸۹، بررسی اثر خزش سنگ در ایجاد پدیده مچالگی لوله‌های جداری در میدان نفتی مارون، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- [۲] گزارش‌های روزانه حفاری میدان مارون، بایگانی اداره کل حفاری شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز.
- [3] Jaeger, J. C. and N. G. W. Cook, 1979, *Fundamentals of rock mechanics*, Chapman & Hall, New York.
- [4] Bell, J. S. and D. I. Gough, 1979, Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 475–482.
- [5] Peska, P. and M. D. Zoback, 1995, Compressive and tensile failure of inclined borehole and determination of in situ stress and rock strength. *J. Geophys. Res.* 100 (B7), 12791–12811.
- [6] Brudy, M. and M. D. Zoback, 1993, Compressive and tensile failure of bore-holes arbitrarily inclined to principal stress axis: application to the KTB boreholes, 34th US Symposium on Rock Mechanics Germany.
- [7] Lund, B. and M. D. Zoback, 1999, Orientation and magnitude of in situ stress to 6.5 km depth in the Baltic Shield, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, 169–190.
- [8] Fjaer, E., Holt, R. M. et al, 1992, *Petroleum Related Rock Mechanics*, 2nd edition, Amsterdam, Elsevier.
- [9] Zoback, M. D., 2007, *Reservoir Geomechanics*, Cambridge University Press.
- [10] Jandakaew, M., 2007, Stress-path dependency of rock salt. *Rock Mechanics*, Fuenkajorn & Phien-wej, ISBN 978 974 533 613 1.
- [11] Allemandou, X. and M. B. Dusseault, 1993, Procedure for cyclic creep testing of salt rock, results and discussion. In *Proceedings of the 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, pp. 207-218.
- [12] Fredrich, J. T. and A. F., Fossum, 2002, Large-Scale Three-Dimensional Geomechanical Modeling of Reservoirs: Examples from California and the Deepwater Gulf of Mexico. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 57, No. 5, pp. 423-441.
- [13] Maurice, B., Dusseault., et al, 2004, drilling through salt: constitutive behavior and drilling strategies.
- [14] Rolf, B., Mohammed, W. and P. Mohsen, 2006, A Preliminary Study of Casing Collapse in Iran. Hydroquest report, Schlumberger Oil Company.
- [15] www.world-stress-map.org
- [16] Eaton, B. A., 1969, Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations. *Journal of Petroleum Technology*, 246, 1353–1360.
- [17] Ward, C. D., Andreassen, E., 1997, Pressure while drilling data improves reservoir drilling performance. SPE 37588. *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam.
- [18] Zoback, M. D., et al, 2003, Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, pp1049–1076.
- [19] Hubbert, M. K. and D. G. Willis, 1957, Mechanics of hydraulic fracturing. *Petr. Trans. AIME*, 210, 153–163.
- [20] Zoback, M. D. and J. H. Healy, 1984, Friction, faulting, and “in situ” stresses. *Annales Geophysicae*, 2, 689–698.
- [21] Eaton, B. A., 1969, Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations. *Journal of Petroleum Technology*, 246, 1353–1360.

Determination of In-situ stress in the Marun oilfield's failure wells

A. Farsimadan*, M. Ahmadi, K. Ahangari and J. Dashbozorgi
*Geoblog@yahoo.com

Received: November 2013, Accepted: July 2014

Abstract

Determination of In-situ stress domain in oilfields is so important for drilling, well completion and petroleum geomechanics. Simply, determination of magnitude and direction of In-situ stress around wellbore is the first step of geomechanical studies and wellbore stability particularly. Preliminarily, because of importance of casing collapse problem in the Marun oilfield, the magnitude of in-situ stress is determined. The magnitude of vertical stress (S_v) was in range of 85 to 90 MPa. The minimum horizontal stress (S_{hmin}) determined by some analytical methods. For estimating of maximum horizontal stress (S_{Hmax}) domain we used Anderson's faulting theory and stress polygon. So the magnitude of S_{Hmax} was so close to S_v and the faulting regime shows normal/strike slip. Within Gachsaran Formation in depth of collapses because of salty lithology and high pore pressure, magnitude of In-situ stress is so close and it can be assume hydrostatic stress state.

Keywords: In-situ stress, Casing collapse, Hydrostatic stress state, Gachsaran Formation, Marun oilfield.