

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی نفت گرایش حفاری و بهره‌برداری

تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه مکانیکی خردایش سنگ در حفاری چاه‌های

نفت یکی از میادین جنوب غرب ایران

دانشجو: محمد تیموری

اساتید راهنما:

دکتر احمد رمضان‌زاده

دکتر بهزاد تخم‌چی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۰۳۱
 تاریخ: ۹۶/۷/۱۷

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتمه آقای محمد تیموری با شماره دانشجویی ۹۲۰۴۱۳۴ رشته مهندسی نفت گرایش حفاری و بهره برداری تحت عنوان تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی مکانیکی ویژه خردایش سنگ در حفاری چاه های نفت یکی از میادین جنوب غرب ایران که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۱ با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۸۰ تا ۱۰۰) درجه درجه مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استادیار	دکتر احمد رمضان زاده	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر بهزاد تخم چی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر سوسن ابراهیمی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سجاد نغمیان	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر مجید نیکخواه	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مقطع مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

به لطف داشتن خانواده ام زندگی شیرینتر و دنیا رنگینتر است پس این
تحفه ناقابل با عشق و علاقه به تک تک اعضای خانواده ام تقدیم باد که
بودن و شاد بودنشان تنها دلیل زندگیست.

تشکر و قدردانی

در این زمان بر خود لازم می‌دانم که از زحمات جناب **دکتر احمد رمضان زاده** به عنوان استاد راهنما که در طول مراحل اجرای پایان‌نامه همواره با صبر فراوان و راهنمایی‌های مؤثر خود مرا در پیمودن مسیر یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از جناب **دکتر بهزاد تخم چی** که با وجود دوری راه و مشغله‌های فراوان خود در مواقع لازم پاسخگو و اهنمای حل مشکلاتم بودند نیز بسیار تشکر می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب محمد تیموری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت- حفاری و بهره- برداری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی مکانیکی ویژه خردایش سنگ در حفاری چاه های نفت یکی از میادین جنوب غرب ایران** تحت راهنمایی آقایان دکتر رمضانزاده و دکتر تخم چی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته و یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

حفاری چاه های نفت و گاز به عنوان یکی از چالش برانگیزترین و هزینه برترین عملیات های مرتبط با سنگ شناخته می شود زیرا پارامترهای مختلفی همچون سازند زمین شناسی، تکنولوژی تجهیزات و عامل انسانی در پیچیدگی آن دخیل هستند. به دلیل اینکه حین حفاری اطلاعات سازندی در هر لحظه در دسترس نیست لازم است راهکارهایی برای پیش بینی شرایط سازند و اعمال پارامترهای مناسب حفاری جهت بالا بردن بازدهی عملیات اندیشیده شود.

رکن اصلی عملیات حفاری شکست سنگ به وسیله ابزار برش (مته حفاری) می باشد. در یک عملیات بهینه می بایست شکست سنگ با کمترین اتلاف انرژی صورت گیرد. تیله در سال ۱۹۶۵ مفهوم انرژی ویژه مکانیکی را جهت بررسی عددی انرژی مصرف شده جهت شکست یک واحد حجمی سنگ معرفی کرد. تحقیقات دیگر محققان نشان داد که شکست سنگ به خواص مکانیکی و مقاومتی سنگ وابسته است و مهمترین پارامتر مقاومتی سنگ مقاومت فشاری آن می باشد. شرکت های حفاری مهمترین معیار در طراحی و انتخاب مته حفاری را مقاومت فشاری تک محوره در نظر می گیرند. پس در این تحقیق تلاش است تا ارتباطی بین انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ برقرار گردد تا با استفاده از این رابطه ها خواص مقاومتی سنگ را هنگام حفاری تخمین زد و در اعمال پارامترهای حفاری بهینه یا انتخاب مته مناسب از مقدار تخمینی مقاومت سنگ استفاده کرد.

در این تحقیق ابتدا با جمع آوری حداکثر داده های لازم (داده های حفاری، نگاره های پتروفیزیکی و نتایج آزمایشات مغزه) در لایه سروک یکی از میدین نفت جنوب غرب کشور پایگاه داده تشکیل شد. سپس با استفاده از داده های پتروفیزیکی مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه ساخته و توسط معیارهای شکست مدل مورد نظر اعتبارسنجی گردید که تا حد زیادی شکستگی های برشی ثبت شده پیش بینی گردید. لازم به ذکر است به دلیل موجود نبودن داده های موج برشی در تمام چاه ها، با استفاده از دادهای موج برشی یکی از چاه ها رابطه ای بین سرعت موج برشی با سرعت موج

فشاری و چگالی برقرار شده است که ضریب تعیین ۹۲ درصدی رابطه نشان از دقت بالای آن در پیش بینی دارد. از رابطه به دست آمده جهت پیش بینی سرعت موج برشی در چاه دیگر استفاده می شود.

با استفاده از داده های حفاری مقادیر انرژی ویژه محاسبه و سپس سعی در یافتن ارتباط بین این پارامتر و خواص ژئومکانیکی سنگ گردید. نتایج تحلیل ها نشان داد در شرایط حفاری کارآمد مقاومت فشاری تک محوره سنگ، نسبت پواسون و عمق از همبستگی بالاتری با انرژی ویژه برخوردار هستند و ضریب تعیین رابطه رگرسیونی در چاه A و B به ترتیب ۰/۷ و ۰/۶۲ می باشد. در حالی که در عملیات مغزه گیری به دلیل اعمال پارامترهای حفاری کنترل شده، عامل اصلی موثر در انرژی ویژه حفاری، مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. لذا در قسمتی از چاه که مغزه گیری انجام شده است از داده های نگاره های چگالی، سرعت موج برشی و پرتو گاما جهت برقراری ارتباط با انرژی ویژه استفاده شد که رابطه حاصل ضریب تعیین ۰/۶۷ دارد.

بررسی تغییرات انرژی ویژه حفاری بر حسب نرخ نفوذ حفاری در چاه مورد مطالعه نشان می دهد شرایط بهینه حفاری در مقادیر انرژی ویژه مکانیکی کمتر از دو گیگاپاسکال اتفاق می افتد. با استفاده از داده های وزن روی مته، نرخ نفوذ حفاری و گشتاور به عنوان ورودی و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مقدار مقاومت فشاری تک محوره در دو چاه با ضریب همبستگی ۰/۸۴ (همه داده ها) قابل تخمین است که می تواند در بهینه سازی پارامترهای حفاری از آن استفاده نمود. همچنین روابط رگرسیونی جهت تخمین مقاومت فشاری در دو چاه A و B ضرایب تعیین ۰/۷۳ و ۰/۶۶ دارا می باشند.

واژه های کلیدی:

انرژی ویژه مکانیکی، مدل ژئومکانیکی، پارامترهای ژئومکانیکی، رگرسیون، شبکه عصبی، بهینه سازی.

فهرست عناوین

۱ فصل اول: کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ سابقه تحقیق ۳

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق ۶

۱-۴ اهداف و روش انجام تحقیق ۸

۱-۵ ساختار پایان نامه ۹

۲ فصل دوم: مبانی حفاری و عوامل موثر بر انرژی ویژه مکانیکی ۱۱

۲-۱ مقدمه ۱۲

۲-۲ حفاری ۱۲

۲-۲-۱ حفاری ضربه ای ۱۳

۲-۲-۲ حفاری دورانی ۱۳

۲-۳ مته حفاری ۱۴

۲-۳-۱ مته های تیغه ثابت ۱۶

۲-۳-۲ مته های کاجدار ۱۷

۲-۴ مکانیزم شکست سنگ ۱۸

۲-۴-۱ شکست برشی در مته های تیغه ثابت ۱۹

۲-۴-۲ شکست فشاری در مته های کاجدار ۲۰

۲-۵ انرژی ویژه مکانیکی ۲۲

۲-۵-۱ تاثیر عوامل عملیات حفاری بر روی انرژی ویژه مکانیکی ۲۳

۲-۵-۱-۱ نرخ نفوذ ۲۳

۲-۵-۱-۲ وزن روی مته ۲۴

۲-۵-۱-۳ سرعت دوران مته ۲۵

۲-۵-۱-۴ گشتاور ۲۶

- ۲۷ ۲-۵-۱-۵ فاکتورهای مرتبط با سیال حفاری
- ۲۸ ۲-۵-۲ خواص مکانیک سنگی موثر بر انرژی ویژه مکانیکی
- ۲۹ ۲-۵-۲-۱ مقاومت فشاری محصور شده
- ۳۰ ۲-۵-۲-۲ مقاومت فشاری تک محوره سنگ
- ۳۲ ۲-۵-۲-۳ مدول یانگ
- ۳۳ ۲-۵-۲-۴ زاویه اصطکاک داخلی
- ۳۴ ۲-۵-۲-۵ فشار منفذی
- ۳۵ ۳-۲-۵ فرمولاسیون انرژی ویژه مکانیکی
- ۳۹ ۲-۶ جمع بندی

۳ فصل سوم: مدل سازی یک بعدی چاه ۴۱

- ۴۲ ۱-۳ مقدمه
- ۴۳ ۲-۳ معرفی میدان
- ۴۳ ۳-۳ سنگ شناسی سازندها
- ۴۶ ۳-۴ مدل ژئومکانیکی
- ۴۷ ۳-۴-۱ نگاره های چاه پیمایی
- ۴۷ ۱-۴-۳ نگار مقاومت ویژه
- ۴۸ ۲-۴-۳ نگار پرتو گاما
- ۴۸ ۳-۴-۳ نگار صوتی
- ۴۹ ۴-۴-۳ نگار نوترون
- ۴۹ ۵-۴-۳ نگار چگالی
- ۴۹ ۶-۴-۳ نگار کالیپر
- ۵۰ ۳-۴-۲ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ
- ۵۲ ۱-۲-۴-۳ تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آزمایش روی مغزه
- ۵۲ ۲-۲-۴-۳ تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از داده های نگاره ها
- ۵۲ ۳-۲-۴-۳ پارامترهای الاستیک
- ۵۴ ۳-۵ تخمین سرعت موج برشی

۵۵	.....۳-۵-۱ استفاده از روابط محققان پیشین
۵۶	.....۳-۵-۲ روش رگرسیون چندگانه
۶۰	..... ۳-۶ تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی
۶۲	.....۳-۶-۱ مقاومت سنگ
۶۵	.....۳-۶-۲ زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی
۶۶	.....۳-۶-۳ تخمین فشار منفذی
۶۹	.....۳-۶-۴ تنش های برجا
۷۰	.....۳-۶-۴-۱ تنش عمودی
۷۱	.....۳-۶-۴-۲ تنشهای افقی
۸۱	..... ۳-۷ جمع بندی

۴ بررسی ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای ژئومکانیکی ۸۳

۸۴	..... ۴-۱ مقدمه
۸۵	..... ۴-۲ محاسبه انرژی ویژه مکانیکی
۸۷	..... ۴-۳ معرفی چاه ها و تحلیل کیفی داده ها
۱۰۰	..... ۴-۴ بررسی عددی ارتباط انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی
۱۰۲	..... ۴-۴-۱ تخمین انرژی ویژه سنگ با استفاده از خصوصیات ژئومکانیکی
۱۱۰	..... ۴-۴-۲ تخمین انرژی ویژه مکانیکی سنگ با استفاده از نگاره های چاه پیمایی
۱۱۳	..... ۵-۴ تخمین انرژی ویژه مکانیکی سنگ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
۱۱۸	..... ۴-۶ بهینه سازی با استفاده از انرژی ویژه مکانیکی
۱۳۳	..... ۴-۷ جمع بندی

۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۳۷

۱۳۸	..... ۵-۱ جمع بندی و نتیجه گیری
۱۴۳	..... ۵-۲ پیشنهادات

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲ انواع مته های کاج دار و تیغه ثابت ۱۵
- شکل ۲-۲ دستگاه پرس مکعبی الماس ۱۷
- شکل ۲-۳ انواع مکانیزم های شکست، شکست برشی (شکل بالا) و شکست فشاری (شکل پایین) ۱۹
- شکل ۲-۴ مکانیزم حفره ای زیر یک دندانه مته ۲۱
- شکل ۲-۵ کاهش انرژی ویژه مکانیکی همراه با پایدار شدن با افزایش نرخ نفوذ ۲۴
- شکل ۲-۶ بهینه سازی وزن روی مته با انرژی ویژه مکانیکی ۲۵
- شکل ۲-۷ رابطه بین انرژی ویژه مکانیکی با سرعت دوران مته در دو دمای مختلف ۲۶
- شکل ۲-۸ رابطه خطی انرژی ویژه با مقاومت فشاری تک محوره در نرخ نفوذ متوقف کننده مته ۳۱
- شکل ۲-۹ رابطه خطی انرژی ویژه با مدول یانگ در نرخ نفوذ متوقف کننده مته ۳۲
- شکل ۲-۱۰ تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ثابت M ۳۴
- شکل ۲-۱۱ کاهش مقاومت سنگ با افزایش فشار محصور کننده در دو فشار منفذی مختلف ۳۵
- شکل ۲-۱۲ رابطه انرژی ویژه با فشار محصور کننده در دو فشار منفذی مختلف ۳۵
- شکل ۳-۱ نگار های مهم مورد استفاده در تعیین پارامتر های ژئومکانیکی ۵۱
- شکل ۳-۲ تخمین مدول های یانگ، برشی و حجمی دینامیک در چاه مورد نظر ۵۴
- شکل ۳-۳ تخمین موج برشی با استفاده از رابطه پیکت در چاه مورد نظر ۵۶
- شکل ۳-۴ مسیر آنالیز رگرسیون خطی در SPSS ۵۸
- شکل ۳-۵ تخمین موج برشی با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه ۵۹
- شکل ۳-۶ تخمین مدول های یانگ، برشی و حجمی استاتیک در چاه مورد نظر ۶۱
- شکل ۳-۷ نسبت پواسون استاتیک و دینامیک ۶۲
- شکل ۳-۸ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب ۶۶
- شکل ۳-۹ نمودار پارامترهای مقاومتی سنگ در چاه A لایه سروک ۶۷
- شکل ۳-۱۰ برون یابی چگالی بر حسب عمق در چاه مورد نظر ۷۱

- شکل ۳-۱۱ اعتبار سنجی تنش های افقی از طریق مطابقت دادن شکستگی های.....۷۶
- شکل ۳-۱۲ تنش های درجا میدان در چاه A به همراه پیش بینی های معیارهای شکست۷۷
- شکل ۳-۱۳ پارامترهای مقاومتی سنگ در چاه B.....۷۸
- شکل ۳-۱۴ مدول های الاستیک در چاه B.....۷۹
- شکل ۳-۱۵ تنش های برجا در چاه B به همراه پیش بینی معیار شکست موگی-کولومب۸۰
- شکل ۴-۱ پارامترهای حفاری ثبت شده توسط واحد نمودارگیری گل در یکی از چاه های مورد مطالعه.....۸۶
- شکل ۴-۲ پارامترهای حفاری در چاه A.....۸۹
- شکل ۴-۳ تغییرات انرژی ویژه، نرخ حفاری و مقاومت تراکمی نسبت به وزن روی مته.....۹۱
- شکل ۴-۴ تغییرات نرخ حفاری و انرژی ویژه نسبت به سرعت دوران رشته۹۲
- شکل ۴-۵ نمودار هیستوگرام مقادیر دبی پمپاژ گل۹۳
- شکل ۴-۶ کاهش فشار و افزایش دبی پمپاژ به دلیل نامشخص۹۴
- شکل ۴-۷ تغییرات انرژی ویژه نسبت به پارامترهای حفاری سرعت دوران رشته، وزن روی مته و دبی پمپاژ گل.....۹۵
- شکل ۴-۸ مقایسه مقادیر انرژی ویژه و نرخ حفاری در حالت کارآمد و مغزه گیری.....۹۶
- شکل ۴-۹ انطباق پذیری تغییرات انرژی ویژه و مقاومت تراکمی سنگ نسبت به عمق در حفاری مغزه گیری چاه A.....۹۷
- شکل ۴-۱۰ تغییرات انرژی ویژه نسبت به پارامترهای حفاری در چاه B.....۹۹
- شکل ۴-۱۱ متناسب بودن وزن روی مته با تغییرات مقاومت تراکمی سنگ با افزایش عمق در چاه B.....۱۰۰
- شکل ۴-۱۲ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی در چاه A نسبت به ترتیب از راست: نسبت پواسون، مدول یانگ استاتیک و زاویه داخلی اصطکاک.....۱۰۳
- شکل ۴-۱۳ تغییرات انرژی ویژه در چاه A نسبت به ترتیب از راست: چسبندگی ذاتی، مقاومت فشاری (تراکمی) تک محوره.....۱۰۴
- شکل ۴-۱۴ مقایسه مقادیر سطحی (نمودار قرمز) و ته چاهی (نمودار آبی) پارامترهای حفاری۱۰۵
- شکل ۴-۱۵ شماتیک لایه های ورودی، میانی و خروجی در شبکه هوش مصنوعی۱۱۴
- شکل ۴-۱۶ مراحل گام به گام طراحی شبکه عصبی مصنوعی.....۱۱۵
- شکل ۴-۱۷ نتایج رگرسیون شبکه عصبی طراحی شده در مراحل مختلف.....۱۱۶
- شکل ۴-۱۸ نمودار عملکرد خطای مراحل آموزش و آزمایش در برابر تکرارهای انجام شده در شبکه عصبی مصنوعی

- طراحی شده ۱۱۷.....
- شکل ۴-۱۹ نمودار فراوانی خطای پیش بینی مدل طراحی شده در شبکه عصبی مصنوعی ۱۱۷.....
- شکل ۴-۲۰ مقایسه دو مورد یکی با ناحیه اتلاف بالای انرژی (سمت راست) و مورد دوم با وارد کردن تحلیل انرژی ویژه (شکل سمت چپ) ۱۱۹.....
- شکل ۴-۲۱ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ حفاری در چاه A ۱۲۰.....
- شکل ۴-۲۲ تغییرات نرخ حفاری نسبت به وزن روی مته در حفاری کارآمد چاه A ۱۲۲.....
- شکل ۴-۲۳ پراکندگی انرژی ویژه بر اساس وزن روی مته های مختلف در ناحیه حفاری بهینه چاه A ۱۲۳.....
- شکل ۴-۲۴ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ نفوذ در چاه B ۱۲۴.....
- شکل ۴-۲۵ تغییرات نرخ نفوذ حفاری نسبت به وزن روی مته در حفاری چاه B ۱۲۵.....
- شکل ۴-۲۶ مقایسه مقدار واقعی و مقدار تخمینی مقاومت فشاری تک محوره در چاه B ۱۲۹.....
- شکل ۴-۲۷ تغییرات گشتاور و سرعت دوران در هنگام تغییر مقاومت فشاری سازند ۱۳۱.....
- شکل ۴-۲۸ نتیجه رگرسیون پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره در دو چاه ۱۳۲.....
- شکل ۴-۲۹ فراوانی خطای پیش بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین مقاومت فشاری تک محوره در دو چاه ۱۳۳.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ طبقه بندی IADC برای مته های کاجدار بر اساس سختی سازند ۱۵
- جدول ۱-۳ ترتیب سازندها در میدان ۴۴
- جدول ۲-۳ داد های مورد نیاز جهت تشکیل مدل ژئومکانیکی ۴۷
- جدول ۳-۳ روابط مختلف جهت پیش بینی سرعت موج برشی ۵۹
- جدول ۳-۴ روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی ۶۰
- جدول ۳-۵ روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوره ۶۴
- جدول ۳-۶ داده های فشار و اعماق تماس سیالات مخزنی در میدان ۶۹
- جدول ۳-۷ داده های فشار منفذی در چاه A (نتایج تست MDT) ۶۹
- جدول ۴-۱ مشخصات چاه های مورد بررسی ۸۸
- جدول ۴-۲ مقایسه پارامترهای حفاری کارآمد و مغزه گیری ۹۶
- جدول ۴-۳ روابط بین DSE و پارامتر های ژئومکانیکی ۱۰۲
- جدول ۴-۴ نتیجه رگرسیون خطی جهت پیش بینی انرژی ویژه با خواص ژئومکانیکی سنگ ۱۰۶
- جدول ۴-۵ ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای موجود در رابطه رگرسیونی ۱۰۷
- جدول ۴-۶ تحلیل آماری رابطه پیش بینی کننده انرژی ویژه با استفاده از خواص ژئومکانیکی ۱۰۸
- جدول ۴-۷ روابط بین انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در حفاری مغزه گیری ۱۰۹
- جدول ۴-۸ ضریب همبستگی نگاره های مختلف با انرژی ویژه سنگ در چاه A ۱۱۰
- جدول ۴-۹ تحلیل آماری رابطه پیش بینی کننده انرژی ویژه با استفاده از نگاره ها در مغزه گیری ۱۱۳
- جدول ۴-۱۰ روابط تخمین انرژی ویژه در ناحیه حفاری بهینه چاه A ۱۲۳
- جدول ۴-۱۱ روابط رگرسیونی در ناحیه بهینه (انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال) جهت پیش بینی انرژی ویژه در چاه A ۱۲۴
- جدول ۴-۱۲ روابط رگرسیونی در ناحیه بهینه (انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال) جهت پیش بینی انرژی ویژه در چاه B ۱۲۶
- جدول ۴-۱۳ روابط تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس انرژی ویژه مکانیکی ۱۲۷
- جدول ۴-۱۴ روابط تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس پارامترهای حفاری در چاه A ۱۲۷

جدول ۴-۱۵ روابط رگرسیونی جهت پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره در چاه B.....۱۲۹

۱ فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

مشکل اساسی در عملیات مربوط به سنگ ها (حفر معدن، عملیات راهسازی و حفر چاه نفت) شکستن و جدا کردن قسمتی از سطح دیواره سنگ است. به طور مکانیکی این امر تنها از طریق وارد کردن نیرو با یک وسیله بر سطح سنگ ممکن است. پس برای ایجاد شکست در سنگ و جدا کردن قسمتی از بدنه سنگ نیاز به ایجاد درزه هایی بیشتر از درزه های موجود (که به طور طبیعی در سنگ وجود دارند) می باشد. پس در عملیات حفاری می بایست به وسیله ابزار برش (مته حفاری) و با صرف انرژی (که مقدار انرژی مصرفی وابسته به خواص سنگ است) سنگ را به ناحیه شکست رساند تا منجر به تغییر شکل دائمی سنگ گردد و بتوان قسمتی از سنگ را از آن جدا کرد.

انرژی لازم جهت خردایش سنگ را با مفهوم انرژی ویژه یا انرژی ویژه مکانیکی^۱ سنگ بیان می کنند که طبق تعریف با مقدار انرژی لازم جهت حفر یا خردایش واحد حجمی سنگ برابر است. پس یکی از ضرورت های عملیات مرتبط با سنگ و همچنین طراحی دستگاه های حفاری به حداقل رساندن انرژی ویژه جهت به حداکثر رساندن صرفه جویی در انرژی و افزایش نرخ نفوذ حفاری^۲ و همچنین کاهش ارتعاشات وارد بر دستگاه است.

با وجود شناخته بودن مفهوم انرژی ویژه در پروژه های عمرانی (به طوری که در استفاده از TBM^۳ با کاهش انرژی ویژه و در نتیجه کاهش ارتعاشات وارد بر دستگاه باعث طولانی شدن عمر قطعات ابزار برش و در نتیجه بهینه شدن عملیات می شود) کاربرد آن در مباحث و پروژه های حفاری نفت تا حد زیادی نیاز به مطالعه دارد و محققین را تشویق می کند که بررسی نمایند آیا می توان از آن جهت بهینه سازی حفاری چاه نفت (که در آن سنگ در محیطی عمیق و تحت تاثیر انواع تنش ها و فشار قرار دارد) نیز استفاده کرد یا خیر؟

^۱ Mechanical Specific Energy

^۲ Rate of Penetration

^۳ Tunnel Boring Machine

تعریف انرژی ویژه در واقع حلقه ارتباطی بین ابزار برش و ویژگی های سنگ است و این سوال را به وجود می آورد که آیا رابطه مشخصی بین انرژی ویژه و پارامترهای ژئومکانیکی وجود دارد؟ و اگر وجود دارد این رابطه می تواند مفید واقع شود؟

این تحقیق با توجه به اهمیت نقش پارامترهای ژئومکانیکی و مشکلات تامین اطلاعات مربوطه، به مطالعه تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگ بر روی انرژی ویژه مکانیکی خواهد پرداخت.

۱-۲ سابقه تحقیق

کمی سازی رابطه انرژی ویژه مکانیکی سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در فرآیند حفاری چاه های نفت و گاز مبحثی نسبتاً به روز می باشد و انجام تحقیقات مشابه در پروژه های معدنی و عمرانی موجب علاقه مندی محققان به انجام چنین مطالعاتی در حفاری چاه های نفت و گاز شده است تا از این طریق بتوان درک بهتری از فرآیند خردایش و تقابل سنگ و مته داشت. در سال ۱۹۶۵ آقای تیل^۱ در مقاله "مفهوم انرژی ویژه در حفاری سنگ" مشکلات و مسائل پایه ای در عملیات مرتبط به سنگ و معدن کاری را مورد بحث قرار داده است. محققین باور دارند می توان این مبحث سنگ برداری را (که در مورد انرژی مورد نیاز خردایش سنگ بود) به حفاری چاه نفت نیز مرتبط نمود. تیل معتقد بود این انرژی پارامتر بسیار موثر و حیاتی در امر حفاری است و از آن با عنوان انرژی ویژه مکانیکی سنگ یاد کرد. برای عملیات حفاری دورانی- بدون ضربه- تیل رابطه ای بر اساس نیروی وارده (F) و گشتاور (T) حاصل از برش و دوران ارائه کرد. از آنجا که کار انجام شده در مدت زمان یک دقیقه را می توان با داشتن سرعت دوران (N) و سرعت نفوذ (u) به دست آورد که معادل است با:

^۱ Teale

$$\text{Work done (W)} = Fu + 2\pi NT \quad (1-1)$$

در رابطه فوق سرعت نفوذ حفاری (u) بر حسب اینچ بر دقیقه است. با ضرب این دو پارامتر در همدیگر حجم سنگ حفاری شده در مدت زمان یک دقیقه حاصل می شود. حال برای به دست آوردن انرژی ویژه کار بر حجم تقسیم می گردد:

$$e = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{A u} \quad (1-2)$$

یا

$$\text{Mechanical Specific Energy (MSE)} = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 N\pi T}{A_B(ROP)} \quad (1-3)$$

در روابط فوق سطح مقطع مته (A و A_B) بر حسب اینچ مربع، سرعت دوران مته (N) بر حسب دور بر دقیقه، نرخ نفوذ (ROP) بر حسب فوت بر ساعت، گشتاور (T) بر حسب فوت-پوند و نیرو (F) بر حسب پوند است.

این معادلات روابط اصلی و اولیه انرژی ویژه ی مکانیکی هستند که توسط تیله با مفهوم انرژی ویژه معرفی گشت. با بررسی تغییرات انرژی ویژه می توان بازده عملیات حفاری را پایش کرد به این صورت که افزایش انرژی ویژه به منزله افزایش کار مورد نیاز جهت حفاری و نتیجتاً کاهش بازده حفاری است (Teale, 1965).

همچنین در این تحقیق مشخص شد بین انرژی ویژه و پایداری در مقابل مقاومت خرد شدن سنگ^۱ یک رابطه مشخص و ساده وجود دارد. ولی مسئله مهم این است که مقاومت خرد شدن را نمی توان به عنوان اندازه گیری مطلق و دقیق مقاومت سنگ در نظر گرفت زیرا خرد کردن سنگ به عواملی زیادی (نوع و شکل نمونه، مسطح بودن دو انتهای نمونه و ...) وابسته است که به ماهیت

^۱ Rock Crushing Strength

فرآیند خرد کردن مرتبط است.

در سال ۱۹۹۲ پسیه^۱ و فیر^۲ به جای مقدار گشتاور رابطه گشتاور را (بر اساس داده های حاصل از MWD^۳) وارد رابطه انرژی ویژه کردند. آنها با وارد نمودن ضریب ویژه اصطکاک لغزشی (μ)، قطر مته (d_B) بر حسب اینچ و وزن روی مته (WOB) بر حسب پوند، رابطه مطمئن تری برای محاسبه گشتاور به صورت زیر ارائه کردند (Pessier, et al., 1992):

$$T = \mu \frac{d_b(WOB)}{36} \quad (1-4)$$

که مدل پسیه و فیر به صورت زیر در می آید:

$$MSE = WOB \left(\frac{1}{A_B} + \frac{1333 \mu N}{d_B(ROP)} \right) \quad (1-5)$$

یکی از محدود کارهای انجام شده جهت ارتباط دادن انرژی ویژه و اندازه ذرات در عمل خرد کردن توسط والکر^۴ و شاو^۵ (۱۹۵۴) انجام شده است. این دو نفر به بررسی انرژی مصرف شده جهت خرد کردن سنگ به ذراتی ریزتر از اندازه مورد نیاز پرداخته و طی آزمایشاتی به اندازه گیری انرژی مورد نیاز جهت خردایش ابعاد مختلف نمونه های سنگ و فولاد اقدام نمودند. بررسی آنها نشان داد که با افزایش اندازه سنگ مقدار انرژی ویژه کاهش می یابد ولی این نرخ کاهش مقدار انرژی ویژه در همه حال سرعت یکسانی ندارد و با نامتناهی شدن ابعاد سنگ مقدار انرژی ویژه عملاً بدون تغییر و مقدار ثابتی به خود می گیرد. این مقدار ثابت نقش بسیار مهمی در بررسی بازده مکانیکی عملیات مرتبط به سنگ دارد زیرا از آنجا که بازده مکانیکی به طور مستقیم قابل محاسبه نیست می توان انرژی ویژه را

^۱ Pessier

^۲ Fear

^۳ Measurement While Drilling

^۴ Walker

^۵ Shaw

محاسبه و با وارون نمودن آن بازده مکانیکی را حاصل نمود. در نتیجه بازده مکانیکی وقتی بیشینه است که انرژی ویژه در حالت کمینه باشد (Walker and Shaw, 1954).

به عنوان یک نمونه از مطالعات انجام شده در کاربرد این مفهوم در پروژه های معدنی می توان به تحقیقات بالچی^۱ اشاره نمود. بالچی در سال ۲۰۰۴ جهت ارزیابی عملکرد ماشین های حفاری بازویی^۲ اقدام به انجام آزمایشاتی جهت تخمین مقدار بهینه انرژی ویژه بر اساس خواص سنگ نمود. آزمایشات خواص مکانیکی سنگ فقط به نمونه مغزه نیاز دارد که به دست آوردن و آزمایش آن ساده می باشد. در این تحقیق مجموعه جامع آزمایش های برش سنگ بر روی ۲۳ نمونه سنگ که از معادن فعال ترکیه به دست آمده بودند انجام و برای هر نمونه مقدار بهینه انرژی ویژه محاسبه شد. آزمایشات خواص مکانیکی و فیزیکی نیز بر روی همان نمونه ها جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری (UCS^۳)، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)، مدول الاستیک دینامیکی، چگالی و ... انجام گردید. با استفاده از نتایج آزمایش ها و بررسی به روش آماری، روابط قوی بین انرژی ویژه و خواص مکانیکی سنگ مشاهده گردید و قوی ترین رابطه ها با استفاده از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی حاصل شد (Balci, 2004).

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

تلاش جهت یافتن منابع نفت و گاز صنعت را ناچار به نفوذ به اعماق بیشتر زمین و سنگ نموده است. ضرورت نفوذ و حفاری نیز خردایش و جدا کردن قسمت هایی از سنگ می باشد. حفاری دورانی به عنوان روش معمول حفاری چاه نفت و گاز نیاز به سرمایه گذاری مالی سنگینی دارد (حدود ۵-۱۰ میلیون دلار برای هر چاه) و همیشه تلاش در جهت کاستن هزینه ها و افزایش بازده است. به دلیل کاهش شدید قیمت نفت در دوره های زمانی خاص و عدم اطمینان به بازگشت قیمت به شرایط قبل،

^۱ Balci

^۲ Roadheader

^۳ Unconfined Compressive Strength

تمرکز بر کاهش هزینه های صنعت نفت (به خصوص حفاری نفت به عنوان پر هزینه ترین بخش) به طور فزاینده ای افزایش یافته است و در جهت دستیابی هر چه بیشتر به این اهداف برنامه ریزی و پیش بینی عملیات حفاری بر اساس متغیرهای موجود ضروری می نماید. یکی از روش های بهینه-سازی عملیات حفاری، مطالعه و مدل سازی انرژی ویژه مکانیکی سنگ است که متغیرهای مهمی را حین عملیات حفاری در نظر می گیرد که می تواند جهت بهبود نرخ نفوذ لحظه ای مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه و بررسی انرژی ویژه می تواند پرسنل حفاری را در تشخیص کند شدن^۱ یا آسیب دیدن مته، انتخاب مته مناسب، اعمال پارامترهای مناسب حفاری با توجه به نوع مته و سنگ و همچنین در جلوگیری از گردش گل ضعیف کمک کند (کم بودن دبی پمپاژ گل باعث کاهش کیفیت تمیزسازی چاه و در نتیجه کاهش نرخ حفاری و افزایش انرژی ویژه می شود).

عملیات حفاری در چاه های نفت و گاز در میادین جنوب غربی ایران به دلیل مواجهه با شرایط خاص از مخاطره آمیزترین عملیات حفاری در جهان است که از عمده مشکلات حفاری این مناطق می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- ناپایداری دیواره چاه در سازندهای سطحی که باعث برهم خوردن تعادل دیواره چاه شده و مشکلات فراوانی را حین حرکت مته از روبروی این سازندها و همچنین هنگام راندن رشته جداری ایجاد می نمایند.

۲- چسبندگی بودن سازندها که باعث می شود کننده های حاصل از عملیات حفاری دور مته و رشته حفاری چسبیده و باعث افزایش ارتعاشات رشته و گلی شدن مته^۲ گردند که همه این عوامل باعث کاهش نرخ حفاری و تحمیل هزینه های سنگین می گردد.

۳- وجود لایه های پرفشار (که نظیر آن در دنیا به ندرت یافت می شود) باعث برهم خوردن شرایط گل حفاری و در نتیجه از دست رفتن تعادل چاه و گاهی فوران چاه گشته و عملاً

^۱ Dull

^۲ Bit Balling

توجیه اقتصادی عملیات زیر سوال می رود.

۴- وجود لایه ها با شکستگی های فراوان که باعث ریزش تکه های بزرگ سازند به درون چاه و هرزروی گل می شود که بازگرداندن شرایط به حالت عادی بعضا غیر ممکن می باشد و می تواند به قیمت از دست دادن چاه تمام شود.

۵- تناوب لایه های پرفشار و کم فشار و همچنین وجود گسل های معکوس در لایه های پرفشار. لذا می توان با شناخت کامل محیط سنگی (که این شناخت می تواند شامل بررسی انرژی ویژه سنگ به عنوان یک نشانگر ترکیبی از مقاومت سنگ و بازده دستگاه حفاری نیز باشد) خود را جهت مواجهه با مشکلات محتمل آماده و با کاهش خسارات به افزایش بازدهی عملیات کمک شایان نمود.

۴-۱ اهداف و روش انجام تحقیق

هدف انجام این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر فرایند خردایش سنگ و مقایسه آن با تاثیر پارامترهای عملیاتی موثر در این فرآیند می باشد تا درک روشن تری از فرآیند خردایش و عوامل موثر بر آن به دست آید.

برای اینکه بتوان دید روشنی نسبت به انرژی ویژه سنگ و دیگر پارامترهای موثر بر آن داشت باید با یک روش سیستماتیک به بررسی روابط موجود (در صورت وجود رابطه) بین پارامترهای مختلف پرداخت.

۱- از آنجا که در اکثر چاه های نفت و گاز نگاره های چاه پیمایی فقط در قسمت مخزنی چاه انجام شده است (به دلیل هزینه و ریسک بالای عملیات نمودارگیری) در ابتدا می بایست مدل ژئومکانیکی مخزن را از روی نگاره های موجود به دست آورد. به این صورت که از روی اطلاعات نگاره ها و با استفاده از روابط موجود مقادیر پارامترهای الاستیک و مقاومتی (مدول الاستیسیته، چسبندگی، مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی و غیره) را

محاسبه و مدل ژئومکانیکی حاصل می شود. این عمل می بایست در تمام چاه ها انجام گیرد.

۲- با استفاده از روابطی که جهت محاسبه انرژی ویژه ارائه شده است پایگاه داده ای از تمام اطلاعات پارامترهای حفاری تشکیل (در صورت لزوم فراورش ضروری روی داده های خام انجام گیرد) و انرژی ویژه مکانیکی برای هر واحد ژئومکانیکی محاسبه می شود.

۳- با آماده سازی و هم مقیاس نمودن داده های حفاری و نمودارهای مربوط به پارامترهای الاستیک، مقاومتی و تنش ها، می توان از روش های آماری و هوش مصنوعی جهت توسعه و تحلیل روابط بین انرژی ویژه و پارامترهای ژئومکانیکی استفاده نمود. نتایج این تجزیه و تحلیل ها محقق را در درک مسئله و حل مشکلات احتمالی یاری خواهد نمود.

۵-۱ ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش رو در پنج فصل تهیه شده است:

در **فصل اول** کلیات موضوع مطرح و ذکر شد که انرژی ویژه مکانیکی، انرژی صرف شده جهت خردایش سنگ است. هزینه های بالای حفاری موجب نگاه جدی تر به امر بهینه سازی انرژی مصرفی می شود. یکی از عوامل موثر در این راستا شناخت محیط سنگ و بررسی ارتباط خواص سنگ با فرآیند خردایش سنگ (و انرژی مصرف شده در این فرآیند) است که انجام چنین تحقیق را ضروری می نماید.

در **فصل دوم** به انواع روش ها و متدهای حفاری اشاره می شود. سپس تاثیر عوامل موثر بر روی انرژی ویژه مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته که خود به دو دسته کلی عوامل محیطی و عوامل غیر محیطی تفکیک شده است.

در **فصل سوم** اطلاعات میدان نفتی و چاه ها مورد مطالعه قرار می گیرند، سپس مدل سازی ژئومکانیکی چاه های مورد نظر انجام شده و نتایج آن ارائه می گردد. این فصل شامل برآورد پارامترهای

مکانیکی و ضرایب الاستیک سنگ از قبیل مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و ... می باشد. همچنین مدل سازی انجام شده با استفاده از نتایج آزمایشات روی مغزه کالیبره می گردد.

در **فصل چهارم** پس از تشکیل بانک اطلاعات داده های حفاری و ژئومکانیکی، ابتدا مقیاس داده ها به تناسب اصلاح شده و سپس ارتباط بین پارامترهای ژئومکانیکی و انرژی ویژه حفاری و همچنین ارتباط انرژی ویژه با نگاره های چاه پیمایی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از مدل سازی ریاضی و مدل سازی به وسیله شبکه عصبی مصنوعی، مدل های ترکیبی جهت ارتباط دادن انرژی ویژه مکانیکی و خواص مکانیکی سنگ ارائه شده است.

در نهایت در **فصل پنجم** نتایج و پیشنهادات حاصل از این تحقیق ارائه شده است.

۲ فصل دوم: مبانی حفاری و عوامل موثر بر انرژی ویژه مکانیکی

۱-۲ مقدمه

حفاری نفت پرهزینه ترین بخش بالادستی صنعت نفت است که تلاش شرکت های کارفرما، پیمانکار و خدماتی در جهت کاهش زمان و هزینه حفاری، افزایش ایمنی عملیات حفاری و حفظ پایداری چاه است. لذا روش های بهینه سازی در این صنعت روز به روز در حال گسترش است. یکی از روش های بهینه سازی عملیات حفاری به حداقل رساندن انرژی مصرف شده جهت خردایش سنگ است؛ یعنی با کمترین نیرو بالاترین نرخ نفوذ حفاری حاصل شود. به این مفهوم انرژی مصرفی، انرژی ویژه مکانیکی سنگ می گویند که به عوامل متعددی وابسته است.

در این فصل ابتدا انواع روش های حفاری به اجمال تعریف شده است. در ادامه متهای مختلف و مکانیزم خردایش متهها تشریح شده و در نهایت عوامل موثر بر انرژی ویژه مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲ حفاری

پیشینه عملیات حفاری به دورانی باز می گردد که انسانها به منظور دسترسی به آب و مواد معدنی اقدام به انجام حفاری می کردند. مخازن زیرزمینی نفت و گاز در اعماق زمین قرار گرفته اند و حفاری چاه یکی از مهمترین راه حل های موجود برای دسترسی به این منابع زیرزمینی است. تا قبل از حفر نخستین چاه نفتی به کمک روش های نوین، استخراج این ماده مهم فقط از چشمه های سطحی نفت، یا چاه های کم عمقی که به وسیله دست حفر می شد صورت می گرفت.

روش های حفاری به دو دسته کلی حفاری ضربه ای و حفاری دورانی تقسیم بندی می شود. در ادامه به تعریف انواع روش های حفاری پرداخته می شود.

۱-۲-۲ حفاری ضربه ای^۱

این نوع حفاری جزء متداول ترین و رایج ترین روش های حفاری در گذشته محسوب می شود که بیش از ۴۰۰۰ سال پیش توسط چینی ها به کار گرفته شده است. در این روش مته حفاری به صورت سقوط آزاد به داخل چاه رها شده و در اثر برخورد با سنگ، فرآیند خردایش صورت گرفته و خرده سنگ ها را بوسیله گل حفاری از داخل چاه خارج می نمایند. در حال حاضر از روش حفاری ضربه ای به منظور حفاری چاه های آب کم عمق استفاده شده و عملاً برای حفر چاه های نفت و گاز غیر قابل استفاده می باشد (Nguyen, 1996). از مزایای حفاری ضربه ای داشتن نرخ نفوذ بالاتر (نسبت به دیگر روش های حفاری) در حفاری سازندهای نسبتاً سختی چون گرانیت است. همچنین در این روش ابزار برش مدت زمان کمتری در تماس با سنگ است، انحراف چاه کمتر، استفاده کمتر از ابزار ساق مته و جدا کردن کنده های بزرگتر است. وجود کنده های بزرگ شناخت زمین شناسی را راحتتر می کند. معایب این روش محدود بودن نرخ نفوذ به تجارب میدانی است و ابزار شبیه سازی شرایط بهینه چکش های حفاری وجود ندارد. همچنین گلی شدن چکش، وارد کردن ارتعاش زیاد به رشته و دکل به دلیل انرژی زیاد چکش، عملکرد ضعیف در سازند شیلی و نبود شواهد استفاده از آن در حفاری انحرافی نیز دیگر معایب این روش هستند (Han, et al., 2005).

۲-۲-۲ حفاری دورانی^۲

ابداع روش حفاری دورانی، جهشی در صنعت حفاری به وجود آورد. در اواخر قرن نوزدهم، گونه های ساده این روش به کار گرفته شد اما با پیشرفت سریع و سیر تکاملی در ساخت دکل ها، مته ها و پمپ ها در سال ۱۹۳۰، تقریباً به طور کامل جانشین حفاری ضربه ای برای چاه های نفت شدند. فرآیند حفاری دورانی توسط مجموعه ای از ابزار و تجهیزات که به طور کلی دکل حفاری نامیده می شود صورت می گیرد. در این روش حفاری، از مته های متنوعی استفاده می شود. این مته ها با حرکت

^۱ Percussion Drilling

^۲ Rotary Drilling

چرخشی روی سنگ، باعث خرد شدن و ساییده شدن آن می‌شوند. انرژی لازم برای به چرخش در آوردن مته، توسط سیستم دورانی تامین می‌گردد. قلب حفاری دورانی سیستم گردش گل و مهمترین وظایف گل حفاری کنترل فشار سازند (جلوگیری از جریان چاه و همچنین تنگی چاه)، حمل کننده های حفاری به بیرون از چاه حین گردش گل، معلق نگه داشتن ذرات جامد در شرایط استاتیک و همچنین خنک سازی مته است. (Bourgoyne, et al., 1986)

۳-۲ مته حفاری

مته یکی از مهم ترین ابزارهای مورد استفاده در عملیات حفاری یک چاه نفت یا گاز است. در انتخاب بهینه مته جهت حفر چاه عوامل زیر دخیل هستند (Adams, 1985):

۱- قابلیت حفاری^۱ و ساینده‌گی^۲ مته: که این عوامل وابسته به خصوصیات مکانیکی سازند هستند و تعیین می کنند که سازند تا چه حد آسان حفاری می شوند و قدرت فرسایش مته سازند چه مقدار می باشد. لذا ساینده‌گی بالاتر سازند باعث کند شدن سریعتر مته و کاهش نرخ نفوذ حفاری می شود.

۲- هزینه حفاری: که باید تا حد ممکن کاهش یابد.

۳- نوع سیال حفاری: مته های متناسب با سیال مایع یا گاز انتخاب شوند.

یکی از مهمترین راهنماهای انتخاب مته در حال حاضر منابع و جداولی هستند که از طرف انجمن بین المللی پیمانکاران حفاری (IADC^۳) ارائه و مبنای انتخاب مته در آن، سختی سازند در نظر گرفته شده است که جدول ۱-۲ نمونه ای از این جداول را نشان می دهد.

^۱ Drillability

^۲ Abrasiveness

^۳ International Association of Drilling Contractors

جدول ۲-۱ طبقه بندی IADC برای مته های کاجدار بر اساس سختی سازند (Bourgoyne, et al., 1986)

سازند	طبقه بندی مته IADC
سازندهای نرم دارای مقاومت فشاری کم و قابلیت حفاری بالا (شیل نرم، رسها، نمک، سنگ آهک نرم، سازندهای غیریکپارچه و...)	۱-۱ ۲-۱ ۱-۵ ۲-۶
سازندهای نرم تا متوسط یا سازندهای نرم دارای رگه های سختتر (شیل های ماسه ای، لایه های سرخ، نمک، انهدرات، سنگ آهک نرم و ...)	۳-۱ ۱-۶
سازند های متوسط تا نسبتا سخت (شیل های سختتر، شیل های ماسه ای، شیل با رگه های ماسه و سنگ آهک و ...)	۱-۲ ۲-۶
سازندهای نسبتا سخت ساینده (سنگ با مقاومت فشاری بالا، دولومیت، سنگ آهک سخت، شیل تکه تکه سخت و ...)	۳-۲ ۲-۶
سازندهای سخت نیمه ساینده (سنگ آهک سخت دارای ماسه یا چرت، دولومیت، گرانیت، چرت)	۱-۳ ۲-۷
سازندهای سخت ساینده (چرت، کوارتز، پیریت، گرانیت و ...)	۲-۳ ۴-۳ ۱-۸



شکل ۲-۱ انواع مته های کاج دار و تیغه ثابت (Adams, 1985)

مته ها به دو گروه اصلی مته های کاجی و مته های تیغه ثابت تقسیم بندی می شوند.

۱-۳-۲ مته های تیغه ثابت^۱

مته های تیغه ثابت یا درگ بیت^۲، شامل قطعات برنده ثابتی هستند که با بدنه مته به صورت یک پارچه بوده و مستقیماً با چرخیدن رشته حفاری به گردش در می آیند. این نوع مته ها به دلیل نداشتن بخش چرخنده می توانند در چاه های با قطر کم نیز استفاده شوند زیرا وجود کاج و یاتاقان باعث به وجود آمدن محدودیت های طراحی در سایزهای کوچک می شود. همچنین یک تکه بودن این مته ها احتمال شکستن آنها را تا حد زیادی کاهش می دهد. این نوع مته ها به چهار دسته مته الماس طبیعی، مته الماس مصنوعی، مته الماس پایدار و مته تیغه فولادی دسته بندی می شوند (Moore, 1986).

می توان گفت پرکاربردترین نوع مته های تیغه ثابت، مته الماس مصنوعی (PDC^۳) می باشد. این مته ها با استفاده از مکانیزم خراشیدن حاصل از کاترها بر مقاومت برشی سازند غلبه می کنند. از آنجایی که مقاومت برشی سنگ کمتر از مقاومت فشاری سنگ می باشد لذا با صرف انرژی کمتر سرعت حفاری بیشتری حاصل می شود. اولین بار کاترهای PDC در سال ۱۹۵۰ توسط شرکت جنرال الکتریک^۴ ساخته شدند. در فرایند ساخت کاتر، کربن و کبالت در شرایط خاص دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۵۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع^۵، ذرات ریز الماس مصنوعی را تشکیل می دهند (Smith Bits Co., 2002). این دما و فشار بالا در دستگاه پرس مکعبی الماس^۶ (شکل ۲-۲) به ترکیب کبالت و کربن اعمال می شود.

^۱ Fixed Cutter Bit

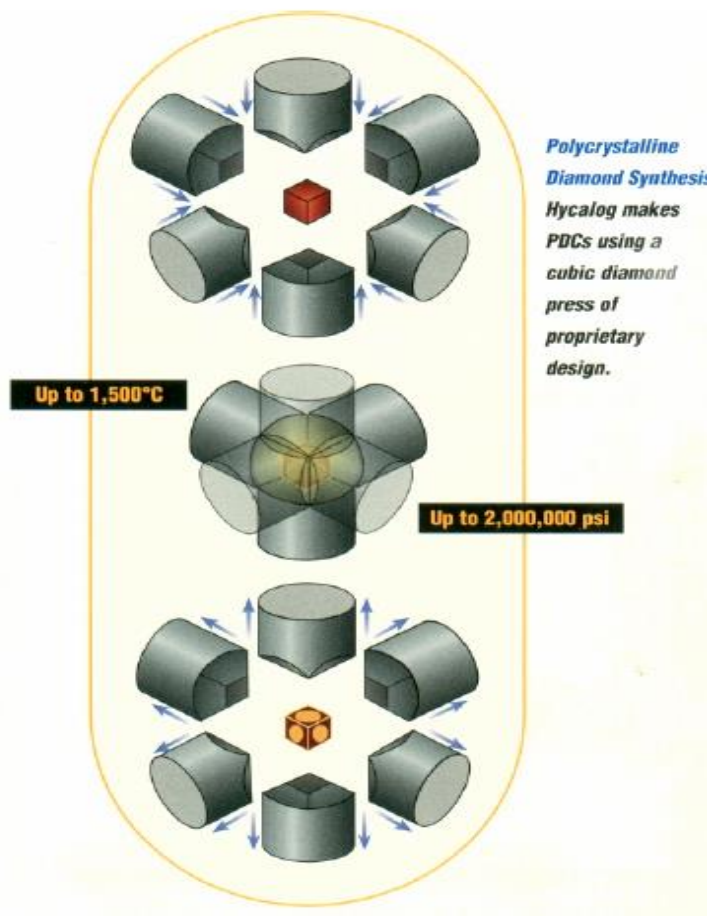
^۲ Drag Bit

^۳ Poly-crystalline Diamond Compact

^۴ General Electric

^۵ PSI (pound per square inch)

^۶ Cubic Diamond Press



شکل ۲-۲ دستگاه پرس مکعبی الماس (Smith Bits Co., 2002)

۲-۳-۲ مته های مخروطی^۱

این مته ها از آن جهت مته مخروطی نامیده می شوند که دارای بخش های کاج^۲ شکل می باشند. این بخش ها حول محور خود می چرخند و در اثر بار اعمالی روی مته، دندانه ها و یا دکمه های روی کاج، در سنگ فرو رفته و باعث خرد شدن سنگ می شود.

مته های سه مخروطی^۳ معروف ترین نوع مته های مخروطی می باشد که بیشترین متراژ حفاری شده در دنیا به وسیله این گونه مته ها انجام شده است و به دو دسته دندانه ای^۴ و دکمه ای^۱ تقسیم

^۱ Roller Cone Bits

^۲ Cone

^۳ Tri-Cone

^۴ Milled Tooth Bit

می‌شوند. در مته دکمه‌ای، دکمه‌ها یا دندان‌های تنگستن کارباید در حرارت خیلی بالا روی بدنه کاج تعبیه می‌شوند. با پیشرفت فناوری استخراج نفت در اعماق زیاد، ضرورت تولید مته‌های مستحکم جهت حفاری در اعماق زیاد بیش از پیش آشکار شد. (Osquye, 2007)

مته‌های دندان‌های در تمام سازندها قابل استفاده‌اند اما بیشتر برای حفاری در سنگ نرم و متوسط توصیه می‌گردند. بعضی از انواع آن در سازند سخت نیز به کار برده می‌شوند. در این نوع مته‌ها، دندان‌های مته از جنس خود کاج بوده و به صورت یک پارچه ساخته شده است. جهت جلوگیری از فرسایش دندان‌های مته، سطح آن توسط پودر تنگستن کارباید^۲ سخت کاری^۳ می‌شود (Nguyen, 1996).

۲-۴ مکانیزم شکست سنگ

انتقال انرژی به سنگ جهت خردایش آن، کاربرد اصلی مته‌ها در فرآیند حفاری می‌باشد. تعدد مکانیسم‌های شکست سنگ به دلیل خصوصیات رفتاری سازند و شرایط درون چاهی سبب شده تا طراحی مته‌ها به صورت‌های بسیار متنوعی انجام گیرد. برای ارزیابی نحوه طراحی و انتخاب مته، ابتدا ضروری است که چگونگی شکستن سنگ و نحوه تاثیر شرایط سازند بر عملکرد حفاری مورد توجه قرار گیرد. دو مکانیزم اصلی شکست، شکست برشی^۴ و فشاری^۵ هستند که مته‌ها بسته به نوع و طراحی خود، از یک یا ترکیب هر دو مکانیزم جهت شکست سنگ و حفاری سازند استفاده می‌کنند (شکل ۲-۳). در ادامه مهمترین مکانیزم‌های برش سنگ به اختصار تشریح می‌شود.

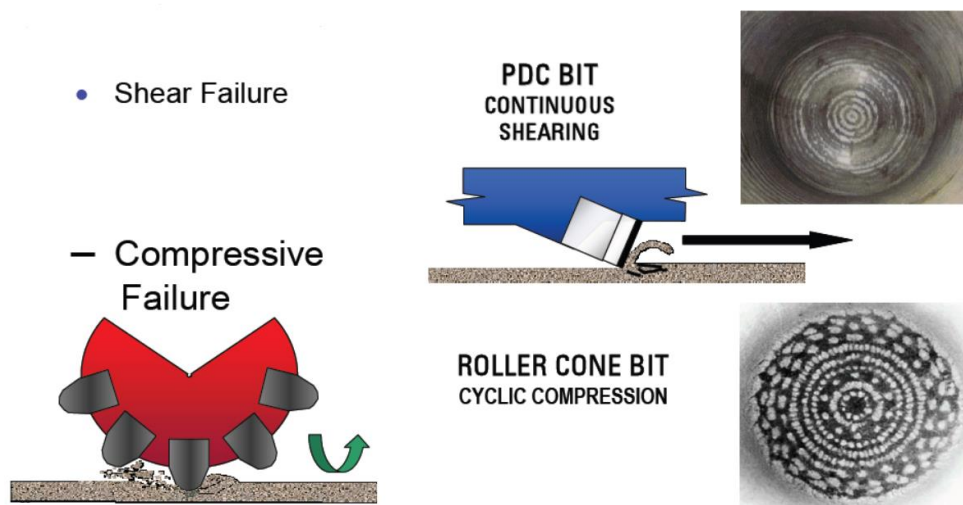
^۱ Insert Button Bit

^۲ Tungsten Carbide

^۳ Hardfacing

^۴ Shear Failure

^۵ Compressive Failure



شکل ۲-۳ انواع مکانیزم های شکست، شکست برشی (شکل بالا) و شکست فشاری (شکل پایین)

(Schlumberger, 2005)

۲-۴-۱ شکست برشی در مته های تیغه ثابت

وقتی تنش برشی در راستای بعضی صفحات نمونه به اندازه کافی بزرگ باشد، شکست برشی رخ می دهد. سرانجام یک ناحیه گسلی در راستای صفحه توسعه می یابد که باعث می شود دو سمت صفحه در یک فرآیند اصطکاکی نسبت به هم حرکت نمایند. به خوبی مشخص شده است که نیروی اصطکاکی که در مقابل حرکت دو جسم در تماس مقاومت می کند، به نیرویی که دو جسم را به طرف هم می فشارد وابسته است. (Fjaer, et al., 2008)

در حین حفاری، نیروی عمودی وارد بر دندانها یا کاترهای مته از اعمال تمام یا بخشی از وزن لوله های وزنه بر مته ایجاد می شود. همچنین نیروی افقی نیز از گشتاور لازم جهت چرخاندن مته حاصل می شود. ترکیب این دو نیرو صفحه حمله کاتر را تعیین می کند. کنده ها در صفحه برشی جدا می شوند که زاویه اولیه این صفحه نسبت به صفحه حمله مته، به خواص سنگ وابسته است. همچنین عمق برش نیز به صفحه حمله وابسته است که بر اساس مقاومت سنگ و شعاع برش انتخاب می شود (Bourgoyne, et al., 1986).

۲-۴-۲ شکست فشاری در مته های مخروطی

در مته های مخروطی مخصوص سازندهای نرم از همه مکانیزم های پایه ای جدایش سنگ استفاده می شود، در حالی که در مته های مخصوص سازندهای سخت ضربه یا خردایش سنگ مکانیزم مهم تر است. برای بررسی و شبیه سازی فرایند شکست سنگ زیر یک دندان، مارور^۱ در ۱۹۶۵ از دستگاهی استفاده کرد که قابلیت تغییر فشار چاه، فشار منفذی و فشار محصور کننده سنگ را به طور مستقل دارا بود و به خوبی شرایط واقعی چاه را شبیه سازی می نمود (Maurer, 1965).

مارور (۱۹۶۵) برای توصیف فرایند شکست از اصطلاح مکانیزم حفره ای استفاده کرد و نتیجه آزمایشاتش را به صورت شکل ۲-۴ بیان نمود. همان طور که مشاهده می شود حین اعمال نیرو بر دندان مته (A) فشار زیر دندان افزایش می یابد تا از مقاومت خردایش سنگ بیشتر شود و سپس یک حالت گوه^۲ مانند از سنگ با ذرات نسبتاً ریز، زیر دندان تشکیل می شود (B). با افزایش نیروی وارد بر سنگ، ذرات موجود در قسمت گوه شکل فشرده شده و نیروی جانبی بسیار زیادی بر سنگ های اطراف وارد می کنند تا جایی که تنش برشی وارده از مقاومت برشی سنگ کناری بیشتر شده و سنگ دچار شکاف می شود (C). این شکاف ها در راستای سطح تنش حداکثری گسترش می یابند که جهت تنش اصلی را در یک زاویه مشخص قطع می کند. نیرویی که در آن شکاف ها زیر دندان مته شروع می شوند را نیروی آستانه گویند.^۳ با افزایش نیرو به بیش از نیروی آستانه، شکاف های بعدی در بالای شکاف اولیه رخ داده و یک ناحیه سنگ شکسته (D) ایجاد می کنند. در فشار تفاضلی^۴ کم، کنده های قسمت شکسته سنگ به راحتی از حفره خارج می شوند (E) و در ادامه دندان مته رو به پایین حرکت می کند تا به انتهای حفره رسیده و فرایند تکرار شود (F و G). در فشار تفاضلی زیاد، فشار رو به پایین و نیروی اصطکاکی بین تکه های سنگ مانع از پرتاب این تکه ها به بیرون می شود

^۱ Maurer

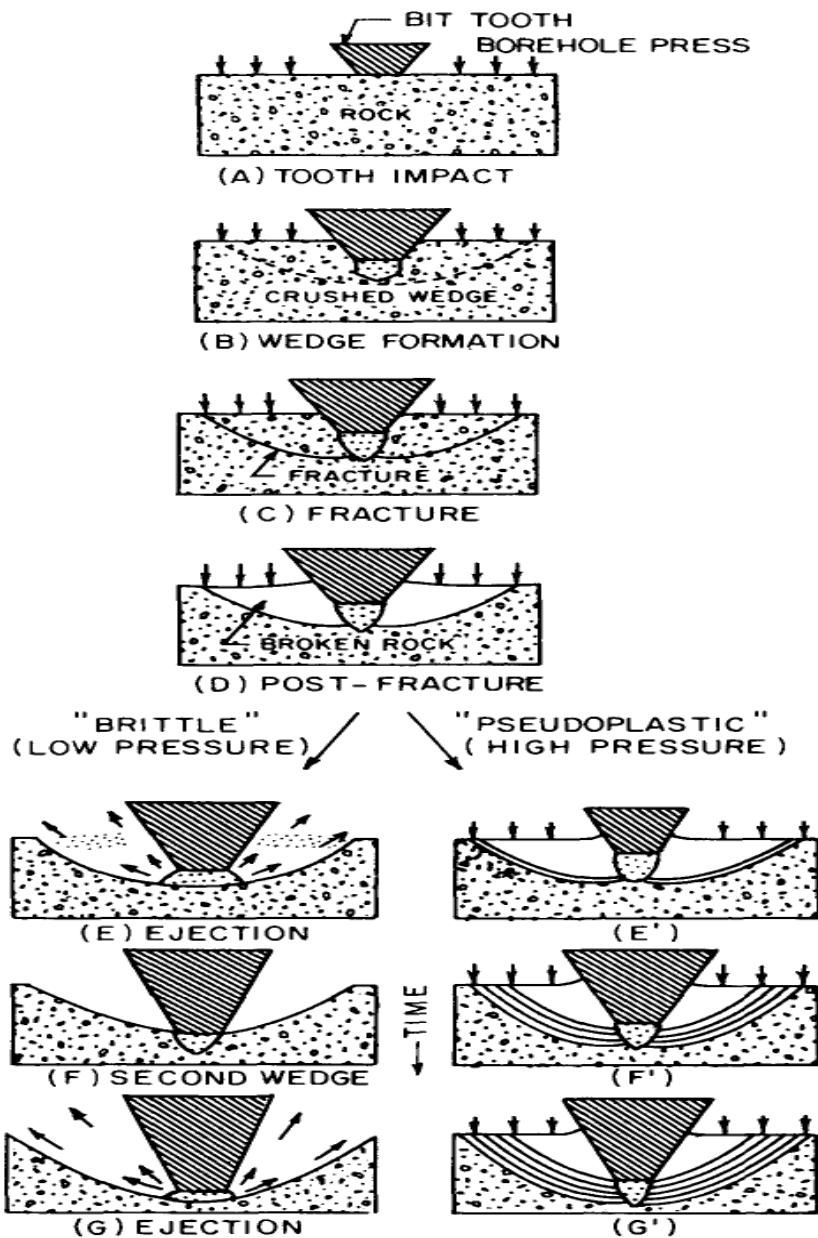
^۲ Wedge

^۳ Threshold Force

^۴ Differential Pressure

(E') با افزایش نیرو، جابجایی در راستای صفحات شکست موازی با شکاف اولیه رخ می دهد (F')

(G') به این حالت تغییرات، تغییر شکل شبه پلاستیک^۱ گویند (Maurer, 1965).



شکل ۴-۲ مکانیزم حفره ای زیر یک دندانته متنه (Maurer, 1965)

^۱ Pseudoplastic Deformation

۵-۲ انرژی ویژه مکانیکی

انرژی ویژه مکانیکی به عنوان انرژی مورد نیاز برای خردایش واحد حجم سنگ معرفی می‌شود که واحد اندازه گیری آن بر اساس واحد انرژی تقسیم بر واحد حجم مشخص می‌شود. این مفهوم تاکنون به طور گسترده در مطالعات و کارهای انجام شده بر روی سنگ، به عنوان شاخص ارزیابی کارایی خردایش و جهت سنجش قابلیت حفاری، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که انرژی ویژه مکانیکی از پارامترهای حفاری روزانه به دست می‌آید در نتیجه در هر بازه حفاری می‌توان انرژی ویژه مکانیکی را بدست آورد (Teale, 1965). یکی از کاربردهای انرژی ویژه مکانیکی تعیین زمان بیرون کشیدن مته حفاری است. همان طور که مشخص شده است همه مته ها یک لغزش رفت و برگشتی دارند که بعد از آن نقطه اعمال وزن بیشتر باعث کاهش نرخ حفاری می‌شود. واگن متوجه شد که این نقطه با کند شدن مته تغییر فاحشی می‌کند. وی با پایش انرژی ویژه و داده های MWD^1 سعی کرد تا آنجا که ممکن است از مته فرسوده جهت حفاری سازندهای نرم تر استفاده کند و مته را دیرتر از چاه خارج نماید و هزینه مته را کاهش دهد. ولی در عین حال این نکته را مد نظر داشت که فرسایش مته باعث کاهش قطر چاه نشود (Waughman, et al., 2003).

با ارزیابی این پارامتر، می‌توان عملکرد حفاری در هر سازند و تاثیر پارامترهای حفاری و عملیاتی را در حفاری توصیف کرد. در واقع انرژی ویژه مکانیکی یکی از مهمترین روش های تحلیل در حین حفاری^۲ جهت بهبود فرایند حفاری است که بر خلاف روش های دیگر (همانند مدل های نرخ حفاری) از پیچیدگی کمتری برخوردار است. زیرا عواملی چون وزن گل حفاری و فرسایش مته را در نظر نمی‌گیرد (Rashidi, et al., 2008). عوامل تاثیر گذار بر روی انرژی ویژه مکانیکی به دو دسته کلی عوامل قابل کنترل و عوامل محیطی تقسیم بندی می‌شوند:

- عوامل قابل کنترل یا عملیاتی: تغییر این عوامل در اختیار عامل انسانی می‌باشد.

¹ Measurement while Drilling

² Real-Time

- عوامل غیرقابل کنترل یا عوامل محیطی: عوامل مرتبط با محیط حفاری یعنی سازندهای تشکیل دهنده زمین (به ویژه پارامترهای مکانیکی سنگ) بر عملیات حفاری تاثیر گذاشته و حفار در تغییر آنها نقشی ندارد.

در ادامه تاثیر عوامل عملیاتی و محیطی بر انرژی ویژه مکانیکی تشریح می‌شود.

۱-۵-۲ تاثیر عوامل عملیات حفاری بر روی انرژی ویژه مکانیکی

عوامل قابل کنترل در اختیار عامل انسانی بوده و نسبت به پارامترهای محیطی، از قابلیت انعطاف بیشتری برخوردارند. بر اساس شرایط اقتصادی و زمین شناسی، کنترل این پارامترها در دسترس تر خواهد بود (Osquye, 2007; Tuna, 2010). انتخاب بهینه مقادیر قابل کنترل باعث می‌شود تا با حداقل انرژی بهترین عملکرد حفاری حاصل شود. کنترل مقادیر پارامترهای عملیاتی در کاهش مخاطرات عملیات حفاری تاثیر بسزایی دارد. در ادامه این عوامل به اختصار تشریح می‌شوند.

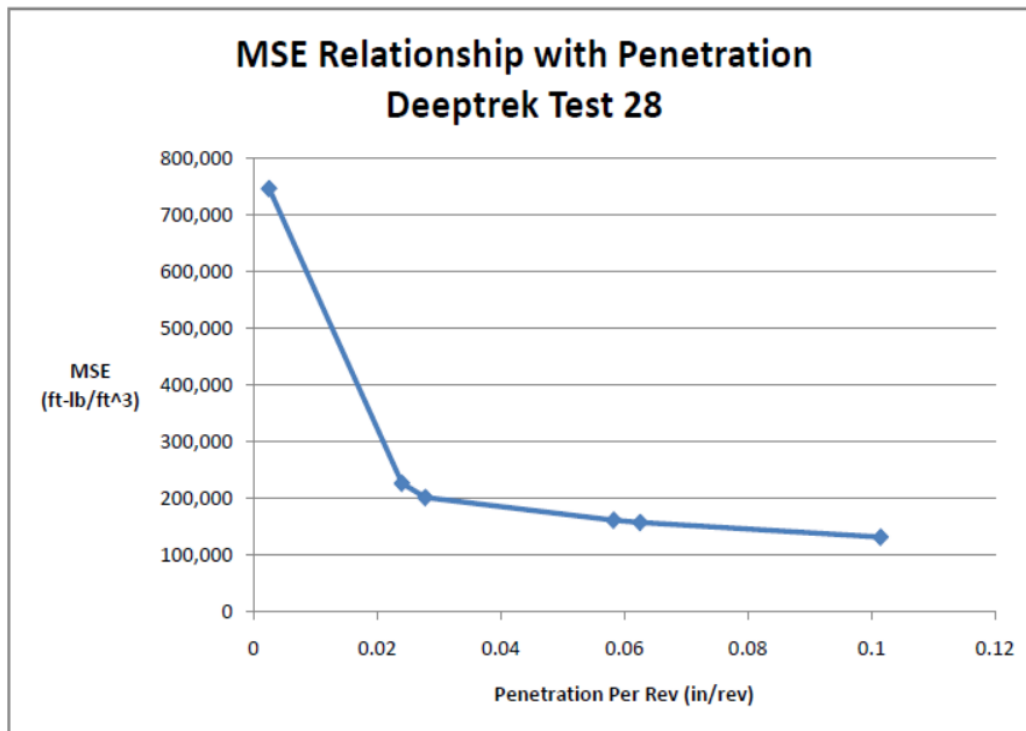
۱-۵-۱-۱ نرخ نفوذ

با توجه به رابطه انرژی ویژه مکانیکی حفاری و ثابت در نظر گرفتن دیگر پارامترها، نرخ نفوذ با این انرژی رابطه معکوس دارد؛ یعنی افزایش نرخ نفوذ به منزله کاهش انرژی ویژه مکانیکی است. ولی در عمل نرخ نفوذ بیشتر از مقدار بهینه، باعث گیر مته و اگر کمتر از مقدار بهینه باشد باعث سایش مته می‌شود. کودریتز^۱ بیان می‌کند که اغلب حداکثر نرخ نفوذ زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی ویژه مکانیکی کمینه باشد. در مواقعی که حداکثر نرخ نفوذ در مقدار کمینه انرژی ویژه نیست، می‌توان این گونه جمع بندی کرد که انرژی ویژه حداقلی، حداکثر "نرخ نفوذ خوب" را تولید کرده است؛ یعنی نرخ نفوذ بالاتر ممکن بوده است ولی با آسیب‌هایی همراه بوده است. (Koederitz, et al., 2005) همریک^۲ بر اساس تحقیقاتش دریافت کاهش انرژی ویژه مکانیکی دارای محدودیت است و این

^۱ Koederitz

^۲ Hamric

محدودیت، عمق برش (DOC^1) می باشد. زیرا جهت افزایش نرخ نفوذ، عمق برش باید افزایش یابد در نتیجه اندازه تکه هایی که باید از سنگ جدا شود نیز بزرگتر می شود که برای شکستن این تکه های بزرگتر انرژی بیشتری لازم می گردد. در نتیجه نرخ نفوذهای خیلی بالا با افزایش انرژی ویژه مکانیکی همراه می شود (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵ کاهش انرژی ویژه مکانیکی همراه با پایدار شدن با افزایش نرخ نفوذ (Hamrick, 2011)

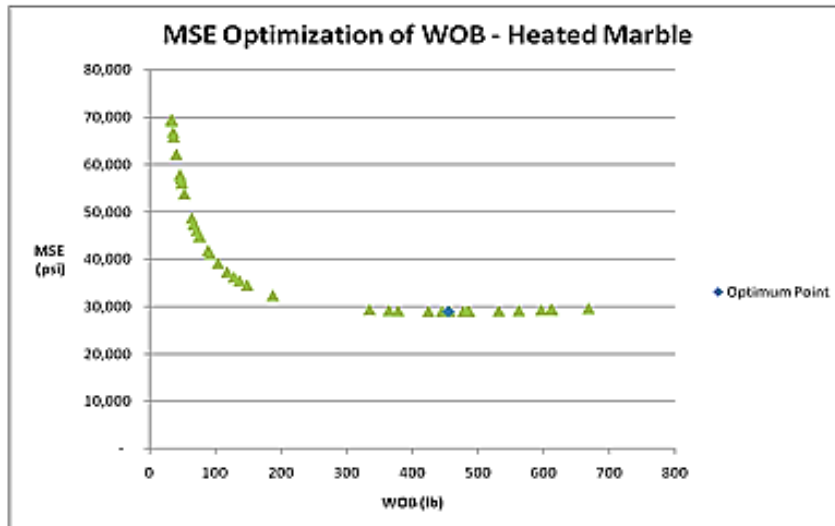
۲-۵-۱-۲ وزن روی مته

همریک با استفاده از آزمایش های خود بروی سنگ های مختلف نتیجه گرفت که با افزایش وزن روی مته، انرژی ویژه مکانیکی کاهش می یابد. او دریافت برای بهینه کردن انرژی ویژه مکانیکی، یک وزن روی مته بهینه^۲ وجود دارد. همچنین افزایش بیش از حد وزن روی مته باعث گیر افتادن مته و توقف حفاری می شود. در شکل ۲-۶ یک نمونه از نتایج کار همریک (۲۰۱۱) جهت بررسی رابطه بین

^۱ Depth Of Cut

^۲ Optimum WOB

انرژی ویژه مکانیکی و وزن روی مته نمایش داده شده است. از نظر همریک وزن روی مته مهمترین پارامتر تاثیرگذار بر انرژی ویژه مکانیکی سنگ است به طوری که وی با اصلاح رابطه انرژی ویژه مکانیکی، انرژی ویژه را فقط بر اساس وزن روی مته محاسبه نمود (Hamrick, 2011).

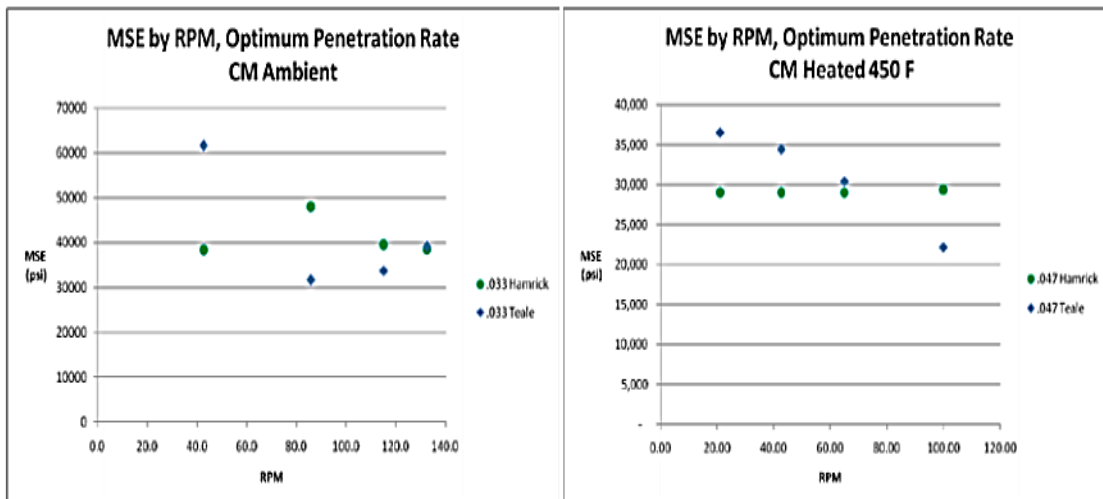


شکل ۲-۶ بهینه سازی وزن روی مته با انرژی ویژه مکانیکی (Hamrick, 2011)

۲-۵-۱-۳ سرعت دوران مته^۱

نتایج آزمایش‌های همریک بر روی سنگ‌های متفاوت نشان داد که بین مقدار انرژی ویژه مکانیکی حفاری با میزان سرعت دوران مته (در نرخ نفوذ بهینه) رابطه‌ای وجود ندارد، یا در صورت وجود، رابطه معکوس با ضریب همبستگی پایین موجود است؛ به این معنی که هرچه سرعت دوران مته افزایش یابد انرژی ویژه مکانیکی حفاری کاهش می‌یابد (Hamrick, 2011). با این وجود در عملیات میدانی برای یافتن پارامترهای بهینه حفاری بعد از یافتن وزن روی مته بهینه جهت کاهش انرژی ویژه، اقدام به یافتن سرعت دوران بهینه مته (در وزن روی مته بهینه) می‌گردد که به این فرایند Drill-off test گویند. در شکل ۲-۷ رابطه بین سرعت دوران مته و انرژی ویژه مکانیکی حفاری در دو دمای مختلف (دمای محیط و دمای ۴۵۰ درجه فارنهایت) نشان داده شده است.

^۱ Bit Rotation Speed



شکل ۷-۲ رابطه بین انرژی ویژه مکانیکی با سرعت دوران مته در دو دمای مختلف (Hamrick, 2011)

۴-۱-۵-۲ گشتاور^۱

در فرایند حفاری، گشتاور که در نتیجه دوران رشته حفاری ایجاد می شود در عین حال که باعث وارد آمدن نیروی جانبی جهت سایش سازند زیر مته می شود، باعث ایجاد یک نیروی مزاحم نیز می گردد که می تواند مانع از اعمال پارامترهای لازم جهت حفاری سازند گردد. به خصوص در سازندهای دارای خاصیت متورم شدن (مانند شیل)، یا در چاه های جهت دار و همچنین حفره های با سایز کوچک با گشتاور زیادی مواجه می شویم که این گشتاور باعث ایجاد ارتعاش و نوسانات خطرناک در رشته شده که در صورت عدم کنترل و حذف آنها، رشته حفاری از ضعیفترین نقطه بریده می شود.^۲ معمولترین راه حل عملیاتی کم کردن وزن روی مته یا سرعت دوران مته است که در نتیجه باعث کاهش نرخ نفوذ و افزایش انرژی ویژه مکانیکی می گردد. لذا در طراحی چاه، گل مورد استفاده و رشته حفاری باید ملاحظات مقابله با گشتاور (جهت به حداقل رساندن آن) قرار گیرد تا مصرف انرژی و به تبع آن انرژی ویژه مکانیکی نیز کاهش یابد.

^۱ Torque

^۲ Twist-off

۵-۱-۵-۲ فاکتورهای مرتبط با سیال حفاری

همان طور که در معرفی حفاری دورانی ذکر شد سیستم گردش گل به عنوان قلب تپنده فرآیند حفاری عمل می کند و کوچکترین تغییری در خواص سیال حفاری می تواند منجر به تغییرات عمده در دیگر بخش ها گردد. سیال حفاری با چگالی خود وظیفه کنترل فشار سازند و جلوگیری از فوران سیال سازندی را دارا می باشد. با این وجود افزایش بیش از حد وزن سیال می تواند باعث شکست سازند و هرزروی گل گردد که فوران سیال سازند پس از هرزروی قابل انتظار است. همچنین زیاد شدن وزن گل باعث ایجاد فشار تفاضلی (فشار ستون گل منهای فشار منفذی) بالا شده که این امر باعث شبه پلاستیک^۱ گشتن رفتار سازند زیر مته و کاهش نرخ نفوذ می گردد (Maurer, 1965). سیال حفاری همچنین باید دارای دبی جریانی کافی باشد تا بتواند با وارد آوردن نیروی ضربه ای^۲ مناسب به ته چاه و همچنین خارج سازی سریع کنده های^۳ جدا شده از سنگ از زیر مته، از دوباره حفاری شدن آنها جلوگیری نماید تا با انرژی کمتر نرخ نفوذ بیشتری حاصل شود. در تماس دندانان های مته با سازند و در اثر اصطکاک حاصل دما تا حد زیادی (تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد) بالا می رود که این دمای بالا باعث ضعیف شدن و شکستن دندانان یا کاتر مته و در نتیجه کند شدن^۴ مته و کاهش نرخ نفوذ می گردد. لذا لازم است سیال حفاری با خاصیت انتقال حرارت خود حرارت ایجاد شده را از فضای بین مته و سنگ خارج و از محبوس ماندن حرارت جلوگیری نماید (Freeman, et al., 2012). خاصیت روان کاری سیال حفاری از ایجاد گشتاور بالا (به خصوص در حفاری چاه های جهت دار) جلوگیری کرده و باعث کاهش انرژی ویژه می شود. وظایف و تاثیرات سیال حفاری در امر حفاری به حدی گسترده است که از حوصله این تحقیق خارج است.

^۱ Pseudoplastic

^۲ Impact Force

^۳ Cuttings

^۴ Dulling

۲-۵-۲ خواص مکانیک سنگی موثر بر انرژی ویژه مکانیکی

در مخازن متعارف و غیر متعارف یکی از راه های مرسوم شناخت زیر زمین اندازه گیری های انجام شده از سازند مورد نفوذ توسط چاه و به وسیله ابزارهای نمودارگیری است که در یک روش همراه مته به درون چاه رانده می شوند و در روش دیگر بعد از خروج مته به صورت جداگانه رانده می شوند. از آنجایی که این گونه ابزار باعث افزایش هزینه و خطر عملیاتی می شود تنها در چاه های اولیه نمودارگیری ها و مغزه گیری انجام می شود. حساسیت شناخت تنش های برجا و خواص ژئومکانیکی سنگ در مخازن نامتعارف به دلیل بهینه سازی مسیر چاه، انجام شکاف هیدرولیکی و محل قرارگیری خوشه های مشبک بسیار بیشتر است.

فرایند جمع آوری تا پردازش داده در صنعت حفاری بسیار پیشرفت نموده است. با دسترسی به چنین داده هایی در حین حفاری می توان جهت شناخت دینامیک ته چاهی و ویژگی های سازند استفاده نمود. بررسی دینامیک سیالات درون چاه و عوامل اصطکاکی چاه در تشخیص بازده تمیزسازی چاه، گیر لوله، گیر اختلاف فشاری، تغییرات سازند و مسائل مرتبط با روان کاری گل استفاده شده اند. اندازه گیری وزن روی مته ته چاهی، گشتاور ته چاهی و وزن روی مته سطحی در تحلیل عملکرد مته در سازندهای شیلی مفید واقع شده است (Kerker, et al., 2014).

در مجموع می توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی موثر در سرعت حفاری را در سه گروه اصلی زیر طبقه بندی نمود (Hoseinie et al, 2008):

۱. مشخصات فیزیکی و کانی شناسی ماده سنگ

۲. مشخصات مکانیکی

۳. مشخصات ساختاری توده سنگ (درزه داری، چین خوردگی و گسلش)

در ادامه به بررسی تاثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی (پارامترهای مکانیک سنگی) پرداخته

خواهد شد.

۱-۲-۵-۲ مقاومت فشاری محصور شده^۱

آزمایش‌های تیله (۱۹۶۵) مشخص نمود که مقدار انرژی ویژه مکانیکی از لحاظ عددی بسیار نزدیک به مقدار مقاومت فشاری تک محوری در شرایط حفاری ایده‌آل بوده است. به هر حال این آزمون در شرایط اتمسفر انجام گرفته و در فرآیندهای واقعی حفاری، مقدار انرژی ویژه مکانیکی بسیار نزدیک به مقدار مقاومت فشاری محصور شده خواهد شد. به بیان دیگر، حفاری مورد نظر زمانی در شرایط بهینه خواهد بود که تمام انرژی مصرفی استفاده شده برای تخریب یک حجم سنگ مورد استفاده قرار گیرد و هیچ نوع افت انرژی نداشته باشد (Chen, et al., 2014).

چنان^۲ از آزمایش‌های خود دریافت که مقدار انرژی ویژه مکانیکی ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری محصور شده دارد و این مقدار می‌تواند برابر مقدار مقاومت فشاری محصور شده سنگ باشد. به منظور بررسی دقت مدل انرژی ویژه مکانیکی، پارامترهای واقعی حفاری را می‌توان برای محاسبه مقدار انرژی ویژه مکانیکی مورد استفاده قرار داد. سپس مقدار انرژی ویژه مکانیکی با مقدار مقاومت فشاری محصور شده منطقه مورد مقایسه قرار بگیرد. در مکانیک سنگ جهت محاسبه مقاومت فشاری محصور شده سنگ از رابطه زیر استفاده می‌شود (Chen, et al., 2014):

$$CCS = UCS + D_p + 2 D_p \times \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2-1)$$

که در شرایط حفاری ته چاه، برای سنگ‌های تراوا، فشار محصور کننده ته چاه با رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود:

^۱ Confined Compressive Strength

^۲ Xuyue Chen

$$D_p = ECD_p - P_p \quad (2-2)$$

در روابط فوق:

CCS = مقدار مقاومت فشاری محصور شده بر حسب psi

UCS = مقدار مقاومت فشاری تک محوره بر حسب psi

D_p = تفاضل فشار ناشی از وزن گل و فشار منفذی بر حسب psi

∅ = زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر حسب درجه

ECD_p = مقدار فشار ناشی از وزن گل معادل (ECD¹) بر حسب psi

P_p = مقدار فشار منفذی بر حسب psi

مقاومت فشاری محصور تاثیر بسیار زیادی بر بازده حفاری دارد. محققان حفاری با مطالعه و مقایسه داده های حفاری فراتعادلی و فروتعادلی متوجه شده اند که مقدار انرژی ویژه مکانیکی در حفاری فروتعادلی یک دهم مقدار انرژی ویژه در حفاری فراتعادلی بوده و نرخ حفاری بیش از دو برابر رشد کرده است. بارزترین تفاوت این دو روش حفاری کاهش فشار سیال حفاری و منفی شدن مقدار اختلاف فشار در حفاری فروتعادلیست که باعث کاهش مقاومت فشاری محصور می شود (Wei, et al., 2015).

۲-۵-۲-۲ مقاومت فشاری تک محوره سنگ

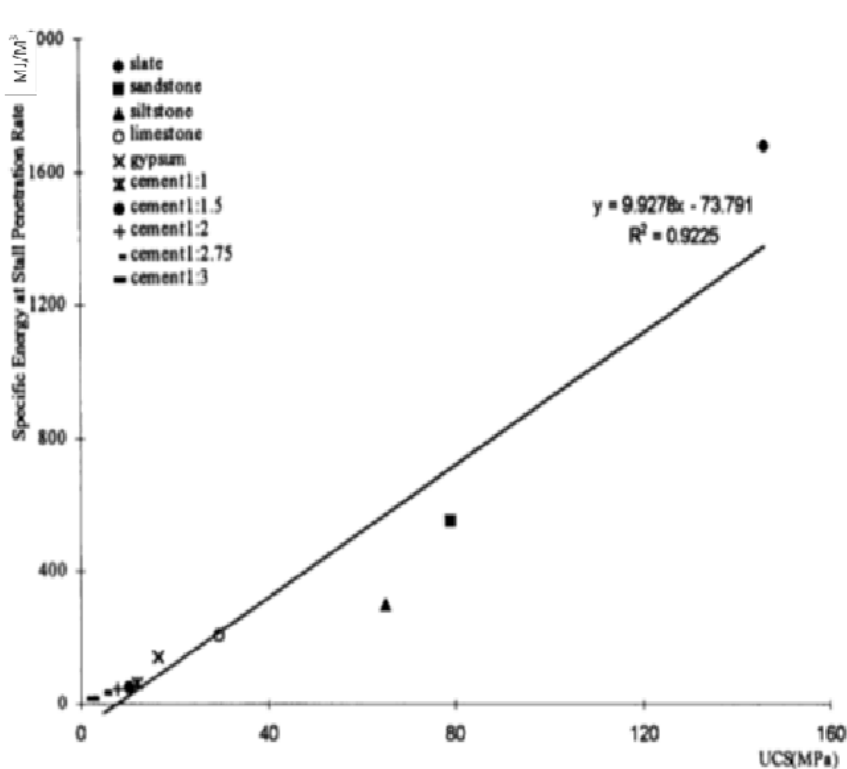
در سال ۱۹۹۶، ردیش^۲ و یاسار^۳ ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با انرژی ویژه مکانیکی مورد نیاز برای برش سنگ ها را مورد بررسی قرار دادند. سپس نتایج حاصله را با هدف تعریف ارتباط

^۱ Equivalent Circulating Density

^۲ Reddish

^۳ Yasar

بین انرژی ویژه مکانیکی و مقاومت فشاری تک محوره برای انواع سنگ ها مطابق شکل ۸-۲ پیشنهاد کردند. یاسار و ردیش آزمایش های خود را بر روی ماسه سنگ و سیلت استون انجام دادند. آنها مشاهده کردند که یک رابطه تقریباً خطی بین انرژی ویژه مکانیکی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ برقرار است و به این نتیجه رسیدند که راندمان حفاری به عواملی مثل مقاومت فشاری تک محوری، اندازه ذرات، نحوه خردایش سنگ (حفاری به صورت ضربه ای یا دورانی باشد)، شکل هندسی و میزان تیزی مته بستگی دارد. از این میان، میزان تیز بودن مته و توان مورد استفاده برای خردایش (حفاری) مهم ترین عوامل موثر بر نتایج این آزمون هستند (Reddish and Yassar, 1996).

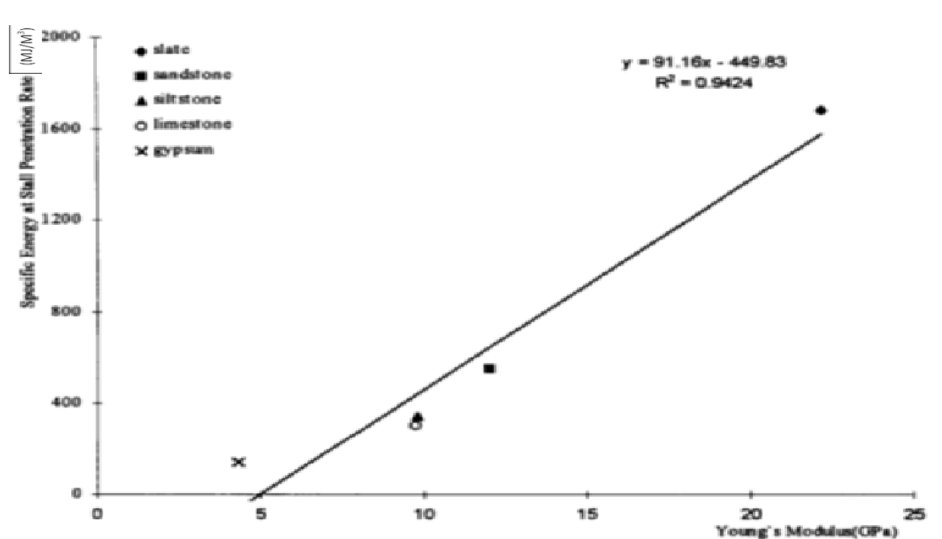


شکل ۸-۲- رابطه خطی انرژی ویژه با مقاومت فشاری تک محوره در نرخ نفوذ متوقف کننده مته (Reddish and Yassar, 1996)

۳-۲-۵-۲ مدول یانگ^۱

همانگونه که قبلا بیان شد انرژی ویژه مکانیکی به طور عمده به عواملی مثل ویژگی رفتاری سنگ، میزان شکستگی سنگ و ظرفیت تجهیزات مورد استفاده بستگی دارد. راه‌های متعددی برای تعیین انرژی ویژه مکانیکی وجود دارد اما نتایج موجود، فقط در همان مکانسیم خردایش قابل مقایسه است. ردیش و یاسار، مقدار انرژی ویژه مکانیکی را در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه شبیه ساز حفاری محاسبه کردند. آن‌ها رابطه انرژی ویژه مکانیکی با مدول یانگ حاصل از ماسه سنگ و سیلت استون را بدست آوردند و به یک رابطه خطی بین مقدار انرژی ویژه مکانیکی و مقدار مدول یانگ دست یافتند (Reddish and Yassar, 1996).

در واقع مدول یانگ مشخص کننده میزان سفتی و صلبیت یک جسم است و هر چقدر مقدار آن بیشتر باشد بیانگر صلبیت بیشتر سنگ مورد نظر است، لذا مقدار انرژی ویژه مکانیکی بیشتری برای حفاری آن مورد نیاز است. شکل ۲-۹ نشان می‌دهد یک رابطه تقریباً خطی بین مقدار مدول یانگ و انرژی ویژه مکانیکی برقرار است.



شکل ۲-۹ رابطه خطی انرژی ویژه با مدول یانگ در نرخ نفوذ متوقف کننده مته (Reddish, et al., 1996)

^۱ Young's Modulus

۲-۵-۲-۴ زاویه اصطکاک داخلی^۱

دتورنی^۲ و چی^۳ رابطه‌ای را برای انرژی ویژه پیشنهاد دادند که از پارامترهای مقدار انرژی در شرایط اتمسفر، ضریب m و فشار در ته چاه تشکیل شده است (Detournay and Chee, 2002).

$$\text{Specific Energy} = \varepsilon_0 + mP_m \quad (2-3)$$

ε_0 برابر است با مقدار انرژی حفاری در شرایط اتمسفر بر حسب ψ و ضریب m بین مقادیر ۳ تا ۲۰ تغییر می‌کند و P_m مقدار فشار در ته چاه می‌باشد.

بر طبق نظر کارشناسان صنعت حفاری، عملکرد حفاری به مقدار اختلاف فشار بین فشار ته چاهی و فشار منفذ بستگی دارد ($P_m - P_0$). لذا رابطه مقدار انرژی ویژه مکانیکی به صورت زیر اصلاح خواهد شد (Detournay, et al., 2002):

$$\text{Specific Energy} = \varepsilon_0 + m(\theta, \varphi, \psi)(P_m - P_0) \quad (2-4)$$

که در آن ضریب m تابعی از زاویه‌های θ (زاویه بین تیغه مته با خط قائم)، φ (زاویه اصطکاک داخلی سنگ) و ψ (زاویه فصل مشترک بین تیغه‌ها و سطح سنگ) می‌باشد. اگر فرض شود مکانیسم شکست به صورت یک شکست برشی در جلو مته باشد، مقدار ضریب m به صورت تجربی برابر است با:

$$m = \frac{2\sin\varphi\cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\theta + \varphi + \psi)} \quad (2-5)$$

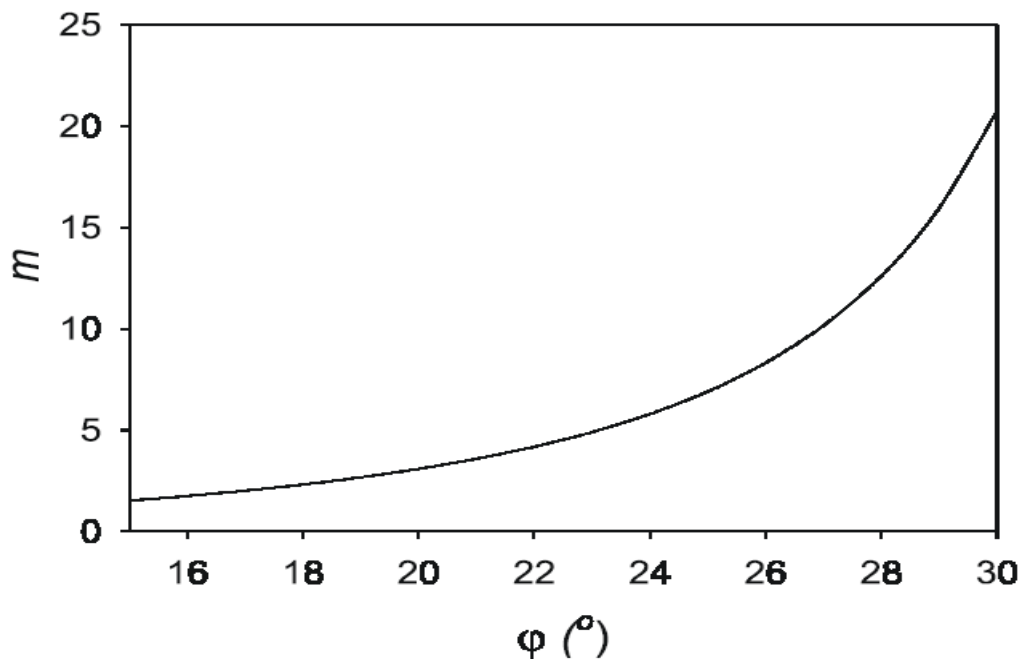
شکل ۲-۱۰ تابعی از مقدار m بر حسب φ را نشان می‌دهد. مشخص است افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی سنگ، افزایش مقدار ضریب m را نتیجه می‌دهد. با توجه به رابطه (۲-۵)، مقدار انرژی ویژه با افزایش ضریب m بیشتر می‌شود. از آنجایی که مقاومت و استحکام سنگ با افزایش

^۱ Internal Friction Angle

^۲ Detournay

^۳ Chee

زاویه اصطکاک داخلی سنگ بیشتر می‌شود، در نتیجه برای حفاری سنگ انرژی بیشتری نیاز خواهد داشت (Detournay, et al., 2002).



شکل ۱۰-۲ تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ثابت m (Detournay, et al., 2002)

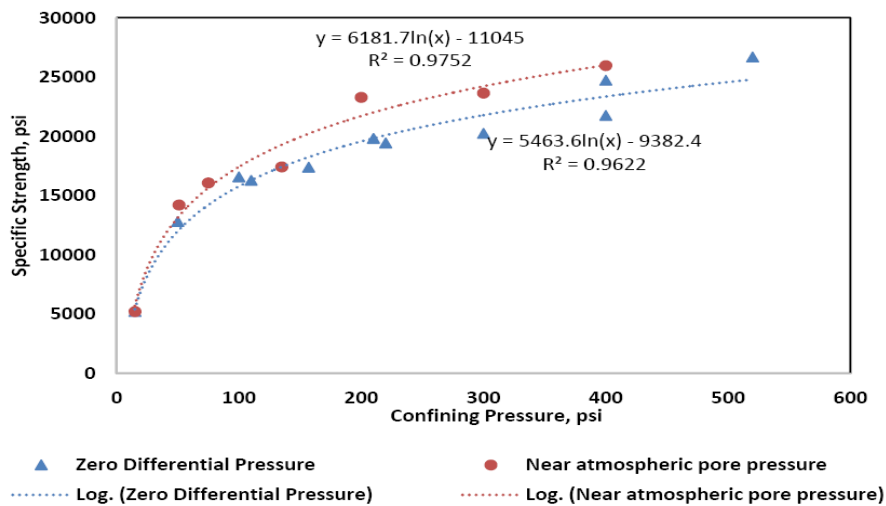
۵-۲-۵ فشار منفذی

اگر مقدار فشار منفذی بیشتر شود، انرژی مورد نیاز برای حفاری کمتر خواهد شد. زیرا فشار منفذی باعث می‌شود تنش اصلی مؤثر بر روی سنگ کاهش پیدا کند، در نتیجه کاهش تنش مؤثر سبب می‌شود تا سنگ به راحتی بشکند.

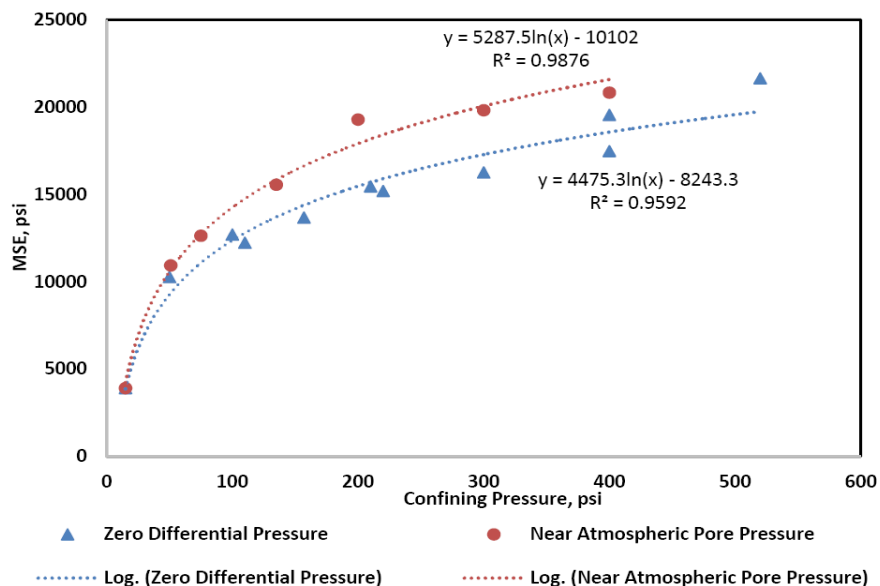
آزمایشی تحت عنوان تاثیر فشار منفذی بر انرژی ویژه مکانیکی در موسسه تحقیقات حفاری دانشگاه تولسا^۱ انجام گرفت که طی آن با افزایش مقاومت فشار محصور کننده، انرژی ویژه مکانیکی افزایش پیدا کرد. شکل ۱۱-۲ و شکل ۱۲-۲ به ترتیب افزایش مقاومت ویژه سنگ و انرژی ویژه مکانیکی سنگ را با افزایش فشار محصور کننده در دو حالت مختلف نشان می‌دهد. تنها تفاوت دو حالت در مقدار فشار منفذی است که نقاط آبی رنگ مربوط به آزمایش با فشار منفذی برابر با فشار

^۱ Tulsa

محصور کننده است (فشار تفاضلی صفر) و نقاط قرمز رنگ مربوط به آزمایش با فشار منفذی برابر با فشار اتمسفر است که باعث ایجاد فشار تفاضلی بالایی شده است. هر دو شکل کاهش مقاومت و انرژی ویژه را به دلیل افزایش فشار منفذی نشان می دهند (Akbari, et al., 2014).



شکل ۲-۱۱ کاهش مقاومت سنگ با افزایش فشار محصور کننده در دو فشار منفذی مختلف (Akbari, et al., 2014)



شکل ۲-۱۲ رابطه انرژی ویژه با فشار محصور کننده در دو فشار منفذی مختلف (Akbari, et al., 2014)

۲-۵-۳ معادلات انرژی ویژه مکانیکی

همان طور که در فصل یک بیان شد اولین بار تیله (۱۹۶۵) مفهوم انرژی مکانیکی ویژه را مطرح

کرد. وی انرژی مصرف شده جهت خردایش سنگ را ناشی از دو نیروی عمودی (وزن روی مته) و نیروی دورانی (ناشی از چرخش رشته حفاری و اعمال گشتاور) در نظر گرفت که با جمع کردن کار حاصل از این دو نیرو و تقسیم کار مجموع بر حجم سنگ حفاری شده، رابطه اولیه انرژی مکانیکی ویژه را به صورت زیر بیان کرد (Teale, 1965):

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{2\pi * RPM * T}{A_B * ROP} \quad (2-6)$$

که در رابطه فوق:

MSE: انرژی ویژه مکانیکی (psi)

WOB: وزن روی مته (lb)

RPM: سرعت دوران رشته (revolution/min)

ROP: نرخ نفوذ (ft/hr)

A_B: سطح مقطع مته (in²)

T: گشتاور ناشی از دوران رشته (ft.lbf)

تبله همچنین بیان کرد که حداکثر بازده مکانیکی یا کمترین انرژی ویژه مکانیکی زمانی حاصل می شود که مقدار انرژی ویژه با مقاومت فشاری سنگ برابر یا خیلی نزدیک به هم گردند. در این حالت بازده مکانیکی (نسبت انرژی ویژه حداقلی به انرژی ویژه) نزدیک به یک خواهد بود. تبله همچنین معتقد بود به دلیل پیچیدگی های زیاد عملیات حفاری و نوسانات شدید پارامترهای حفاری، بیان انرژی ویژه تنها با یک عدد دقیق نمی باشد ولی همین عدد و مدل ساده به اندازه کافی برای تحلیل کارایی عملیات صحیح است.

در سال ۱۹۹۲ پسیه و فیر با ارایه مفهوم ضریب ویژه اصطکاک لغزشی، رابطه (۲-۷) را جهت محاسبه انرژی ویژه ارایه نمودند تا در صورت نداشتن داده های گشتاور قابل اطمینان بتوان از آن

استفاده کرد.

$$MSE = WOB \left(\frac{1}{A_B} + \frac{1333 \mu N}{d_B(ROP)} \right) \quad (۲-۷)$$

در رابطه فوق:

MSE: انرژی ویژه مکانیکی (psi)

WOB: وزن روی مته (lbf)

ROP: نرخ نفوذ حفاری (ft/hr)

d_B : قطر مته (inch)

A_B : سطح مقطع مته (inch^2)

N: سرعت دوران رشته (revolution/min)

μ : ضریب ویژه اصطکاک لغزشی، بدون بعد

همریک به دلیل چند پارامتره بودن معادله تیله سعی در خلاصه تر کردن آن نمود و در تحقیق خود از فرضیاتی به شرح زیر استفاده کرد (Hamrick, 2011):

۱- پارامترهای وزن روی مته، گشتاور و نرخ نفوذ به هم مرتبط هستند و می توان اینگونه نتیجه گرفت که انرژی ویژه مکانیکی تابعی از سه پارامتر به هم مرتبط است و این سه پارامتر نباید مستقل در نظر گرفته شوند. بدیهی است که افزایش وزن روی مته باعث افزایش نرخ نفوذ حفاری و نیروی گشتاوری می شود لذا اگر بتوان ارتباطی برقرار نمود، می توان انرژی ویژه را بر اساس یک پارامتر نوشت.

۲- با بررسی نتایج تحقیقات دیگران می توان نتیجه گرفت در محدوده های معمول عملیاتی،

بین وزن روی مته و گشتاور یک رابطه خطی وجود دارد، پس می توان گشتاور را به صورت تابعی از وزن روی مته نوشت.

۳- نرخ نفوذ حاصل از یک چرخش رشته^۱ را می توان به صورت یک تابع غیر خطی بر اساس وزن روی مته نوشت که در تحقیق همریک تابع حاصل یک معادله چندجمله ای درجه دوم بود.

۴- در محدوده های طبیعی عملیاتی، سرعت دوران رشته با فاکتورهایی محدود می شود که به انرژی ویژه وابسته نیست. لذا می توان نتیجه گرفت به جای سرعت دوران رشته، نفوذ حاصل از یک دور دوران بر انرژی ویژه تاثیر می گذارد.

با جمع بندی فرضیات فوق همریک در تحقیق خود با بررسی داده های خود رابطه را برای انرژی ویژه مکانیکی ارایه نمود (Hamrick, 2011):

$$MSE_H = \frac{WOB}{A_B} + \frac{2\pi \times (A_0 + A_1 \times WOB)}{A_B \times (B_2 \times WOB^2 + B_1 \times WOB + B_0)} \quad (2-8)$$

که ضرایب A_0 و A_1 در معادله از برازش حاصل از رسم داده های گشتاور بر وزن روی مته و همچنین ضرایب B_0 ، B_1 و B_2 از برازش^۲ معادله درجه دوم پس از رسم داده های نرخ نفوذ در یک دوران بر وزن روی مته مشخص می شوند.

شاید مهمترین جنبه رابطه فوق این باشد که می توان با گرفتن مشتق معادله و برابر با صفر قرار دادن آن، وزن روی مته بهینه را در انرژی ویژه حداقلی به دست آورد و سپس دیگر پارامترها را نیز با استفاده از این وزن بهینه و معادلات برازش شده محاسبه نمود.

هانگ^۳ و وانگ^۱ (۱۹۹۷) با استفاده از مته های مغزه گیری، آزمایشی طراحی کردند که با

^۱ Penetration per Revolution

^۲ Fit

^۳ Haung

کمک این آزمایش، معادله ای برای محاسبه انرژی ویژه مکانیکی مورد نیاز برای خردایش سنگ (مختص عملیات مغزه گیری) ارائه دادند. آن ها متوجه شدند که در مقادیر کم وزن روی مته، انرژی توسط اصطکاک هدر می رود و افزایش وزن روی مته باعث افزایش گشتاور و کاهش انرژی ویژه مکانیکی می شود. آنها گزارش کردند که وزن روی مته بهینه ای وجود دارد که باعث بهینه شدن انرژی ویژه مکانیکی می شود.

آن ها روابط (۲-۹) و (۲-۱۰) را برای محاسبه انرژی ویژه مکانیکی ارائه دادند (Huang and Wang, 1997).

$$T = 6.426 \times e^{0.0003 \times WOB} \quad (2-9)$$

$$MSE = \frac{8 \times T \times RPM}{(D_h^2 - D_c^2) \times ROP} \quad (2-10)$$

که در رابطه (۲-۱۰) ROP نرخ نفوذ بر حسب m/hr، RPM سرعت دوران بر حسب rev/min، WOB وزن روی مته بر حسب نیوتن، T گشتاور بر حسب N-m، D_h قطر حفره و D_c قطر مغزه بر حسب متر و MSE انرژی ویژه مکانیکی خردایش بر حسب (MJ/m^3) می باشند.

۲-۶ جمع بندی

کاهش هزینه بزرگترین چالش صنعت نفت و گاز و به خصوص بخش حفاری است. یکی از راه های کاهش هزینه صنعت حفاری افزایش نرخ نفوذ حفاری است که در این راستا تکنولوژی ها و مدل های بهینه سازی بسیاری ارایه شده است. یکی از این راه حل ها استفاده از مفهوم انرژی ویژه مکانیکی سنگ است. انرژی ویژه با ترکیب پارامترهای حفاری محاسبه شده و وابستگی شدیدی نیز به خواص مکانیکی سنگ دارد. دو رکن تشکیل دهنده انرژی ویژه، کار حاصل از گشتاور و کار حاصل از وزن روی مته می باشد. در شرایط حفاری ایده ال مقدار انرژی ویژه باید با مقدار مقاومت فشاری

محصور برابر باشد که در این حالت مقدار انرژی ویژه بهینه می شود یعنی با مصرف کمترین انرژی بالاترین نرخ نفوذ حفاری حاصل می شود. همچنین انرژی ویژه بهینه در حداکثر نرخ نفوذ رخ نمی دهد زیرا در نرخ نفوذهای بالا عمق برش نیز افزایش می باید که باعث جدا شدن تکه های بزرگتری از سنگ می گردد. خارج کردن این تکه های بزرگ نیاز به مصرف انرژی بیشتری دارد که باعث افزایش انرژی ویژه مکانیکی می شود. پس در حین حفاری لازم است با در نظر گرفتن ابزار برش، خواص سنگ و اعمال پارامترهای حفاری شرایط بهینه انرژی ویژه مکانیکی ایجاد شود تا عملیات حفاری دارای بالاترین ضریب بازدهی باشد. افزایش بازده حفاری کاهش زمان و هزینه حفاری را در پی دارد.

۳ فصل سوم: مدل سازی یک بعدی چاه

۱-۳ مقدمه

مخازن کربناته پس از مخازن ماسه سنگی مهمترین و فراوانترین مخازن نفتی و گازی را در جهان تشکیل می دهند؛ بدین ترتیب شناسایی ساختارهای زمین شناسی این نوع از مخازن دارای اهمیت فراوانی می باشد. میدان نفتی موردنظر در جنوب غربی ایران یکی از بزرگترین میادین نفتی ایران می باشد که دارای مخازن کربناته است. مشترک بودن این میدان، به ضرورت مطالعات بیشتر در این میدان افزوده است. از این رو، به کارگیری مطالعات جامع در صنعت نفت همانند علم ژئومکانیک می تواند در بهبود فرآیندهای مختلف از اکتشاف تا بهره برداری این میدان، نقش بسزایی ایفا کند. کاربرد مدلسازی ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز به شدت در حال توسعه است. استفاده از مدلسازی ژئومکانیکی به منظور بررسی پایداری دیواره و حفاری چاه، طراحی شکست هیدرولیکی^۱ ضروری هست. به همین سبب مدلسازی ژئومکانیکی که نمایشی عددی پیوسته از تغییرات خواص مکانیکی سنگ، تنش زمین و فشار منفذی هست، نقش بسزایی در کاهش هزینه ها و بررسی فنی فرآیندهای مرتبط خواهد داشت. برای ساخت مدل ژئومکانیکی به طور معمول از داده های نگارهای صوتی، تخلخل، چگالی و ... استفاده می شود. اما در نهایت مدل با استفاده از نتایج مطالعات آزمایش های انجام شده بر روی مغزه و نیز آزمایش های درون چاهی کالیبره می گردد.

روش های محدودی برای اندازه گیری خواص مکانیک سنگی برجا ابداع شده است. معمول ترین این روش ها، انجام آزمایش های مکانیک سنگی بر روی مغزه و یا محاسبه خواص مکانیکی سنگ از نگاره های چاه پیمایی^۲ می باشد. در صنعت نفت، آزمایش مکانیک سنگ به عنوان آزمایش های گران قیمت شناخته شده، در نتیجه معمولاً تعداد محدودی از این نوع آزمایش ها انجام می شود. هم چنین اکثر آزمایش های ژئومکانیکی، آزمایش مخرب^۳ بوده و باعث از بین رفتن مغزه پس از انجام آزمایش می

^۱ Hydraulic Fracturing

^۲ Well logging

^۳ Destructive Test

شوند. از این رو این آزمایش‌ها کمتر مورد استقبال قرار می‌گیرند. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، استفاده از نگاره‌ها جهت مدلسازی ژئومکانیکی و برآورد خواص مکانیکی سنگ توصیه می‌شود.

در این فصل ابتدا میدان نفتی مورد نظر معرفی می‌گردد و چاه مورد مطالعه مشخص خواهد شد. سپس به شرح خصوصیات زمین‌شناسی منطقه و سازندهای موجود پرداخته می‌شود. سپس با توجه به داده‌های نگاره‌های چاه پیمایی و نمودار گل و با توجه به ملاحظات منطقه مورد نظر، مدل ژئومکانیکی یک چاه بعدی مورد نظر ساخته می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از مدلسازی ژئومکانیکی به صورت کیفی نمایش داده می‌شود. نتایج مدل سازی ژئومکانیکی در فصل بعد، بانک اطلاعاتی برای یافتن روابط بین انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی خواهد شد. در ادامه میدان مورد مطالعه و سنگ‌شناسی سازند تشریح می‌شود.

۲-۳ معرفی میدان

میدان مورد نظر، یکی از بزرگترین میداین نفتی ایران و جهان است که در آن چهار لایه سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان به عنوان مخازن قابل بهره برداری شناخته شده که مخزن سروک به عنوان مخزن اصلی و دارای نفت سنگین و سه مخزن دیگر با قابلیت تولید نفت سبک سازندهای تولیدی ثانویه هستند.

۳-۳ سنگ‌شناسی سازندها

این میدان نفتی یک تاقدیس تحت الارضی با امتداد شمالی-جنوبی است که از نظر تقسیم بندی ساختاری ناحیه ای، در پهنه چین خورده-رورانده زاگرس و در زیر حوضه فروافتادگی دزفول^۱ واقع شده است. سازندهای میدان مورد مطالعه شامل سازندهای آجاجاری، گچساران، آسماری، پابده، گورپی، ایلام، لافان، سروک، کژدمی، داریان، گدوان و فهلیان می‌باشند. توالی این سازندها در چاه مورد نظر از

^۱ Dezful Embayment

جدید به قدیم در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱ ترتیب سازندها در میدان

سازند
آغاچاری
گچساران
آسماری
پابده
گورپی
تاربور
ایلام
لافان
سروک
کژدمی
داریان
گدوان

مشخصات سازندها به شرح زیر است (NIOC, 2014):

سازند آغاچاری: این سازند به طور غالب از مارل قرمز به همراه میان لایه هایی از ماسه سنگ و سنگ رس^۱ قرمز تشکیل شده است. مارل ها نرم و چسبنده هستند و به همین دلیل در این سازند، در صورت عدم استفاده از گل حفاری مناسب، وقوع مشکلاتی چون گلی شدن مته و گیر رشته کاملا محتمل است. سن نهشته های سازند میوسن و پلیوسن می باشد.

سازند گچساران: متشکل از انهدرات به همراه میان لایه هایی از مارل قرمز و خاکستری و سنگ آهک است. انهدرات های آن سفید تا شیری رنگ و به صورت کریستال های نسبتا سخت تا سخت هستند. سن نهشته ها اوایل تا اواسط میوسن می باشد.

سازند آسماری: لایه های دولومیت، مارل و سنگ رس افزایش می یابد. سن سازند الیگوسین و

^۱ Claystone

میوسن می باشد.

سازند گورپی: محل الگوی این سازند در لرستان است و متشکل از آهک مارنی و مارن خاکستری و در انتها شامل سنگ آهک و شیل می باشد که دارای سنگواره های ذره بینی پلانکتون هاست. این سازند تنها در شمال فارس و شمال شرقی فروافتادگی دزفول، مشارکت مختصری در تشکیل نفت دارد. سن نهشته های منتسب به این سازند سانتونین تا ماستریشین می باشد.

سازند ایلام: محل الگوی این سازند در ایلام است. جنس آن اغلب آهکی و آهک مارنی و مارن است. سن تشکیل این سازند از کنیاسین تا کامپانین می باشد. این سازند دارای ذخایر فرعی و کوچک نفتی در میادین آب تیمور، اهواز، امام حسن، منصوری و دارخوین و همچنین دارای ذخایر گاز در میدان هلوش است.

سازند لافان: در فارس ساحلی، یک واحد شیلی سازند سروک (در زیر) و سازند ایلام (در بالا) را جدا می کند. این واحد شیلی که بخش شیلی لافان نامگذاری شده، از دیدگاه متفاوت هم ارز سازند سورگاه است. تغییرات سنی این شیلهای زیاد است ولی سن سنونین پیشین، منطقی تر است.

سازند سروک: به طور کلی این سازند از سنگ آهک تشکیل شده است که به تدریج در بعضی نقاط همراه با مقداری آهک مارنی و گچی و همچنین شیل همراه می باشد. محل الگوی سازند سروک در گروه بنگستان در شمال خوزستان است. عمده تخلخل این سازند از نوع بین دانه ای و بین بلوری است. سن این سازند به دوره آلبین تا تورونین برمی گردد. میدان مهم گازی این مخزن شامل میادین بی بی حکیمه، دال پری و کوه موند است و میدان های مهم نفتی این مخزن شامل میادین اهواز، بی بی حکیمه، کیلور کریم، سروستان و سیاه مکان است.

سازند کژدمی: این سازند از سنگ آهک با مقداری آهک مارنی و شیل با سن آلبین تا سنومانین تشکیل شده که در قاعده آن یک لایه ماسه سنگ خاکستری و قهوه ای با دانه بندی متوسط تا درشت گلوکونیتی و همچنین گل سنگ های سیاه رنگ قرار گرفته است. سازند کژدمی به صورت دگر شیب بر

روی رسوبات کرتاسه تحتانی قرار گرفته است. این سازند دارای قابلیت تولید نفت به مقدار قابل توجهی در لرستان و خوزستان بوده و تحقیقات نشان می دهد نفت بیشتر مخازن این مناطق از این سنگ منشأ تامین شده است و مهمترین سنگ منشأ ایران است.

سازند داریان: سن آن آپتین و دارای سنگ آهک نسبتاً سخت می باشد.

سازند گدوان: یکی از سازندهای زمین‌شناسی گروه خامی در زاگرس با سن آپتین تا برمیان است. گدوان دارای هشت زون مختلف می باشد که در سه قسمت گدواج بالایی، خلیج و گدوان پایینی قرار دارند. گدوان بالایی اغلب متشکل از شیل های خاکستری تا سیاه رنگ نرم و بسیار چسبنده می باشد. خلیج به طور کامل از سنگ آهک تشکیل شده است. گدوان پایینی به طور متناوب از لایه های مارل، سنگ آهک، آهک رسی، سنگ رس ماسه ای و ماسه سنگ تشکیل شده است.

سازند فهلیان: این سازند با سنگ آهک نرم خاکستری روشن به همراه میان لایه های مارل، سنگ آهک و سنگ رس نرم شروع می شود. و در ادامه از سنگ آهک های قهوه ای رنگ نسبتاً سخت تا خیلی سخت با چگالی بالا متشکل است. سن سازند نیوکومین است.

۳-۴ مدل ژئومکانیکی

اولین قدم برای ساخت مدل ژئومکانیکی انتخاب داده مناسب است. لذا لازم است در مورد انواع داده های موجود و کاربرد هر یک اطلاعات کافی وجود داشته باشد. مجموعه دادهای مورد نیاز به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی را می توان به طور خلاصه در جدول ۲-۳ دسته بندی نمود (AI- (Wardy and Urdaneta, 2010).

جدول ۳-۲ داد های مورد نیاز جهت تشکیل مدل ژئومکانیکی. (Al-Wardy and Urdaneta, 2010).

نام داده	نوع داده	پارامتر قابل محاسبه
RHOB/RHOZ	نگار چگالی	تنش قائم
DTC/DTS	نگار صوتی	مقاومت سنگ و خواص ارتجاعی
CGR	نگار پرتوی گاما	حجم شیل
NPHI	نگار تخلخل نوترونی	تخلخل
PEF	نگار جذب فوتوالکتریک	سنگ شناسی سازند
LOT/XLOT/mini frac test	آزمایش	تنش افقی حداقل
UCS/TCT	آزمایش	مقاومت سنگ بکر و خواص ارتجاعی
FMI/UBMI/OBMI/CALIPER	نگار تصویری	جهت داری و توزیع شکستگی ها جهت تعیین راستای تنش های اصلی
RFT/MDT/XPT	آزمایش	فشار منفذی

۳-۴-۱ نگاره های چاه پیمایی

نگارهای چاه پیمایی ابزارهای مفیدی برای تعیین خصوصیات فیزیکی سازندها و لایه های زمین محسوب می شوند. این نگاره ها، اطلاعات ضروری را جهت ارزیابی هیدروکربن، نوع سنگ و خصوصیات سیال درون سازند در اختیار قرار می دهند. همچنین این نگاره ها در برنامه ریزی مراحل حفاری و تکمیل چاه نقش بسزایی خواهند داشت. دقت و قدرت تفکیک نگارهای چاه نسبت به داده های لرزه ای بسیار بیشتر است. اما به این علت که در نگاره های چاه مقادیر به صورت نسبی از یک لایه اندازه گیری می شود، در تحلیل سنگ شناسی نیاز به داده های بیشتری می باشد (Johnson, et al., 2002). در ادامه به برخی از نگارهای مورد استفاده در این تحقیق اشاره می شود:

۳-۴-۱-۱ نگار مقاومت ویژه

این نگار میزان مقاومت مواد در برابر جریان الکتریسیته را نشان می دهد. مقاومت ویژه تابعی از شوری آب سازند، تخلخل موثر و مقدار هیدروکربن هایی که در فضای منفذ به تله افتاده است .

همچنین اندازه گیری های مقاومت ویژه به هندسه منفذ، تنش سازند، ترکیب سنگ، سیالات میان روزنه ای و دما وابسته است.

۳-۴-۱-۲ نگار پرتو گاما

نگار پرتو گاما مقدار رادیو اکتیویته طبیعی لایه های زمین در عمق های مختلف را اندازه گیری می کند. رادیواکتیویته طبیعی، متلاشی شدن و تبدیل خود به خودی اتم های بعضی از ایزوتوپ های مشخص به ایزوتوپ های دیگر است. مواد رادیواکتیویته تمایل دارند در شیل جمع شوند، به همین دلیل شیل ها دارای رادیواکتیویته بالایی هستند. پرتوهای گاما از عناصر مختلف اورانیوم، توریم و پتاسیم ساطع می گردند. برحسب اندازه گیری های مختلف رادیواکتیویته گامای طبیعی، انواع نگارهای پرتو گاما به شرح زیر است:

- نگار پرتو گاما معروف به GR که پرتو گامای ساطع شده از سازند را به صورت کامل نمایش میدهد
- نگار طیف سنج پرتو گاما معروف به SGR که نگاری مشابه نگار پرتو گامای کل (GR) تولید میکند .
- نگار گامای تصحیح شده (CGR)، پرتو گامای ساطع شده از اورانیوم را فیلتر میکند. از این رو مقدار اندازه گیری شده پرتو رادیواکتیو گامای طبیعی توسط نگار CGR همیشه کمتر یا مساوی با مقدار بدست آمده از نگار SGR می باشد.

۳-۴-۱-۳ نگار صوتی

این نگار، سرعت انتشار امواج در درون سازند را اندازه گیری می کند و زمان عبور موج از داخل ضخامت معینی از آن سازند را برحسب میکروثانیه بر فوت نشان می دهد. این روش به چاه نگاری صوتی معروف است. سرعت صوت به نوع سیمان، بافت سنگ، دما و فشار و ماهیت سیالات موجود در خلل و فرج سنگ بستگی دارد. به طور کلی امواج صوتی به دو دسته تراکمی و برشی تقسیم بندی میشوند.

- امواج تراکمی؛ این امواج که به امواج فشاری نیز معروفند، نوع خاصی از امواج طولی می باشند. این موج که به موازات جهت جابجایی ذرات گسترش می یابد قادر به عبور از گازها، مایعات و جامدات می باشد.
- امواج برشی؛ این امواج نوع خاصی از موج عرضی هستند و جهت انتشار آنها عمود بر جهت جابجایی ذرات می باشد. این امواج در مواد جامد انتشار می یابند و به این دلیل به همراه امواج تراکمی نقش قابل توجهی را در تعیین خصوصیات مکانیکی سنگ ایفا می کنند.

۴-۱-۴-۳ نگار نوترون

این نگار عمدتاً برای تعیین تخلخل سازند استفاده می شود. سازند تحت بمباران نوترونی قرار گرفته و پاسخ سازند نسبت به این بمباران نگاشته می شود. سپس از تعداد نوترون برگشتی تخلخل را حساب می کنند. ذرات نوترون در سازند با اتمهای مواد تشکیل دهنده سازند و اتم های سیالات درون سازند برخورد می کنند و برحسب نوع اتمی که نوترون برخورد می کند انرژی خود را از دست می دهد. هر چقدر نوترون های کمتری به گیرنده برسد تخلخل بیشتری را نشان می دهد (Johnson, et al., 2002).

۵-۱-۴-۳ نگار چگالی

ابزار اندازه گیری چگالی (جرم مخصوص) دارای چشمه تولید کننده اشعه گاما و آشکار گره های اشعه گاما می باشد که در هنگام نمودارگیری در مقابل سازند قرار می گیرد. اشعه های ارسال شده از چشمه با پدیده های پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک به سازند برخورد می نمایند. این برخوردها در یک بازه زمانی مشخص گردیده و تعداد آنها برای محاسبه چگالی مورد استفاده قرار می گیرد.

۶-۱-۴-۳ نگار کالیپر

زمانی که چاه حفر می شود لازم است تا قطر و شکل واقعی آن مشخص شود. هرچه قطر چاه زیادتر باشد، حجم گل در اطراف سوند افزایش یافته و در نهایت تاثیر آن بر نگار بیشتر خواهد بود. در

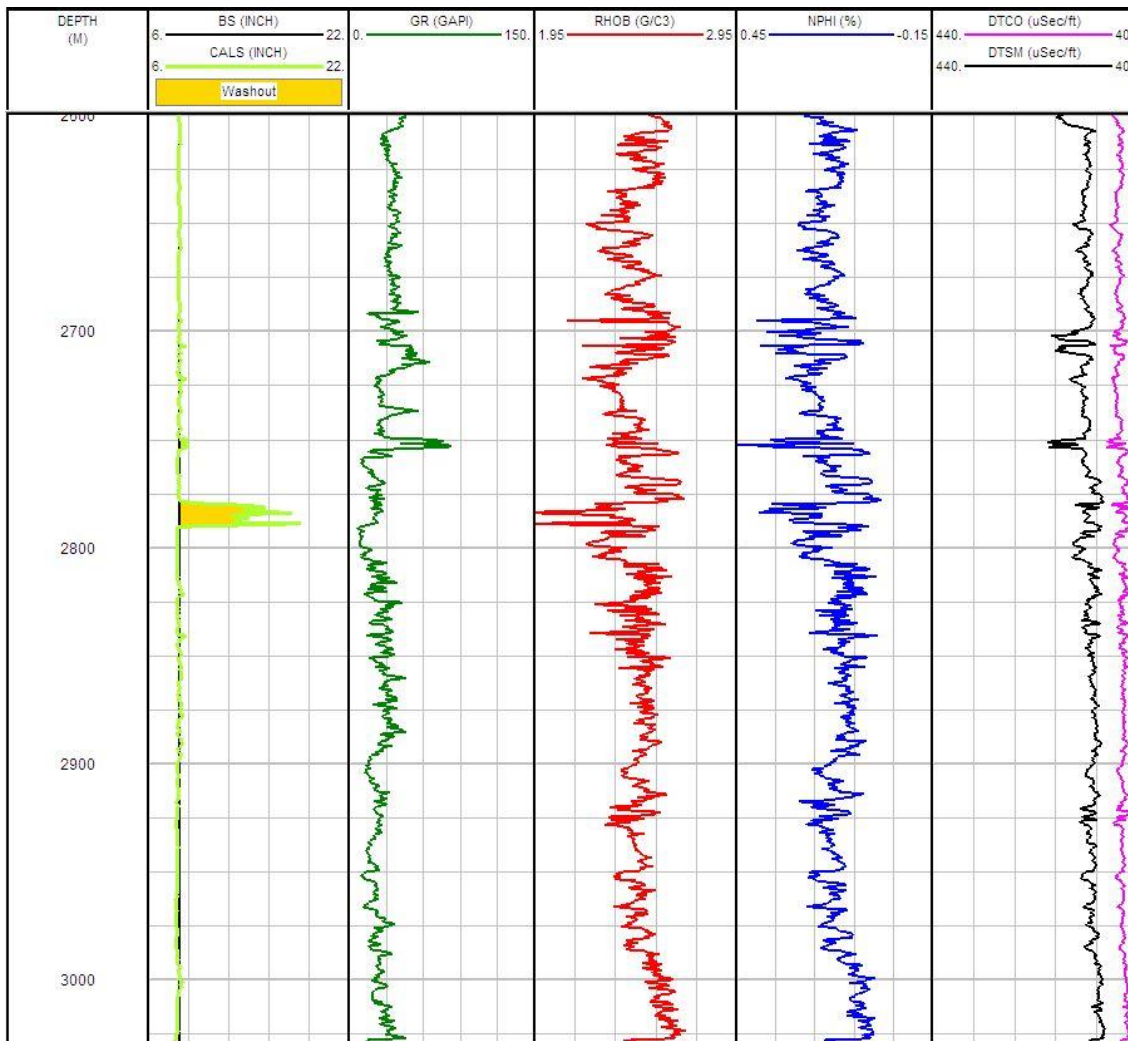
صورتی که قطر چاه از حدی بیشتر باشد، ممکن است هیچ پاسخی از سازند به گیرنده نرسد. اکثر شرکت های چاه پیمایی مقادیر حداکثر و حداقل قطر چاه را برای هر ابزار پیشنهاد کرده اند. اندازه گیری قطر چاه توسط ابزار کالیپر صورت می گیرد. یک ابزار کالیپر به طور ساده از دو بازو استفاده می کند که به صورت قرینه در دو سوی ابزار واقع شده اند. بازوها به یک ولت متر متصل بوده و تغییر در قطر چاه که باعث باز و بسته شدن بازوها می شود در ولت متر منعکس می شود. این ابزار در شکلهای ۴ و ۶ بازویی نیز کاربرد گسترده ای دارند (رحمانی، ۱۳۸۹).

نگارهایی که در این چاه برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ استفاده شد در شکل ۱-۳ آورده شده است. لازم به ذکر می باشد در این تحقیق جهت بررسی نگاره های پتروفیزیکی و مدلسازی ژئومکانیکی از نرم افزار IP^۱ استفاده شده است.

۳-۴-۲ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ

پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل ضرایب الاستیک، مقاومت سنگ، فشار منفذی و تنش های برجای نقشی اساسی را در روش های ارزیابی بهبود مخازن از قبیل پایداری چاه، تعیین میزان تولید ماسه، شکاف هیدرولیکی و غیره ایفا می کنند. با این وجود، از این پارامترها در عملیات حفاری و تخمین نرخ نفوذ و قابلیت حفاری کمتر استفاده شده است (Zobak, 2007). غالب خصوصیات ژئومکانیکی با آزمون های آزمایشگاهی همانند آزمون مقاومت فشاری تک محوره بر روی مغزه های به دست آمده از درون چاه اندازه گیری می شود. مشکل این روش آن است که محدود به نقاطی می شود که در آنجا مغزه وجود دارد و نشانگر خصوصیات برجای سنگ نمی باشد. لذا با این روش به تنهایی نمی توان نمایش صحیحی از تمام طول چاه ارائه داد. بنابراین این پارامترها از طریق نگاره های چاه به طور پیوسته به دست می آیند و کالیبراسیون آنها از طریق داده های حاصل از آزمایشات بر روی مغزه صورت می گیرد.

^۱ Interactive Petrophysics



شکل ۳-۱ نگاره های مهم مورد استفاده در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

پس از آماده سازی داده های اولیه، نوبت به محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی سنگ فرا می رسد. انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه گیری مستقیم، مطمئن ترین راه برای تعیین خواص سنگ است؛ اما به علت در دسترس نبودن مغزه های حفاری به خصوص در صنعت نفت، استفاده و گاهی تکیه به نتایج به دست آمده از روابط تجربی دینامیکی تنها راه تخمین خواص سنگ می باشد. از ویژگی های روابط تجربی می توان به ارزان بودن و پیوستگی داده ها در سرتاسر مخزن اشاره نمود (Yale, et al., 1994).

۳-۴-۲-۱ تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آزمایش روی مغزه

آزمایش مقاومت فشاری تک محوره سنگ به عنوان یک آزمایش استاندارد بر روی یک نمونه استوانه ای شکل با نسبت طول به قطر معین می باشد که شرایط آن در اسانداردهای^۱ ISRM آورده شده است. با انجام این آزمایش که بر روی مغزه به دست آمده از درون چاه صورت می گیرد، مقاومت فشاری تک محوره و ثابت های ارتجاعی یعنی مدول یانگ و نسبت پواسون^۲ به دست می آیند. روش آزمایشگاهی دقیق ترین روش برای تعیین این قبیل پارامترها است ولی دو نقص عمده دارد:

- ۱- تعداد مغزه های مورد آزمایش نسبت به طول چاه بسیار کم است و داده های ناپیوسته ای از خصوصیات سنگ در طول چاه به دست می آید.
- ۲- دست یابی به مغزه در صنعت نفت و گاز مشکل است. لذا انجام آزمون آزمایشگاهی در مقیاس وسیع امکان پذیر نیست و فقط می توان داده های تخمین زده شده توسط روش های دیگر را با آن مقایسه و صحت آن را بررسی کرد.

۳-۴-۲-۲ تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از داده های نگاره ها

در مواردی که در مخزن نمونه ای برای آزمون های آزمایشگاهی در دسترس نیست برای تعیین ویژگی های ژئومکانیکی از روابط تجربی استفاده می شود. این روابط تجربی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و داده های بدست آمده از نگاره های صوتی، چگالی، تخلخل و گاما را برقرار می کند. در شرایطی که مغزه در دسترس نیست، استفاده از برخی از این روابط اغلب تنها راه تخمین ویژگی های ژئومکانیکی در بسیاری از موقعیت هاست.

۳-۴-۲-۳ پارامترهای الاستیک

مهم ترین پارامترهای الاستیک سنگ که در ساخت مدل ژئومکانیکی کاربرد دارند، مدول یانگ و نسبت پواسون هستند. این دو پارامتر از طریق روابط زیر محاسبه می شوند:

^۱ International Society of Rock Mechanics

^۲ Poisson's ratio

$$\vartheta_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3-1)$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3-2)$$

با مشخص شدن این دو پارامتر، می‌توان مدول برشی و مدول حجمی را با استفاده از روابط الاستیک محاسبه نمود:

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2(1 + \vartheta)} \quad (3-3)$$

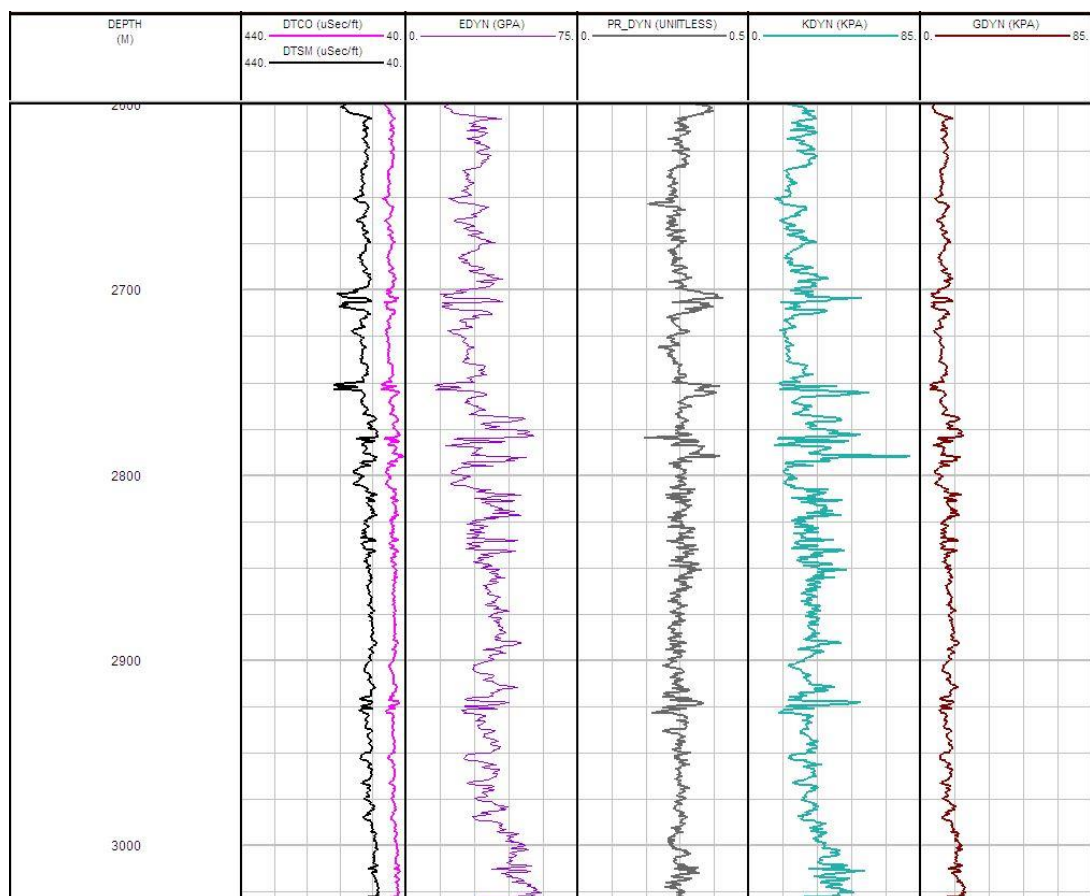
$$K_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{3(1 - 2\vartheta)} \quad (3-4)$$

در این روابط V_p و V_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه، ρ چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، E مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال، G مدول برشی بر حسب گیگاپاسکال و K مدول حجمی بر حسب گیگاپاسکال است (Fjaer, et al., 2008).

در عملیات چاه‌پیمایی مدت زمان گذر موج فشاری و برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت اندازه‌گیری می‌شود، که با DTC و DTS نشان داده می‌شوند. به منظور تبدیل مدت زمان گذر موج به سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$V(km/s) = \frac{304.8}{DT(\mu s/ft)} \quad (3-5)$$

باید توجه داشت که با استفاده از این روابط پارامترهای دینامیکی سنگ به دست می‌آید که مقادیر آن از پارامترهای استاتیکی بیشتر است (Fjaer, et al., 2008; Zobak, 2007). در این روابط واحد چگالی kg/m^3 و واحد سرعت موج صوتی m/s می‌باشد. در این مطالعه ضریب پواسون، مدول الاستیک، مدول برشی و مدول حجمی به ترتیب با استفاده از روابط ۳-۱ تا ۳-۴ تخمین زده شدند و نتیجه در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ تخمین مدول های یانگ، برشی و حجمی دینامیک در چاه A

۳-۵ تخمین سرعت موج برشی

همان طور که گفته شد به منظور محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی دینامیک، نیاز به داشتن داده-های نگاره DTC، DTS و چگالی می باشد. در مطالعات صورت گرفته در این میدان، مشخص گردید پارامتر سرعت موج برشی در تمامی چاه های میدان وجود ندارد. در این مطالعه تنها یک چاه دارای اطلاعات سرعت موج برشی می باشد که باید با استفاده از داده های موجود رابطه ای مناسب جهت تخمین سرعت موج برشی در دیگر چاه ها به دست آورد. در صنعت نفت، زمان گذر در واحد $\mu\text{s} / \text{ft}$ است ولی در عمل از مفهوم سرعت موج در واحد km/s استفاده می شود. دانستن ضرایب الاستیک از اصول اولیه ژئومکانیک است. از آنجا که برای بدست آوردن ضرایب الاستیک سنگ ها، دانستن سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی در مخزن لازم است، و اطلاع از سرعت موج برشی نیاز به

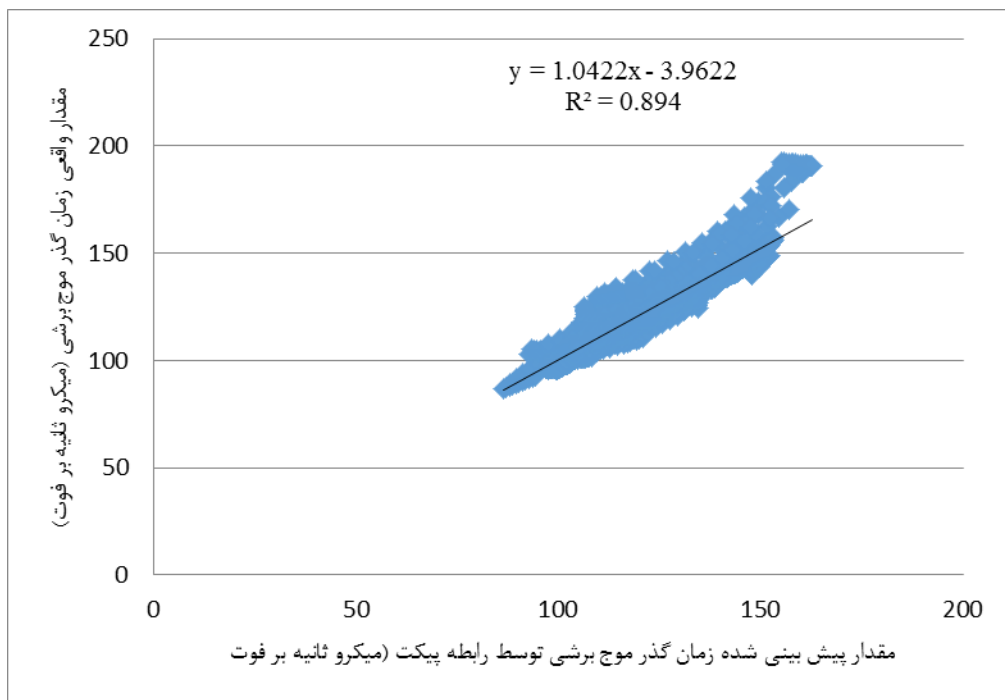
دستگاه‌های مدرن با هزینه‌های بالایی دارد و همچنین استفاده از آن‌ها در تمام چاه‌ها امکان‌پذیر نیست. لذا در این قسمت نگاره‌های پتروفیزیکی صوتی (سرعت موج تراکمی)، چگالی، پرتوگاما^۱ و نگار نوترون^۲ معلومات ما هستند و توسط آنها سرعت موج برشی تخمین زده می‌شود. برای تخمین سرعت موج برشی، ابتدا از تعدادی روابط موجود مانند پیکت (۱۹۶۳) و کاستاگنا (۱۹۸۵) استفاده شد که سرعت‌های تخمین زده شده توسط این روابط با سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در مخزن توسط ابزار DSI مقایسه شدند. روش دوم به کار گرفته شده در تخمین سرعت موج برشی، روش آماری رگرسیون خطی است.

۳-۵-۱ استفاده از روابط محققان پیشین

بیشتر مطالعاتی که برای تخمین سرعت موج برشی از سرعت موج تراکمی و یا تخلخل و حجم شیل انجام شده است مربوط به ماسه سنگ‌ها می‌باشد. در مورد تخمین سرعت موج برشی در کربنات‌ها تحقیق کمتری صورت گرفته است. بنابراین باید در ابتدا لیتولوژی مورد نظر ارزیابی شود تا روابط تجربی مناسب انتخاب گردد. در این مطالعه موردی، مخزن مورد مطالعه از نوع رسوبات کربناته است. در این قسمت از برخی روابط تخمین موج برشی روی سنگ‌های کربناته و آهکی استفاده شد و سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده توسط ابزار DSI و تخمین زده شده توسط این روابط مقایسه شدند. پیکت (۱۹۶۳) مطالعات آزمایشگاهی متعددی بر روی سنگ‌های مختلف انجام داد و نتیجه گرفته است که سرعت موج برشی در سنگ‌های مختلف ضریب ثابتی از سرعت موج فشاری می‌باشد و نسبت V_p / V_s را برای سنگ آهک، دولومیت و ماسه سنگ به ترتیب ۱/۹، ۱/۸ و ۱/۶ بدست آورد. روابط پیکت زمانی اعتبار دارند که V_p بزرگتر از ۳ باشد (Pickett, 1963). مقادیر تخمین زده شده توسط رابطه پیکت (۱۹۶۳) در برابر مقادیر واقعی سرعت موج برشی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

¹G-Ray Log

²Neutron Log



شکل ۳-۳ تخمین موج برشی با استفاده از رابطه پیکت در چاه مورد نظر

در شکل ۳-۳ محور عمودی مقادیر واقعی کندی موج برشی است که از نگاره DTS بدست آمده است. محور افقی نیز مقادیر کندی موج برشی که توسط رابطه پیکت تخمین زده شده است. همان-طور که در شکل مشاهده می شود همبستگی نسبتاً قوی بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده وجود دارد.

۳-۵-۲ روش رگرسیون چندگانه

مطالعات نشان داده است که سرعت موج برشی علاوه بر سرعت موج فشاری به نگرهای دیگر نیز وابسته است. بنابراین برای بالا بردن ضریب همبستگی جهت تخمین سرعت موج برشی می توان علاوه بر سرعت موج فشاری از نگرهای دیگر نیز استفاده کرد. همانطور که بیان شد در میدان مورد بررسی تنها یک چاه دارای مقادیر سرعت موج برشی می باشد، بنابراین به منظور انجام مطالعات مکانیک سنگی در ابتدا نیاز به مدل مناسبی جهت تخمین سرعت موج برشی در سایر چاههای میدان

می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی محققان نشان داده است که پارامترهای سرعت موج فشاری (V_p)، دانسیته سازند (ρ_{ob}) و تخلخل نوترون (N_{phi}) بیشترین ضریب همبستگی را با سرعت موج برشی (V_s) دارند، به همین علت وارد مدل‌های تخمین می‌شوند در حالیکه مقاومت جانبی کم عمق (LLS) و مقاومت جانبی عمیق (LLD) کمترین ضریب همبستگی را با سرعت موج برشی (V_s) برخوردار هستند و این دو پارامتر وارد مدل تخمین نمی‌شوند. در این مطالعه از روش رگرسیون خطی جهت تخمین سرعت موج برشی (V_s) استفاده می‌گردد. در این مطالعه تکنیک رگرسیون خطی چندگانه توسط نرم افزار آماری بسیار قوی SPSS انجام می‌شود.

روش رگرسیون، یک روش آماری در برآورد رابطه ریاضی به منظور تعیین کمیت یک مجهول به کمک یک یا چند متغیر است. در روش رگرسیون چندگانه چند متغیر مستقل تاثیر عمده‌ای بر متغیر وابسته دارند. زمانی می‌توان از رگرسیون چندگانه استفاده کرد که شرایط زیر برقرار باشد (Allison, 1999):

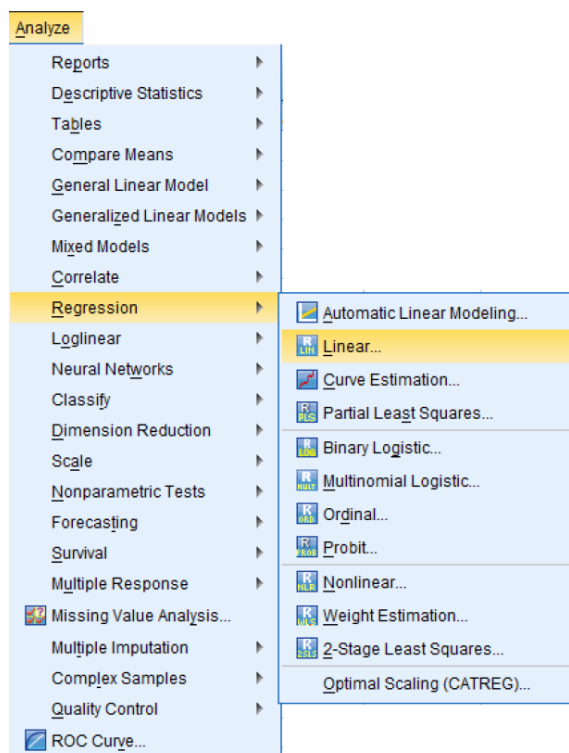
- رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته وجود دارد.
- متغیر وابسته دارای مقادیر پیوسته باشد.
- متغیرهای مستقل نیز دارای مقادیر ترتیبی باشند.
- نیاز به تعداد داده زیادی است.

در این مدل‌سازی هدف تخمین سرعت موج برشی می‌باشد. با توجه به شرایطی که در استفاده از رگرسیون چندگانه بیان شد مشخص می‌شود که این تکنیک روش بسیار مناسبی به منظور برآورد این رابطه ریاضی است. در این مدل، سرعت موج برشی بعنوان متغیر وابسته و پارامترهای پتروفیزیکی سرعت موج فشاری، دانسیته، و نمودار تخلخل نوترون بعنوان متغیرهای مستقل می‌باشد. برای پیدا کردن این رابطه از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. مدل رگرسیون چندگانه بین متغیرهای وابسته و مستقل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DTS = \beta_0 + \beta_1 DTC + \beta_2 DTC^2 + \beta_3 RHOB + \beta_4 NPHI \quad (3-6)$$

که در رابطه فوق ضرایب بتا ضرایبی هستند که باید توسط مدل رگرسیونی تعیین شوند.

نرم افزار SPSS یک بسته آماری برای علوم اجتماعی است که یکی از نرم افزارهای مشهور آماری که به منظور تجزیه و تحلیل داده های آماری در علوم اجتماعی طراحی شد ولی اینک محققین تقریباً در تمام حوزه ها می توانند برای تحلیل داده های خود از این نرم افزار استفاده کنند. محیط این نرم افزار در عین سادگی، بسیار کارآمد است. این نرم افزار به منظور مدل سازی رگرسیونی دارای پنجره های مختلف است، در این مطالعه از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شده است که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ مسیر آنالیز رگرسیون خطی در SPSS

بعد از آنالیز انجام شده، معادله تخمین سرعت برشی به صورت زیر بدست آمد:

$$DTS = 7.808 + 3.616DTC + 0.014DTC^2 + 16.653 RHOB \quad (3-7)$$

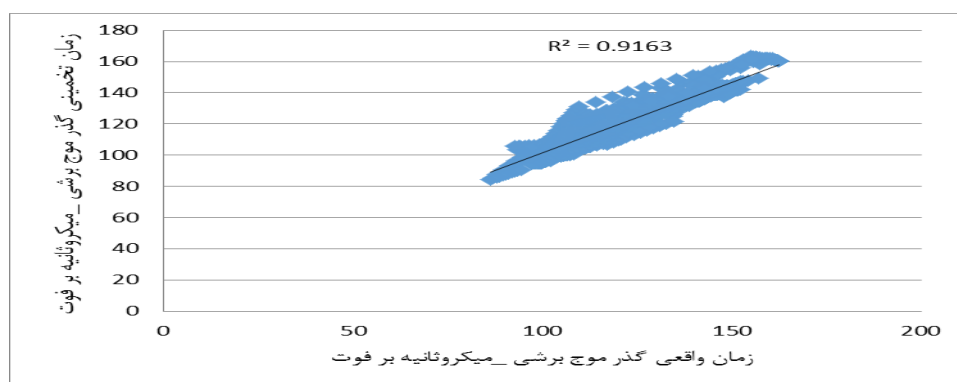
در رابطه نهایی نگاره تخلخل نوترونی به دلیل عدم معنی داری از رابطه حذف شده است.

در جدول ۳-۳ مقایسه ای بین چندین رابطه جهت تخمین زمان گذر (یا سرعت موج برشی) انجام شده است و کیفیت برازش هر کدام نیز ارائه شده است.

جدول ۳-۳ روابط مختلف جهت پیش بینی سرعت موج برشی

ضریب تعیین (R Square)	رابطه	اسم رابطه
۰/۸۹	$DTS = 1.9 * DTC$	پیکت (برای سنگ آهک) (۳-۸)
۰/۸۹	$Vs = -0.05509 * (Vp)^2 + 1.0168 * (Vp) - 1.035$	کاستاگنا (۳-۹)
۰/۹۲	$DTS = 7.808 + 3.616DTC + 0.014DTC^2 + 16.653 RHOB$	رابطه رگرسیونی ۱ (۳-۱۰)
۰/۹۱	$DTS = -54.006 + 3.729DTC - 0.0154DTC^2$	رابطه رگرسیونی ۲ (۳-۱۱)

برازش بین مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه مورد نظر حاصل از لاگ DTS و مقادیر تخمین زده از رابطه رگرسیونی ۱ دارای ضریب تعیین نسبتاً قوی برابر با ۹۲٪ می باشد که بیانگر اعتبار این رابطه به منظور تخمین سرعت موج برشی در سازند سروک در میدان مورد مطالعه می باشد.



شکل ۳-۵ تخمین موج برشی با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه

بنابراین با استفاده از معادله (۳-۱۰)، سرعت موج برشی در چاهی که فاقد نگار موج برشی است تخمین زده شده و اطلاعات برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در این چاه کامل می‌شود. و می‌توان این پارامترها را از معادلات گفته شده در فصل قبل بدست آورد.

۳-۶ تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی

از آنجایی که اندازه‌گیری‌های صوتی در فرکانس‌های بالا انجام می‌شوند، خواص الاستیکی که از نگارها محاسبه می‌شوند خواص الاستیک دینامیکی هستند. اما از آنجا که تغییرشکل یا شکستگی‌های رخ داده در چاه در مقایسه با انتشار موج با فرکانس بالا، فرآیندهای آهسته‌تری هستند، در نتیجه در مدل‌سازی ژئومکانیکی باید از خواص الاستیک استاتیکی استفاده کرد. بدین منظور خواص الاستیک محاسبه شده از نگارها را معمولاً با استفاده از نتایج آزمایش‌های مغزه کالیبره می‌کنند (Chardac, et al., 2005)

به دلیل هزینه بالا و مشکلاتی که در تهیه مغزه وجود دارد، روابط تجربی فراوانی برای تبدیل مقادیر دینامیکی به استاتیکی وجود دارد. این روابط برای مناطق خاص، مطابق با لیتولوژی و شرایط منطقه تهیه شده است. تعدادی از این روابط که در مخازن کربناته و سنگ آهک کاربرد دارد در جدول ۳-۴ آورده شده است. در این روابط E_{sta} و E_{dyn} مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بر حسب Gpa هستند.

جدول ۳-۴ روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
(۳-۱۲)	$E_{sta} = 0.4145E_{dyn} - 1.0593$	مخازن کربناته ایران	(Afsari, et al., 2010)
(۳-۱۳)	$E_{sta} = 0.77E_{dyn} + 0.02$	سنگ آهک	(Eissa, et al., 1988)
(۳-۱۴)	$E_{sta} = 0.018E_{dyn}^2 + 0.422$	سنگ آهک	(Fjaer, et al., 2008)

در میدان مورد نظر، کارفرما از رابطه زیر برای محاسبه مدول یانگ استاتیک استفاده می کند:

$$E_{sta} = 0.0023 UCS + 2.96 \quad (3-15)$$

در رابطه فوق واحد مقاومت فشاری تک محوره PSI و مدول یانگ استاتیکی بر حسب گیگاپاسکال است.

همچنین جهت تخمین پارامترهای استاتیکی مدولهای برشی و حجمی از روابط زیر استفاده می

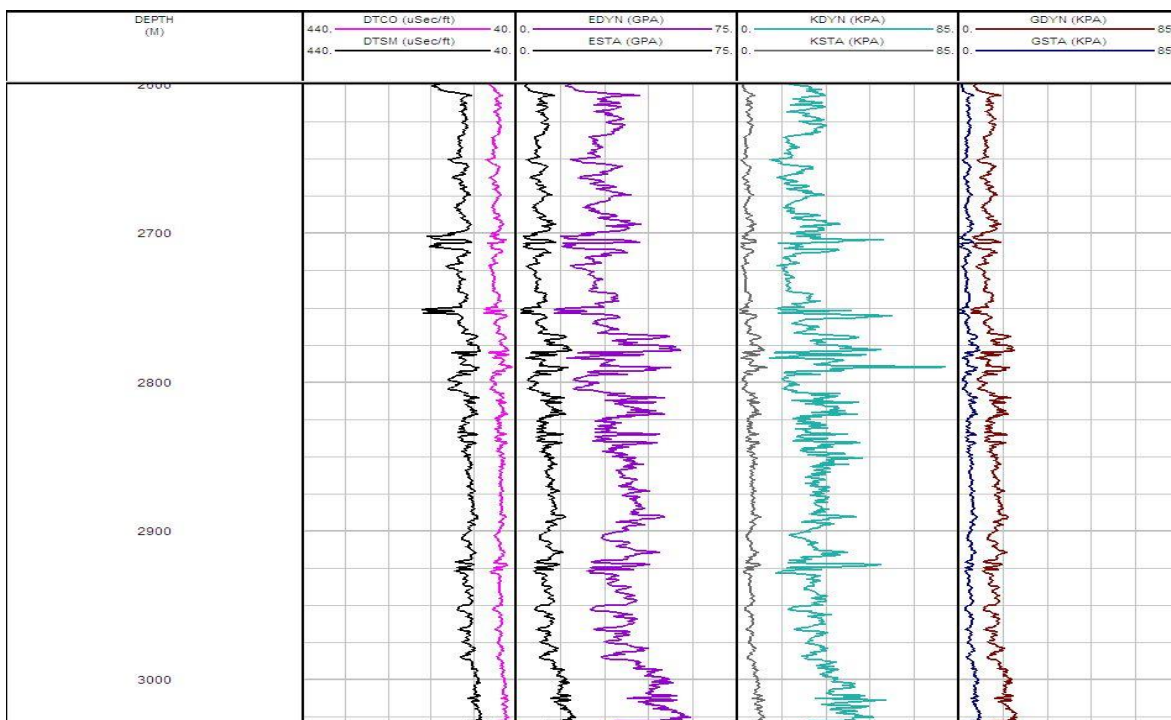
شود. (Fjaer, et al., 2008)

$$G_{sta} = \frac{E_{sta}}{2(1 + \nu_{sta})} \quad (3-16)$$

$$k_{sta} = \frac{E_{sta}}{3(1 - 2\nu_{sta})} \quad (3-17)$$

پارامترهای تخمین زده شده استاتیکی مدول های یانگ، برشی و حجمی در شکل ۳-۶ نشان

داده شده است:



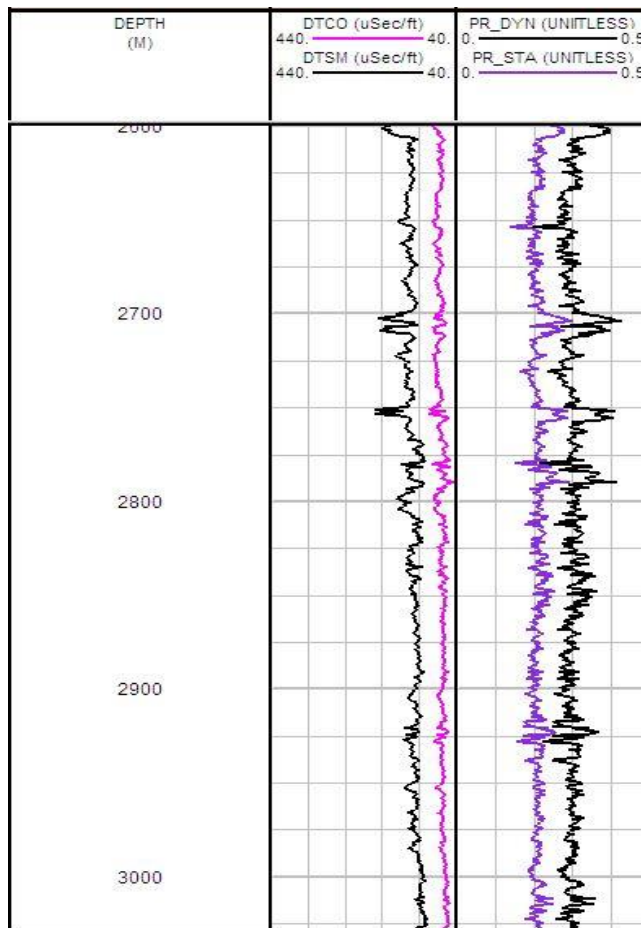
شکل ۳-۶ تخمین مدول های یانگ، برشی و حجمی استاتیک در چاه A

نسبت پواسون از عوامل مهم در مدلسازی ژئومکانیکی و خصوصا در تخمین فشار شکست سازند است. این ضریب یکی از ضرایب الاستیک و طبق تعریف، نسبت تغییر شکل عرضی به تغییر شکل طولی در اثر اعمال تنش به جسم است.

در شرکت کارفرما از رابطه زیر برای تبدیل نسبت پواسون دینامیکی به استاتیک استفاده میشود:

$$v_{sta} = 0.7 v_{dyn} \quad (3-18)$$

با استفاده از رابطه فوق نسبت پواسون استاتیک به دینامیک تبدیل شده که در شکل ۳-۷ آورده شده است.



شکل ۳-۷ نسبت پواسون استاتیک و دینامیک

۳-۶-۱ مقاومت سنگ

در تخمین مقاومت فشاری تک محوره از داده های نگارها، عموماً از سه نوع داده های بدست

آمده از نگارهای صوتی، نوترون و چگالی استفاده میشود. در همین رابطه مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده به سه دسته کلی تقسیم میشود (Chang, et al., 2006).

- ۱- مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده از داده های صوتی
- ۲- مقاومت فشاری بدست آمده از داده های تخلخل
- ۳- مقاومت فشاری به دست آمده از داده های مدول الاستیسیته

مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده از داده های صوتی: زمان سیر و یا موج فشاری در

سنگ یکی از مهمترین پارامترهایی است که با استفاده از آن می توان مقاومت فشاری را تخمین زد. دلیل این امر آن است که هرچه ماده یا سنگ مورد نظر دارای شکستگی بیشتری باشد و یا مواد تشکیل دهنده آن دارای تراکم کمتری باشند سرعت امواج صوتی کاهش می یابد. بدین ترتیب سرعت امواج صوتی می تواند بیانگر خصوصیات فیزیکی یک سنگ باشد.

تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر مبنای تخلخل: یکی دیگر از خواص مهم سنگ برای

تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ، تخلخل می باشد. افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت سنگ می گردد. البته این رابطه خطی نیست و با توجه به نوع سنگ تغییر می کند. سرعت انتشار امواج با افزایش روزنه داری کاهش می یابد و این پدیده هم در سنگهای خشک و هم در سنگهای اشباع صادق است. لذا ارتباط قوی بین سرعت امواج و تخلخل وجود دارد. از این رو یکی از بهترین پارامترهایی که می توان با استفاده از آن مقاومت فشاری تک محوره را تخمین زد، تخلخل می باشد (Kassab, et al., 2013).

تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر مبنای مدول الاستیسیته: مدول الاستیسیته نیز

یکی دیگر از پارامترهای شاخص خصوصیات سنگ می باشد که با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد و می توان آن را برای تخمین پارامترهایی همچون مقاومت سنگ استفاده نمود. البته این نکته قابل ذکر است که این پارامتر هم به صورت استاتیکی و هم به صورت دینامیکی قابل اندازه گیری می باشد. مدول استاتیکی که کمتر از مدول دینامیکی می باشد در روابط تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری

تک محوره سنگ کارایی دارد. در این روابط واحد مدول الاستیک (GPa) و واحد مقاومت فشاری تک محوره سنگ (MPa) می باشد.

جدول ۳-۵ نمونه هایی از روابط تجربی جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوره را نشان می دهد.

جدول ۳-۵ روابط تجربی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوره

شماره رابطه	رابطه	محل استفاده	مرجع
(۳-۱۹)	$UCS = \frac{(7682)}{DTC}^{1.82}$	سنگ آهک و دولومیت	(Chandong et al., 2006)
(۳-۲۰)	$UCS = 31.54V_p - 63.7$	سنگ های کربناته	(Yasar et al., 2004)
(۳-۲۱)	$UCS = 4.1089E_{sta} + 2.28$	سنگ های کربناته ایران	(Afsari et al., 2009)
(۳-۲۲)	$UCS = 570.808e^{-0.031DTC}$	سنگ های کربناته	(Amani et al., 2013)
(۳-۲۳)	$UCS = 194.4 - 0.6072DTC - 646.1 NPHI - 0.01644DTC^2 + 8.792(NPHI \times DTC)$	سنگ های کربناته	(Amani et al., 2013)
(۳-۲۴)	$UCS = 13.8 E_{dyn}^{0.51}$	سنگ آهک $10 < UCS < 300$ Mpa	(Chandong et al., 2006)

شرکت کارفرما رابطه زیر را جهت محاسبه مقدار مقاومت فشاری تک محوره استفاده می کند:

$$UCS = \frac{2 \times 10^{11}}{DTC^{4.131}} \quad (3-25)$$

مقاومت کششی مطابق رابطه ی ۳-۲۱ حاصل می گردد (Sarmadivaleh, et al., 2010).

$$T = 0.1 \times UCS$$

(۳-۲۶)

۳-۶-۲ زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

روابط ارائه شده برای مرتبط ساختن زاویه اصطکاک داخلی با خصوصیات پتروفیزیکی بسیار محدود است. پلامب^۱ رابطه زیر را برای سنگ‌های خرده آواری^۲ ارائه کرده است (Archer, et al., 2012):

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - \phi - V_{shale}) + 62.2 (1 - \phi - V_{shale})^2 \quad (۳-۲۷)$$

در این رابطه درصد حجم شیل را می‌توان با استفاده از نگار گاما (GR) از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$V_{shal} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (۳-۲۸)$$

یکی دیگر از روابطی که برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد رابطه لال^۳ است که عبارت است از (Lal, 1999):

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{V_p - 1000}{V_p + 1000} \right) \quad (۳-۲۹)$$

در این روابط ϕ تخلخل، V_{shale} حجم شیل بر حسب درصد و V_p سرعت موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه است.

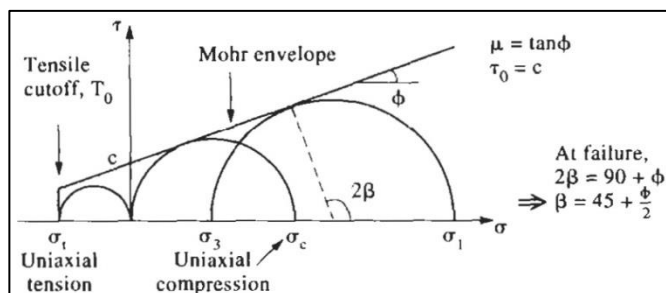
چسبندگی^۴ سنگ را می‌توان به عنوان مقاومت برشی سنگ در حالتی که تنش نرمالی بر روی آن اعمال نمی‌گردد، تعریف نمود (Hudson, et al., 2003). چسبندگی در واقع محل برخورد خط شکست معیار موهر-کلمب با محور تنش برشی تعریف شده است (شکل ۸-۳).

^۱ Plumb

^۲ Clastic Rock

^۳ Lal

^۴ Cohesion



شکل ۳-۸ ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بر روی معیار شکست موهر-کلمب (Hudson, et al.,

2003)

رابطه تجربی برای محاسبه مقدار چسبندگی با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی ارائه نشده است؛ اما با توجه به این که سایر پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه هستند، می‌توان با مراجعه به رابطه معیار موهر-کلمب مقدار چسبندگی را نیز از رابطه زیر محاسبه کرد (Hudson, et al., 2003):

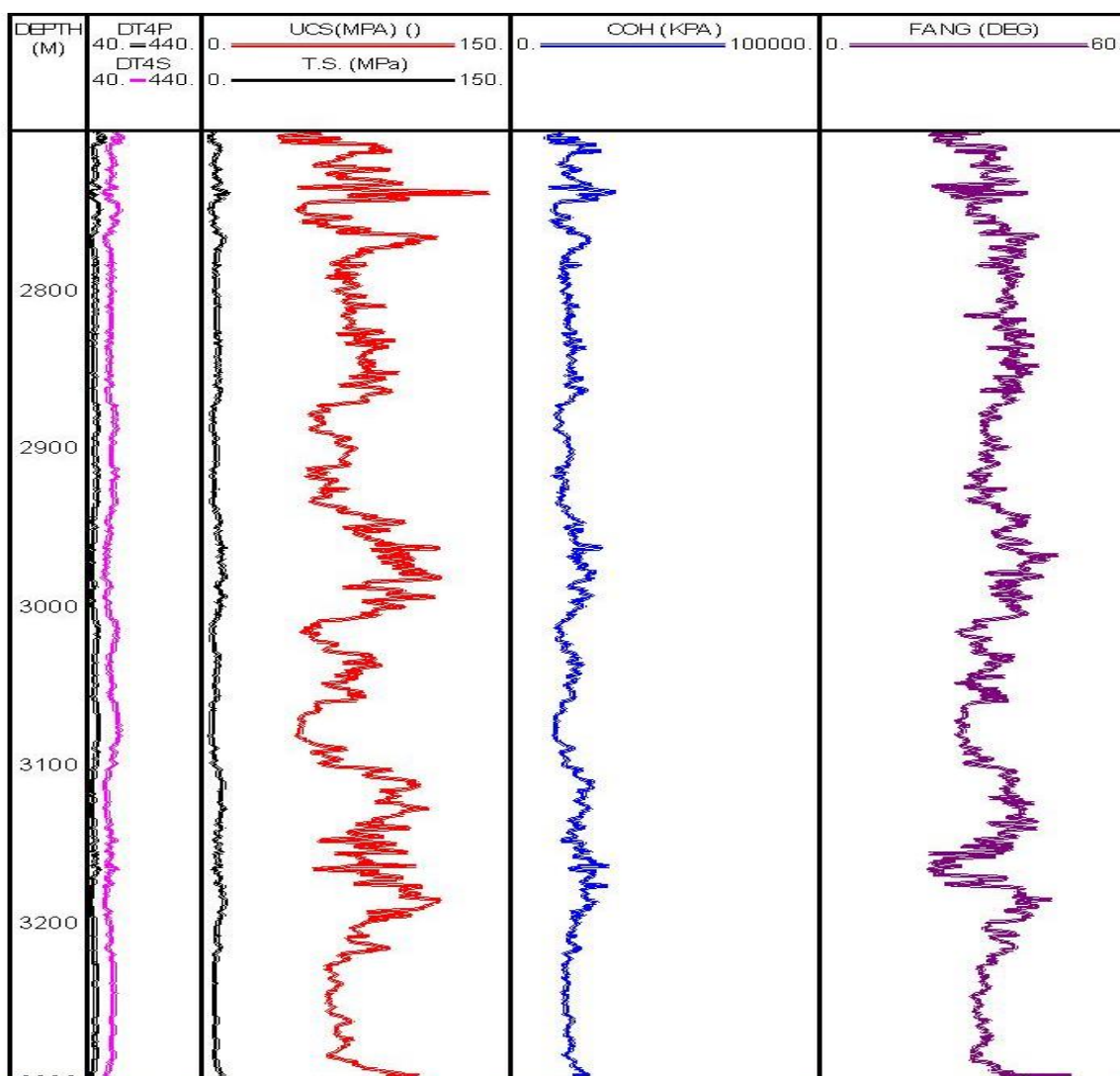
$$c = \frac{UCS}{2 \tan(45 + \frac{\phi}{2})} \quad (3-30)$$

در شکل ۳-۹ نمودار چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی به همراه مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی نشان داده شده است.

۳-۶-۳ تخمین فشار منفذی

فشار منفذی، به فشار سیال موجود در تخلخل سنگ اطلاق می‌گردد. لغت نامه نفتی شلومبرگر از فشار منفذی با نام های فشار مخزن و یا فشار همه جانبه نیز یاد کرده است. بسته به میزان نفوذپذیری و تخلخل سنگ، فشار منفذی تغییر می‌کند. در سازندهای شیلی به دلیل مؤثر نبودن نوع تخلخل، سیال منفذی درون فضای داخلی سنگ محبوس گشته و لذا نمی‌تواند در اثر فشار ستون سنگی بالادست خود به حرکت درآید. در نتیجه فشار منفذی به طور غیرطبیعی در این نقاط افزایش پیدا می‌کند. فشار منفذی طبیعی یا همه جانبه، به فشار معادل ستون آب بالادست تا سطح ایستایی گفته می‌شود (صائمی، و غیره، ۱۳۹۲).

تعیین مناسب فشار منفذی برای طراحی، کنترل و ایمنی چاه، حذف مشکلات عملیات حفاری و کاهش ریسک فنی و اقتصادی برنامه و توسعه مخازن ضروری است. در مناطقی که پیشینه اکتشافی و تولیدی دارند، مجموعه ای از اطلاعات که شامل اطلاعات لرزه ای، اطلاعات نگارهای متداول (صوتی، مقاومت ویژه، نوترون و چگالی سازند) و اطلاعات بدست آمده از اندازه گیری های مستقیم (MDT, DST, ... می باشند، می توانند برای تعیین فشار در چاه هایی که قرار است حفاری شوند استفاده گردد (Zhang, 2011).



شکل ۹-۳ نمودار پارامترهای مقاومتی سنگ در چاه A لایه سروک

برای به دست آوردن نگار پیوسته‌ای از فشار منفذی روابط مختلفی ارائه شده است که در این میان رابطه تجربی ایتون^۱ یکی از متداول‌ترین روش‌هاست. اما این روش و به طور کلی روش‌های مبتنی بر نگارهای چاه‌پیمایی بر مبنای خواص سازندهای شیلی توسعه یافته‌اند و بنابراین فشارهای محاسبه شده در این روش‌ها فشارهای موجود در سازند شیلی است.

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌ها از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا و گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه زیر می‌توان فشار منفذی را محاسبه کرد:

$$P_2 = P_1 + \rho_f g(Z_2 - Z_1) \quad (3-31)$$

در این رابطه P_1 فشار سیال سازند در عمق Z_1 ، P_2 فشار سیال در عمق Z_2 ، ρ_f چگالی سیال و g شتاب جاذبه زمین است (Zhang, 2011).

در جدول ۳-۶ مقادیر عمق و فشار مبنا در سازندهای مختلف نشان داده شده است. با استفاده از مقادیر این جدول و با استفاده از رابطه (۳-۳۱) فشار منفذی در چاه‌ها تخمین زده شده است. به علاوه مقادیر محاسبه شده با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش MDT^2 کالیبره شدند (جدول ۳-۷). در ادامه نتایج محاسبه فشار منفذی با این روش نشان داده خواهد شد.

^۱ Eaton

^۲ Modular Dynamic formation Tester

جدول ۳-۶ داده های فشار و اعماق تماس سیالات مخزنی در میدان

مخزن	عمق مبنا ^۱ (متر حفار)	فشار مبنا ^۲ (psi)	سطح تماس نفت و آب (WOC ^۳) (متر حفار)	سطح آب آزاد (FWL ^۴) (متر)	گرادین فشار نفت (psi/ft)
سروک	۲۷۵۰	۴۵۶۶	۲۹۹۹-۲۷۰۴	-	۰/۴۰۵
کژدمی	۳۵۹۰	۵۴۸۵	۳۴۵۳,۵-۳۵۴۰	-	۰/۳۷۸
گدوان	۳۸۵۰	۶۲۷۰	۳۷۵۰	۳۹۱۶	۰/۳۷۵

جدول ۳-۷ داده های فشار منفذی در چاه A (نتایج تست MDT)

عمق (متر)	فشار (کیلو پاسکال)
۲۸۰۳	۳۱۸۶۷
۲۸۳۸	۳۲۸۳۳
۲۹۱۹	۳۳۴۸۳
۲۹۳۵	۳۳۳۷۹
۲۹۵۰	۳۳۸۳۳
۲۹۸۳	۳۳۹۲۵

۳-۶-۴ تنش های برجا

به طور کلی تنش های برجا شامل تنش اصلی عمودی و دو تنش افقی نابرابر هستند. در محیط-هایی که از لحاظ تکتونیکی غیرفعال هستند تنش های افقی کوچکتر از تنش عمودی هستند، با این حال در رژیم های تکتونیکی فعال مقدار تنش افقی بزرگتر از تنش عمودی است (Zobak, 2007). تنش ها از مهم ترین پارامترهای مدل ژئومکانیکی هستند که در هر مطالعه ژئومکانیکی باید مقدار و جهت آنها تعیین شود.

در صورتی که مقدار تنش عمودی از هر دو تنش افقی بیشتر باشد، رژیم تنش نرمال اتفاق می-

^۱ Datum Depth

^۲ Datum Pressure

^۳ Water-Oil Contact

^۴ Free Water Level

افتد. همچنین در صورتی که مقدار تنش افقی حداکثر از تنش عمودی بزرگ‌تر باشد، صفحات گسل در امتداد یکدیگر لغزیده اما به بالا یا پایین جابجا نمی‌گردند و در این حالت رژیم تنش امتداد لغز خواهد بود. در نهایت چنانچه که هر دو تنش افقی بزرگ‌تر از تنش عمودی باشند، صفحات گسل در امتداد آزمون شیب گسل بر روی یکدیگر لغزیده رژیم تنش معکوس^۲ است (Zobak, et al., 2003).

۱-۴-۶-۳ تنش عمودی

تنش عمودی ناشی از وزن طبقات بالایی است که می‌توان آن را با استفاده از چگالی روبره در هر نقطه‌ای به دست آورد. به دلیل اینکه در سطوح افقی پوسته زمین نباید تنش برشی وجود داشته باشد، یکی از جهت‌های اصلی تنش عمودی در نظر گرفته شده است. تنش عمودی با استفاده از رابطه (۳-۳۲) و بر اساس نگار چگالی به دست می‌آید:

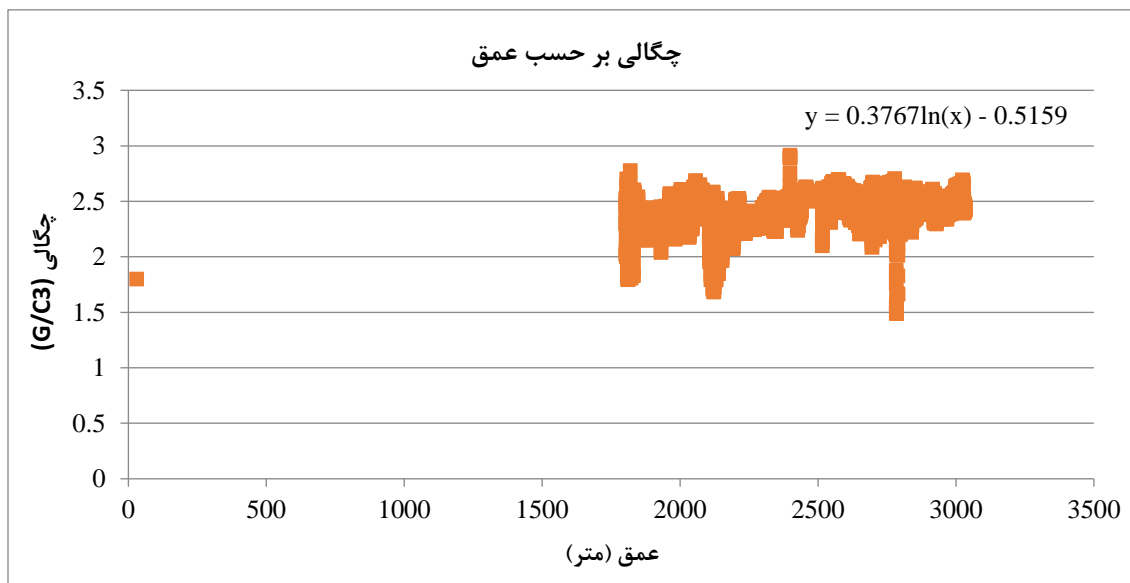
$$S_v = \int_0^z \rho(z)g dz \approx \bar{\rho}gz \quad (3-32)$$

در این رابطه S_v تنش عمودی، $\bar{\rho}$ چگالی متوسط، g ثابت گرانش و z عمق از سطح زمین است (Zoback, 2007).

مشکلی که ممکن است وجود داشته باشد این است که نگار چگالی معمولاً در بخش‌های مخزنی موجود است. در این صورت باید مقادیر بالادست به روش برون‌یابی تخمین زده شوند. بدین صورت که چگالی سنگ در نزدیکی سطح زمین را برابر $1/8$ در نظر گرفته و با برازش تابعی لگاریتمی بر نمودار چگالی، رابطه‌ای برای محاسبه چگالی در بخش‌هایی که نگار چگالی موجود نیست به دست می‌آید (Archer, et al., 2012). شکل ۳-۱۰ نمودار و رابطه حاصل جهت محاسبه چگالی در چاه مورد نظر نشان می‌دهد.

^۱ Strike Slip

^۲ Reverse Regime



شکل ۱۰-۳ برون یابی چگالی بر حسب عمق در چاه A

۲-۴-۶-۳ تنش‌های افقی

طی عملیات حفاری وزن گل باید بیشتر از فشار منفذی و کمتر از تنش افقی حداقل باشد تا هم از فوران سیال سازند جلوگیری شود و هم بتوان از ایجاد یا انتشار احتمالی شکستگی‌های هیدرولیکی جلوگیری کرد (Rasouli, et al., 2010). تنش افقی حداقل می‌تواند به شکل مستقیم از داده‌های تست نشت سازند (LOT^۱)، شکست هیدرولیکی^۲ و داده‌های هرزروی گل برای نقاط خاصی از چاه و به صورت گسسته به دست آید. اما برای محاسبه تنش افقی حداکثر رابطه‌ای ارائه نشده است و این تنش معمولاً از تئوری گسلش اندرسون یا رابطه‌ی پوروالاستیک محاسبه می‌شود (Zobak, 2007; Zobak, et al., 2003). در مجموع تعیین مستقیم تنش‌های برجا پرهزینه، وقت‌گیر و پرخطر است. همچنین آزمایش‌های مورد نیاز فقط برای اعماق خاص و در چاه‌های خاص قابل اجراست و داده‌های حاصل به صورت گسسته است.

در کنار روش‌های اندازه‌گیری برجا، روش‌های تخمین تنش به دلیل کم‌هزینه بودن و سرعت در

^۱ Leak-Off Test

^۲ Hydraulic Fracturing

محاسبه مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های متداول برای تخمین تنش‌های افقی استفاده از روابط پوروالاستیک است (Fjaer, et al., 2008):

$$S_h = \frac{\vartheta}{1-\vartheta}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)}(\varepsilon_x + \vartheta \varepsilon_y) \quad (3-33)$$

$$S_H = \frac{\vartheta}{1-\vartheta}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\vartheta^2)}(\varepsilon_y + \vartheta \varepsilon_x) \quad (3-34)$$

در این روابط ϑ ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و S_V تنش عمودی بر حسب E_{sta} ، Mpa ، مدول الاستیسیته استاتیک بر حسب Gpa ، ε_x و ε_y به ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است.

روش تخمین تنش‌های افقی با استفاده از روابط بالا به این صورت است که ابتدا مقادیر کرنش‌های تکتونیکی در این روابط به صورت دلخواه انتخاب شده و مقادیر تنش محاسبه می‌شوند. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر تنش محاسبه شده، توزیع تنش در اطراف چاه و فشار گل، مناطق با احتمال گسیختگی با آنچه از نگار تصویری و کالیپر به دست آمده، مطابقت داده می‌شود. در صورت عدم انطباق مناسب، دوباره مقادیر کرنش تکتونیکی تخمین زده می‌شود تا انطباق کافی حاصل شود.

۱-۲-۴-۶-۳ معیار شکست موهر-کولومب

برای پیش‌بینی وقوع شکست در دیواره چاه با وضعیت تنش‌های پیش‌بینی، باید از معیارهای شکست استفاده کرد. تاکنون مدل‌های زیادی برای شکست برشی پیشنهاد شده است ولی معیار شکست مور-کولمپ معروفترین نوع شکست است که بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$S_1 = UCS + S_3 \times \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad (3-35)$$

که در آن S_1 تنش حداکثر، S_3 تنش حداقل، UCS مقاومت فشاری تک محوره و ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. در صورتیکه که سیال در محیط سنگی باشد این رابطه به صورت زیر

تبدیل می شود.

$$S_1 - P_{pore} = UCS + (S_3 - P_{pore}) \times \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad (3-36)$$

که در آن P_{pore} فشار منفذی سازند است. با قرار دادن $S_{\theta=90}$ بجای S_3 و $S_{\theta=0}$ بجای S_1 رابطه به شکل زیر تغییر می کند (Fjaer, et al., 2008).

$$P_{BO} = \frac{(3S_H - S_h - P_{pore} - UCS + P_{pore}) \times \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)}{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 1} \quad (3-37)$$

۲-۲-۴-۶-۳ معیار شکست موگی-کولومب

معیار موهر-کلمب اثر تنش‌های میانی بر مقاومت سنگ را نادیده می‌گیرد. در نتیجه انتظار می‌رود که این معیار محافظه‌کارانه عمل کرده و فشار گل لازم برای پایداری دیواره چاه را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. با وجود کاربردهای زیاد معیار شکست موهر کلمب، مثال‌های زیادی از عملکرد نامناسب این معیار شکست وجود دارد که نشان‌دهنده ضعف آن در تخمین فشار گل مورد نیاز است. موگی با انجام آزمایش‌های سه‌محوره بر روی سنگ‌ها نشان داد که تنش اصلی میانی بر روی مقاومت سنگ تأثیر بسزایی دارد. بر این اساس موگی معیار خود را به صورت زیر بیان کرد (Al-Ajmi, 2006):

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (3-38)$$

که در این رابطه τ_{oct} تنش برشی اکتاهدرال^۱ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3-39)$$

^۱ Octahedral

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi, b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (3-40)$$

بر اساس این معیار حد پایین فشار گل با استفاده از روابط موجود در جدول ۳-۱ به دست می آید (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

جدول ۳-۱ حد پایین فشار گل با استفاده از معیار مویی کلمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

وضعیت تنش	حد پایین فشار گل P_{wb}
$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{BO} = \frac{1}{6 - 2b'^2} [(3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)}]$
$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{BO} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_o)]^2 - 3(A - 2B)^2}$
$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{BO} = \frac{1}{6 - 2b'^2} [(3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 + b'AG)}]$
$B = \sigma_v + 2\theta(\sigma_H - \sigma_h), H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12), A = 3\sigma_H - \sigma_h$ $G = K + b'A, a' = 2c \cos \varphi, b' = \sin \varphi K = a' + b'(B - 2P_o)$	

فشار P_{BO} حداقل فشاری است که سنگ دچار خردشدگی نشود که این فشار باید از طرف گل حفاری ایجاد شود. در صورتیکه فشار مورد نظر بر عمق تقسیم شود به فشار متناسب با دانسیته سیال تبدیل می شود.

$$\rho_{BO} = \left(\frac{P_{BO}}{9.81 \times Depth} \right) \quad (3-41)$$

در اینجا ρ_{BO} وزن سیال متناسب با فشار خردشدگی بر حسب gr/cm^3 است.

با مقایسه وزن گل با ρ_{BO} می توان نقاطی که دارای پتانسل خردشدگی است شناسایی کرد. برای محاسبه P_{BO} همانطور که در بالا ذکر شده است، همه متغیرها بجز تنش افقی حداقل و حداکثر مشخص شده اند. برای محاسبه تنش افقی حداکثر و حداقل از معادلات ۳-۲۸ و ۳-۲۹ استفاده می شود.

در این معادلات فقط کرنش ها تعیین نشده اند. پس با تغییر کرنش ها تنش ها تغییر کرده و با تغییر تنش ρ_{BO} تغییر می کند. زمانیکه این فشار کمتر از فشار گل شود، به این معنی است که

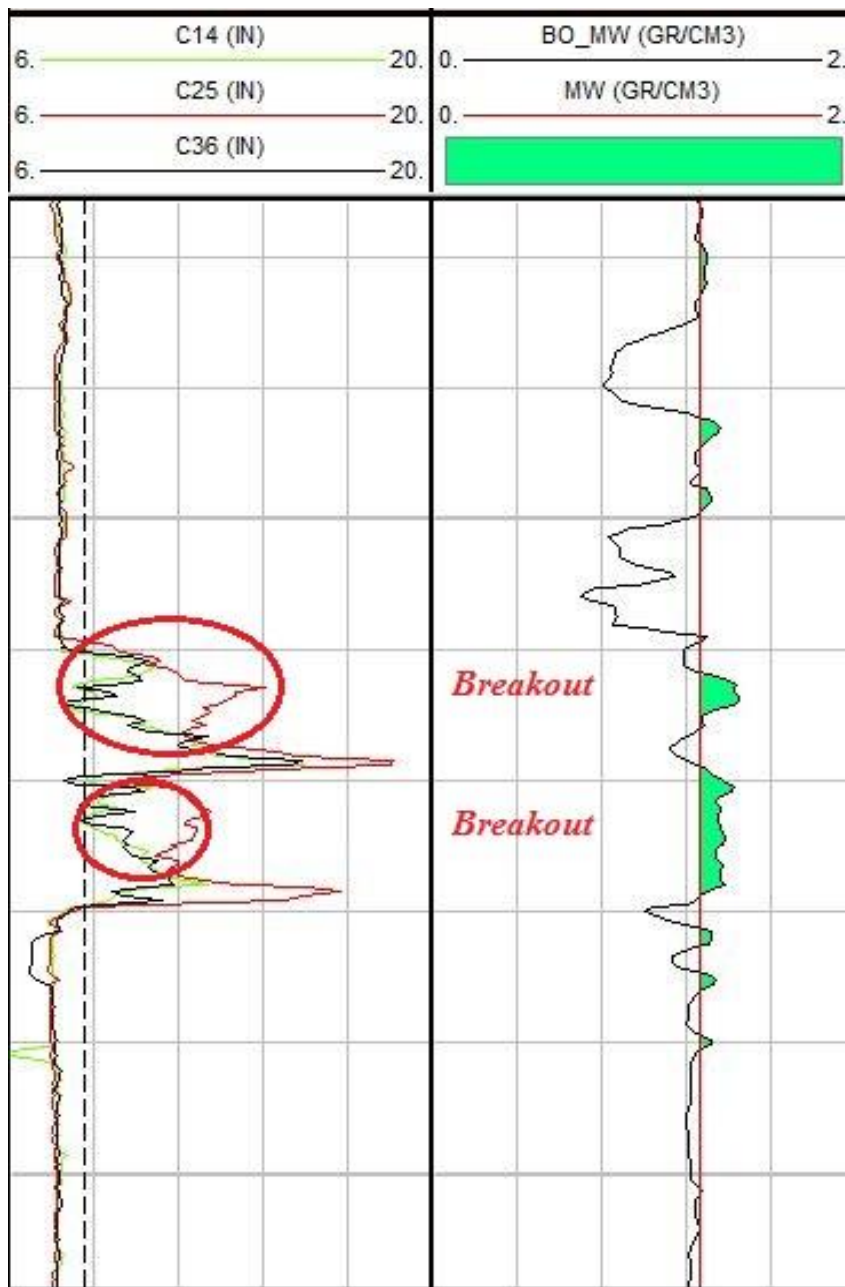
خردشدگی اتفاق افتاده است و با مقایسه آن با لاگ های کالیپر ۶ بازو می توان این کرنش ها را کالیبره و اعتبار سنجی کرد.

در این تحقیق با تغییر کرنش ها ρ_{BO} تغییر کرده و در زونی که خردشدگی وجود دارد از فشار گل کمتر می شود. با توجه به اینکه لاگ کالیپر ۶ بازو نیز دقیقاً در این زون خردشدگی را نشان می دهد، می توان دریافت که کرنش های انتخابی جهت محاسبه تنش های افقی درست انتخاب شده اند. شکل ۱۱-۳ اعتبار مدل مورد نظر را نشان می دهد.

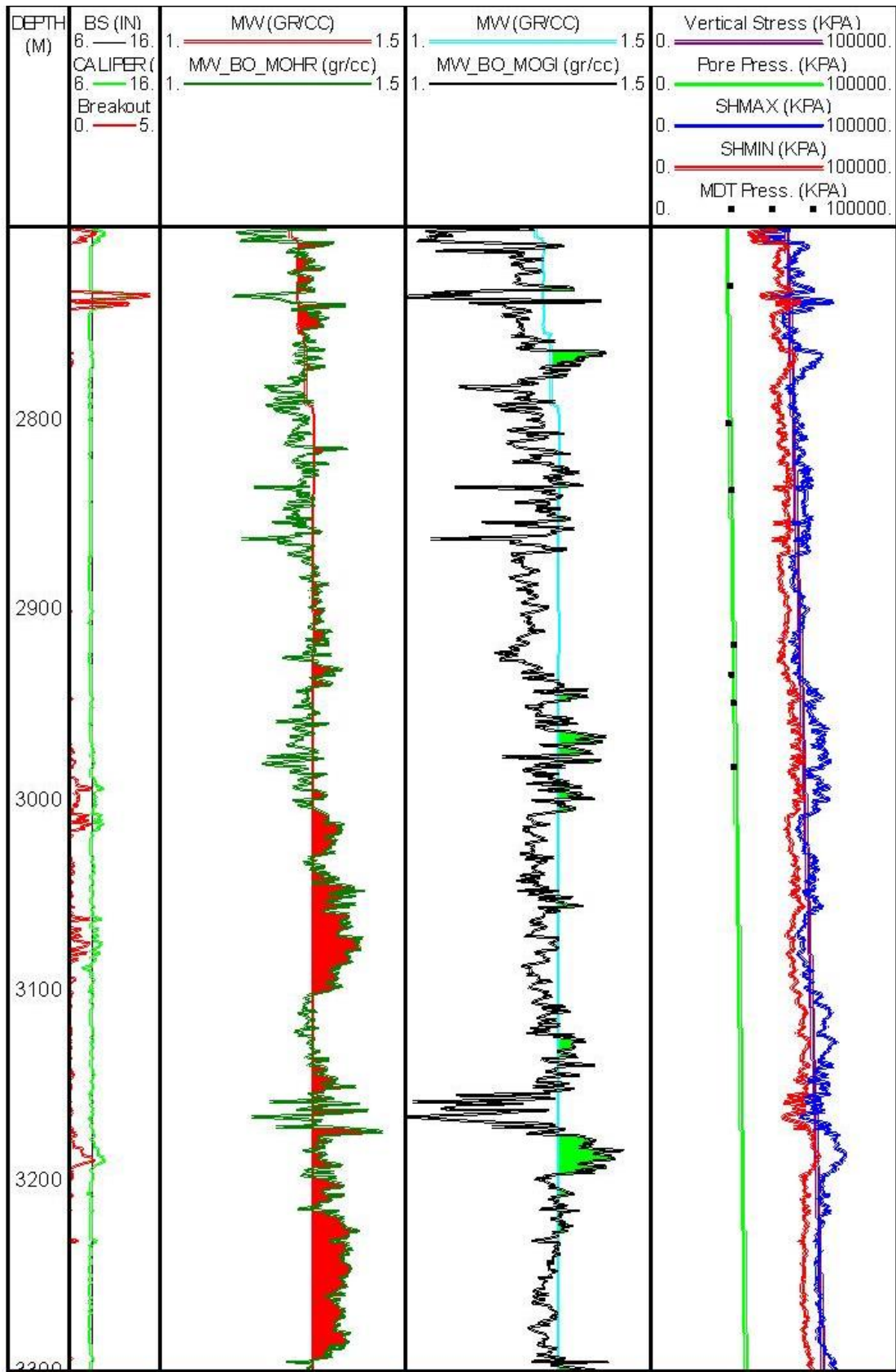
پس از محاسبه فشار و وزن گل شکست مشخص شد که معیار موهر-کولومب مقدار وزن شکست برشی را خیلی نزدیک به وزن گل استفاده شده پیش بینی می کند در نتیجه شکستگی های بیشتری پیش بینی می شود ولی معیار موگی-کولومب وزن گل مناسبتری پیش بینی کرده است ولی از پیش بینی بسیاری شکستگی های کوچک ناتوان است. مقادیر کرنش حداقل و حداکثر در معیار موگی-کولومب به ترتیب ۰/۰۸۵ و ۰/۴ و در معیار موهر-کولومب ۰/۴ و ۰/۷ هستند. همچنین معیار موهر-کولومب وضعیت تنش را به صورت گسل معکوس تخمین می زند. دلیل پیش بینی بهتر معیار موگی-کولومب در نظر گرفتن مقدار تنش میانی است که معیار موهر-کولومب آن را نادیده می گیرد. به همین دلیل معیار موهر-کولومب وزن شکست بالاتری می دهد. با توجه به نتیجه بهتر و با استناد به تحقیقات محققان پیشین در ادامه این تحقیق نیز از معیار موگی-کولومب استفاده خواهد شد.

با مشخص شدن کرنش ها، حال می توان تنش های افقی را با معادلات ۲۸ و ۲۹ بدست آورد. با وارد کردن این معادله در مدل مورد نظر تنش ها محاسبه می شود. شکل ۱۲-۳ تنش های محاسبه شده را نشان می دهد. در شکل ستون اول عمق بر حسب متر، در ستون دوم نمودار کالیپر و همچنین گشادی چاه (اختلاف کالیپر و اندازه مته) بر حسب اینچ، ستون سوم و چهارم به ترتیب وزن گل پیش بینی شده توسط معیارهای موهر-کولومب و موگی-کولومب ترسیم شده اند. همچنین در ستون آخر وضعیت تنش های عمودی، افقی، فشار منفدی و نتایج تست MDT (به صورت نقاط سیاه رنگ)

مشخص است.

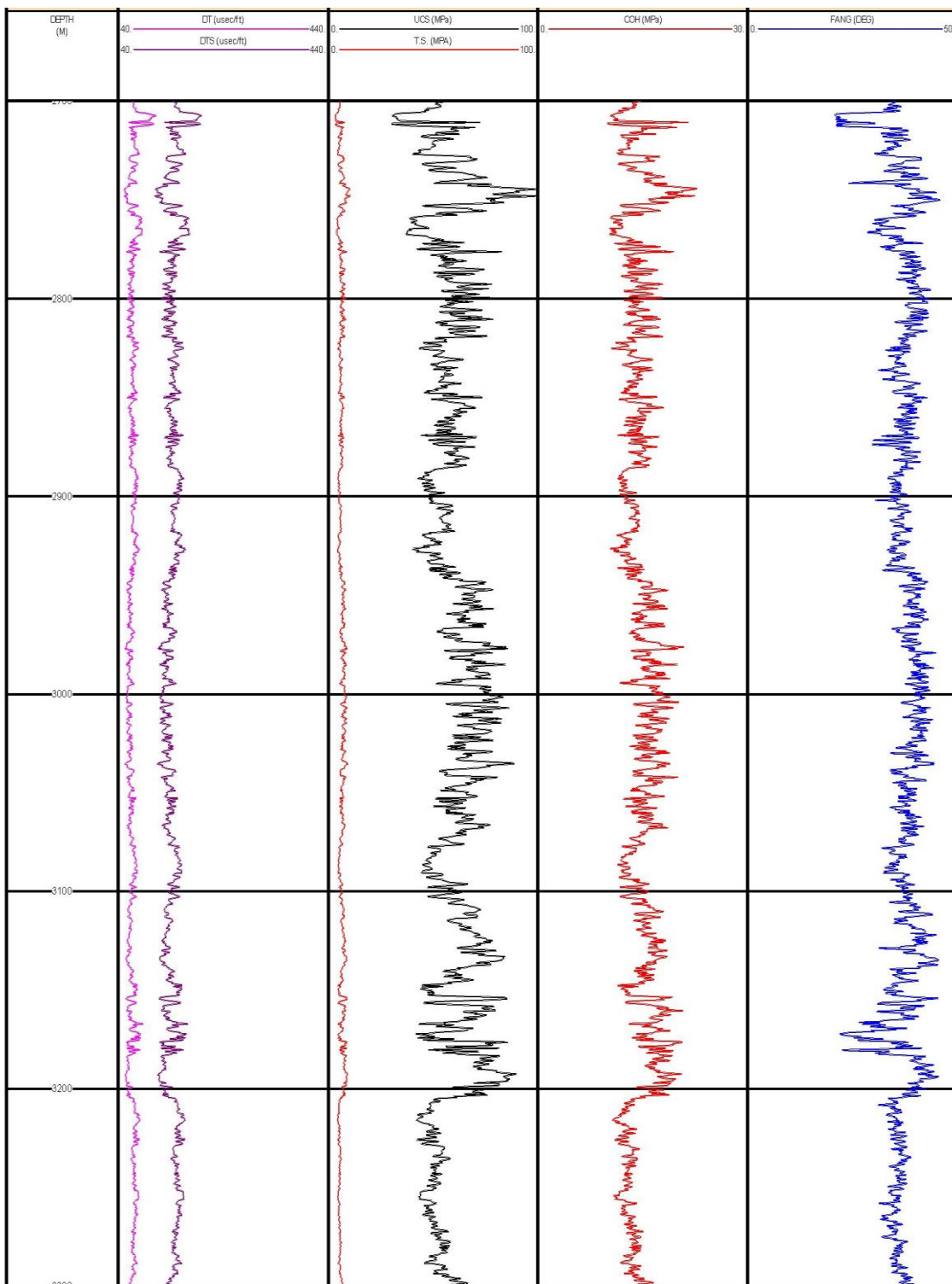


شکل ۱۱-۳ اعتبار سنجی تنش های افقی از طریق مطابقت دادن شکستگی های مشاهده شده با شکستگی های پیش بینی شده توسط معیار شکست

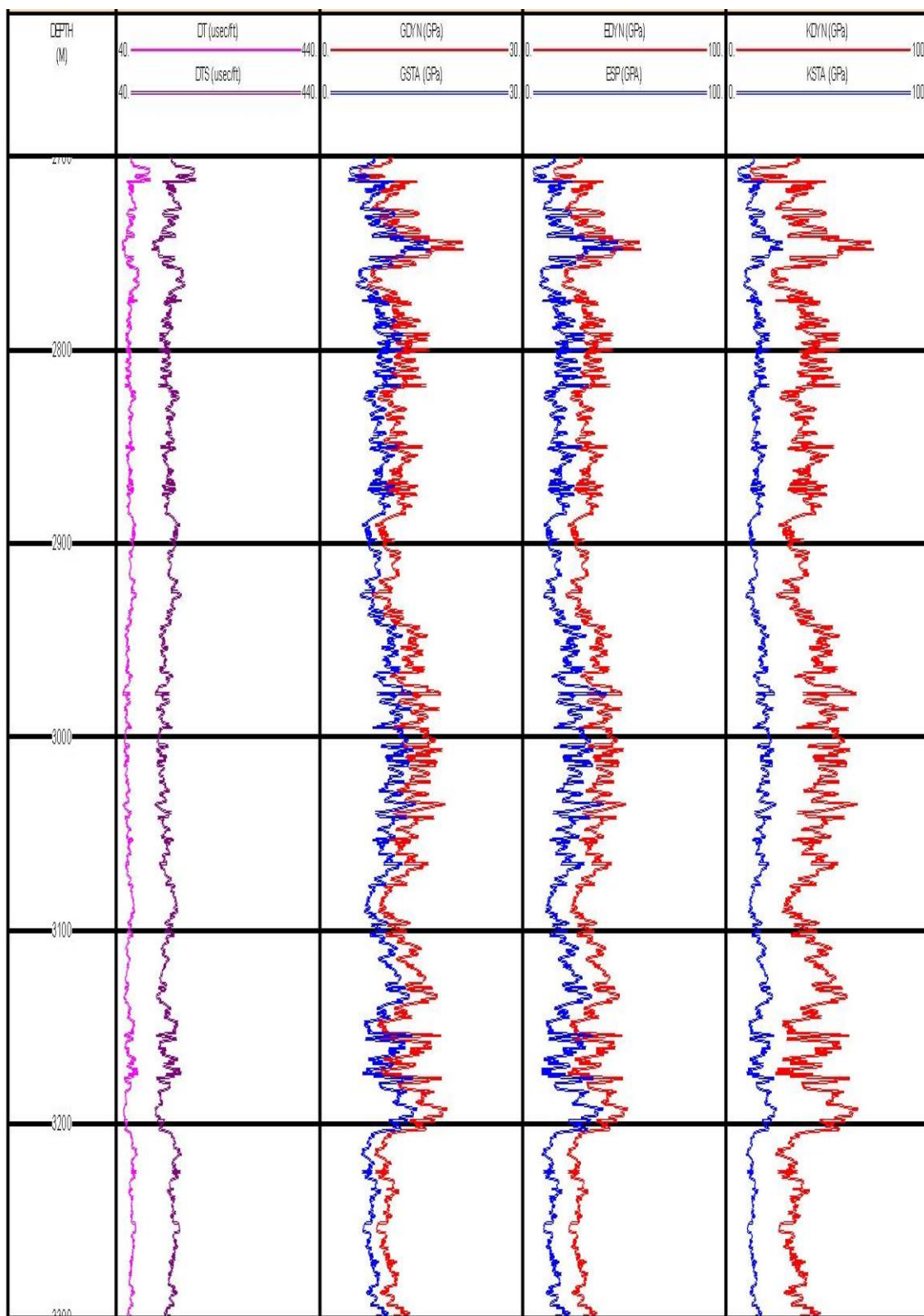


شکل ۳-۱۲ تنش های درجا میدان در چاه A به همراه پیش بینی های معیارهای شکست

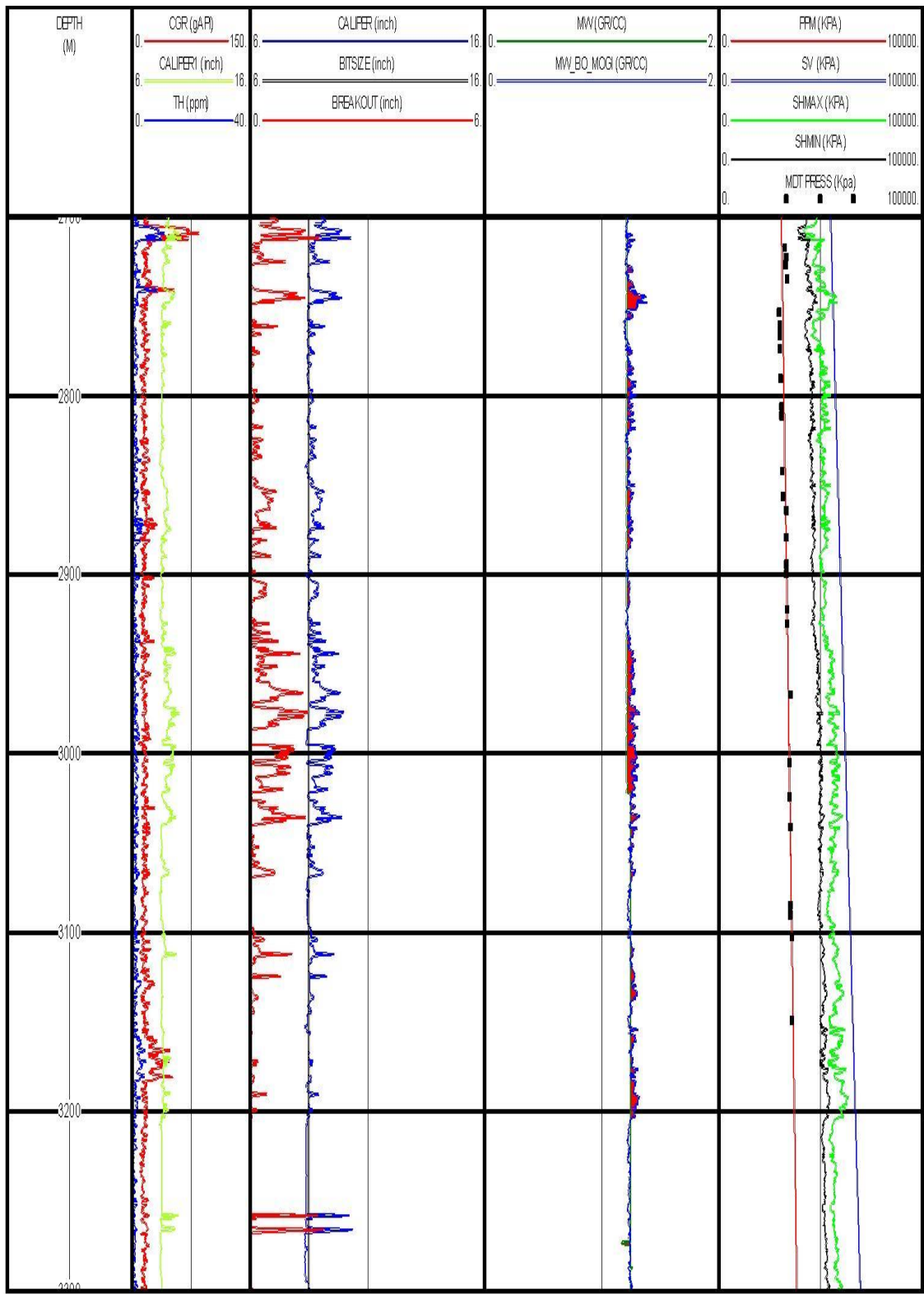
در شکل ۳-۱۳ پارامترهای مقاومتی، شکل ۳-۱۴ مدول های الاستیک و در شکل ۳-۱۵ تنش های برج و تخمین فشار منفذی سازند سروک در چاه B را مشاهده می کنید.



شکل ۳-۱۳ پارامترهای مقاومتی سنگ در چاه B



شکل ۱۴-۳ مدول های الاستیک در چاه B



شکل ۱۵-۳ تنش های برجا در چاه B به همراه پیش بینی معیار شکست موگی-کولومب

۳-۷ جمع بندی

در این فصل به معرفی مختصر میدان نفتی مورد تحقیق و سازندها و زمین شناسی سازندها پرداخته شد. همچنین بیان شد که مخازن این میدان اغلب از نوع کربناته می باشند. جهت شناخت صحیح میدان لازم است که به صورت سیستماتیک خواص ژئومکانیکی آن اندازه گیری شود. از آنجا که اندازه گیری این پارامترها سخت و پرهزینه است لذا به وسیله نگاره های پتروفیزیکی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ تخمین زده می شود. سپس به وسیله نتایج تست های آزمایشگاهی به مقادیر استاتیک تبدیل می شوند. که این مقادیر استاتیک کمتر از مقدار دینامیک پارامتر است. به این فرآیند فرآیند ساخت مدل ژئومکانیک گویند.

در ساخت مدل ژئومکانیکی داده های سه نگاره سرعت موج صوتی فشاری، برشی و چگالی لازم هستند. از آنجا که سرعت موج برشی در همه چاه ها موجود نیست با در اختیار داشتن نگاره موج برشی در یک چاه رابطه ای جهت تخمین سرعت موج برشی بر اساس دیگر نگاره ها ایجاد می شود تا در دیگر چاه ها مورد استفاده قرار گیرد. پس با تحلیل رگرسیونی رابطه ای چند متغیره متشکل از سرعت موج فشاری و چگالی با دقت ۹۲ درصدی حاصل شد تا سرعت موج برشی در دیگر چاه ها تخمین زده شود. همچنین در صورت موجود نبودن نگاره چگالی می توان از رابطه رگرسیونی دوم استفاده کرد که فقط به سرعت موج فشاری وابسته است و دقت ضریب تعیین ۹۱ درصدی دارد. ضریب تعیین بالای این معادلات باعث افزایش دقت در قدرت تخمین و در نتیجه افزایش کیفیت مدل ژئومکانیکی حاصل می شود.

جهت تبدیل پارامترهای الاستیک دینامیک به استاتیک از روابطی استفاده شده است که شرکت کارفرمای میدان ارائه نموده است. این روابط از نتایج تست های آزمایشگاهی بر روی مغزه حاصل شده اند.

فشار منفذی به روش گرادیان سیال و با در اختیار داشتن اعماق سطوح تماس سیالات مختلف

تخمین زده شد و با نتایج تست MDT کالیبره گردید. تنش عمودی که حاصل از وزن توده سنگ است به وسیله نتایج نگاره چگالی در هر عمق محاسبه گشت. به دلیل در اختیار نداشتن داده های آزمایش نشت^۱ سازند امکان محاسبه دقیق تنش های افقی وجود نداشت به همین دلیل تنش های افقی با استفاده از روابط پوروالاستیک تخمین زده شد و نتایج آن با استفاده از معیارهای شکست موهر-کولومب و موگی-کولومب اعتبار سنجی گردید که معیار شکست موگی-کولومب نتایج قابل قبول تری نشان می دهد. لذا جهت محاسبه تنش های افقی از معیار موگی-کولومب استفاده می شود. مقادیر کرنش حداقل و حداکثر به ترتیب ۰/۰۸۵ و ۰/۴ هستند. دلیل پیش بینی بهتر معیار موگی-کولومب در نظر گرفتن مقدار تنش میانی است که معیار موهر-کولومب آن را نادیده می گیرد. به همین دلیل معیار موهر-کولومب وزن شکست بالاتری می دهد.

^۱ Leak-Off Test

۴ بررسی ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای ژئومکانیکی

۴-۱ مقدمه

طراحی یک چاه و عملیات حفاری آن شامل مراحل بسیار زیادی از جمله جمع آوری داده های زمین شناسی و حفاری چاه های گذشته، پیش بینی فشار های منفذی و شکست سازند بر اساس داده های پتروفیزیکی و مطالعات خواص سنگی، پیش بینی مشکلات احتمالی، انتخاب پروفایل چاه، انتخاب دستگاه حفاری و هرگونه ابزار مورد نیاز جهت حفر ایمن و اقتصادی چاه است. در میان موارد ذکر شده عملیات حفاری چاه به عنوان پرهزینه ترین قسمت در نظر گرفته می شود لذا مهندسان جهت ارایه راهکاری جهت کاهش هزینه عملیات تلاش می کنند و انتخاب مته حفاری به عنوان ابزار حفاری یک چالش بزرگ در این امر به نظر می رسد. زیرا علاوه بر گران قیمت بودن خود مته، انتخاب نادرست مته می تواند باعث کاهش نرخ حفاری، افزایش تعداد لوله بالا/پایین و در نتیجه افزایش زمان و هزینه حفاری گردد.

روش سنتی برای ارزیابی عملیات حفاری مقایسه نتایج واقعی کار با داده های چاه های پیشین است که این روش در میداین قدیمی و شناخته شده و برای بررسی کوتاه مدت عملکرد در میداین شناخته شده و قدیمی ایده ال است ولی فاقد مدل فیزیکی جهت ارائه یک استاندارد مطلق و فنی برای بررسی بازده عملیات است. محققان مختلف مدل هایی را ارائه نموده اند که در آن ها حفاری به عنوان یک سیستم مکانیکی دارای تعادل انرژی در نظر گرفته شده است (Pessier, et al., 1992). انرژی ویژه مکانیکی و نرخ نفوذ دو فاکتور کلیدی در ارزیابی بازده عملیات حفاری هستند و به همراه هم یک مبنای مناسب برای برنامه ریزی یک عملیات خوب را تشکیل می دهند (Zhou, et al., 2012).

انرژی ویژه مکانیکی فرآیند پیچیده تخریب سنگ را به صورت عددی نشان می دهد که خود به عوامل متعددی چون نوع و خواص سنگ، نوع و طراحی مته حفاری و همچنین فشار وارد بر سطح سنگ وابسته است. در حفاری دورانی انرژی ویژه به کار انجام شده جهت برش یک واحد حجمی

سنگ اطلاق می شود در حالی که در حفاری ضربه ای انرژی ویژه با در نظر گرفتن مساحت سنگ شکسته شده و سنگ باقی مانده از عملیات ضربه زدن، محاسبه می شود (Shewalla, et al., 2015).

فاکتور اولیه در انتخاب مته حفاری خصوصیات مکانیکی سنگ (مقاومت و سختی سنگ) می باشد لذا با آگاه بودن از خواص مقاومتی سنگ می توان آگاهانه و علمی مناسب ترین مته را جهت کسب بهترین نتیجه انتخاب نمود. خواص مکانیکی سنگ از روش های آزمایشگاهی یا نمودارهای پتروفیزیکی به دست می آیند که متأسفانه این داده ها در همه چاه ها و یا در همه قسمت های یک چاه (به خصوص در قسمت های بالایی چاه^۱) موجود نمی باشند که بهینه سازی فرآیند انتخاب مته را با مشکل مواجه می کند.

در این فصل سعی بر آن است با مطالعه داده های حفاری و پتروفیزیکی موجود، وجود یا عدم وجود هرگونه ارتباط بین انرژی ویژه مکانیکی (به عنوان نماینده داده های حفاری) و خواص مکانیکی سنگ، در محدوده ای از چاه که نمودارهای پتروفیزیکی موجود هستند، را بررسی نمود. سپس در صورت اثبات وجود ارتباط، از رابطه به دست آمده جهت پیش بینی خواص سنگ در چاه دیگر استفاده نمود و در نهایت بر اساس این خواص بهینه ترین عملیات حفاری را انجام داد. در قسمت بعد در اولین مرحله داده های حفاری دو چاه جمع آوری و انرژی ویژه مکانیکی برای هر دو چاه محاسبه می شود.

۴-۲ محاسبه انرژی ویژه مکانیکی

انرژی ویژه مکانیکی به دو روش بیان می شود:

۱- انرژی مورد نیاز جهت جدا کردن یک واحد حجمی از سنگ (Teale, 1965)

۲- انرژی مورد نیاز جهت ایجاد یک سطح جدید (Paithankar, et al., 1976)

^۱ Top Hole

بسیاری محققان دیگر (Reddish, et al., 1996; Hamrick, 2011) نیز انرژی ویژه مکانیکی را با جدا کردن قسمتی از سنگ مرتبط دانسته اند، لذا در این تحقیق از رابطه تیله (۶-۲) جهت محاسبه مقدار انرژی ویژه مکانیکی در چاه های مورد نظر استفاده شده است.

داده های حفاری در عملیات حفاری توسط گروه نمودارگیری گل^۱ ثبت می شوند. تکنولوژی نمودارگیری گل یک تکنیک جامع بر اساس زمین شناسی نفت، مهندسی نفت و اطلاعات است که با استفاده از انواع سنسورها وظیفه کسب، پردازش، ذخیره سازی، ارسال و توزیع داده ها را در محل حفاری چاه بر عهده دارد. مهمترین پارامترهای ثبت شده توسط این واحد شامل این موارد می باشند: فشار، دبی گل ورودی به و خروجی از چاه^۲، چگالی گل، نرخ نفوذ، وزن روی مته، سرعت دوران رشته حفاری، حجم و نوع گاز موجود در گل خروجی از چاه، گشتاور وارد بر رشته حفاری، دمای گل خروجی. همچنین پرسنل این واحد با تحلیل کننده های حفاری در امر سنگ شناسی سازند ها و تشخیص وجود سیال هیدروکربنی در سازند حفاری شده نیز فعالیت می کنند. شکل ۱-۴ نمونه ای از داده های ثبت شده پارامترهای حفاری در یکی از چاه های مورد مطالعه را نشان می دهد.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	depth	rop	wob	rpm_bit	torque	pump_pressure	flow_in	c_total	lagtime	mudweight_in
	[m]	[min/m]	[klbf]	[RPM]	[klbf.ft]	[psi]	[gal/min]	[ppm]	[min]	[PCF]
3739	3884.000	87.8	14.5	106	3	2053.3	178	4490.0	109.4	97.44
3740	3885.000	85.4	13.5	110	3	2069.7	178	4070.0	107.1	97.35
3741	3886.000	49.6	10.6	110	3	2029.1	182	4070.0	108.2	97.39
3742	3887.000	130.3	12.1	110	3	2021.3	182	3990.0	107.7	97.20
3743	3888.000	59.6	12.4	108	3	2282.2	186	3920.0	100.8	97.03
3744	3889.000	26.1	12.9	102	4	2258.7	196	3920.0	99.9	96.97
3745	3890.000	49.1	8.1	102	3	2085.4	187	3490.0	106.5	96.82
3746	3891.000	44.6	12.0	102	3	2064.1	184	3460.0	107.6	96.92
3747	3892.000	37.7	11.9	102	3	2062.3	184	3380.0	105.6	97.00
3748	3893.000	40.1	9.9	102	3	2063.2	184	3530.0	108.0	96.94
3749	3894.000	62.0	12.6	102	3	2052.9	184	3420.0	106.7	96.76
3750	3895.000	47.9	12.7	102	3	2052.7	184	3530.0	106.4	96.63
3751	3896.000	63.0	11.6	102	3	2043.3	184	3460.0	105.2	96.49
3752	3897.000	30.4	10.2	102	3	2068.5	184	3460.0	106.8	94.58
3753	3898.000	35.2	9.7	102	3	2083.8	184	3190.0	106.4	95.63
3754	3899.000	40.5	9.8	102	3	2037.1	184	3420.0	107.6	97.54
3755	3900.000	51.7	9.1	102	3	2030.7	182	3300.0	107.8	97.84
3756	3901.000	42.1	11.2	100	3	2092.8	182	3110.0	105.9	95.95
3757	3902.000	35.3	9.5	100	3	2052.7	183	3150.0	105.3	96.46
3758	3903.000	32.1	9.7	100	3	2031.8	185	3110.0	104.8	96.98
3759	3904.000	31.2	9.4	100	3	1981.7	186	3150.0	104.6	96.89
3760	3905.000	31.2	7.5	100	3	1989.5	187	3260.0	104.0	96.72
3761	3906.000	36.9	8.5	100	3	1982.2	187	3190.0	103.8	96.66
3762	3907.000	30.9	11.2	100	3	1992.6	187	3190.0	104.0	96.89
3763	3908.000	33.9	10.3	100	4	2002.0	187	3150.0	105.1	97.11
3764	3909.000	38.9	9.9	100	4	1966.0	187	3100.0	106.0	97.34

شکل ۱-۴ پارامترهای حفاری ثبت شده توسط واحد نمودارگیری گل در یکی از چاه های مورد مطالعه

^۱ Mud Logging

^۲ Mud Flow in & Mud Flow out

بر اساس رابطه تیله، جهت محاسبه انرژی ویژه مکانیکی به پارامترهای وزن روی مته، گشتاور، نرخ نفوذ و سرعت دوران رشته نیاز می باشد. با توجه به اینکه سنسورها به طور لحظه ای و دیجیتالی در حال ثبت داده ها می باشند لذا در داده های جمع آوری شده مقادیری مشاهده می شوند که غیر قابل قبول و باید از محاسبات خارج گردند. به طور مثال در اثر نوسانات محوری رشته، در مقادیر وزن روی مته، گاهی با اعدادی برخورد می شود که بسیار بزرگتر از حداکثر مقدار قابل اعمال مجاز (با توجه به محدودیت های موجود نسبت به اندازه و نوع مته و همچنین طول لوله های وزنه) هستند. وجود این داده ها باعث می شوند که مقدار انرژی مکانیکی ویژه نیز افزایش قابل توجهی یابد. لذا لازم است این گونه مقادیر به عنوان داده نامتجانس از محاسبات حذف شوند.

همچنین در زمان هایی نیز به دلیل مشکلات فنی موجود (خرابی پمپ های گل) حفار ناچار به کاهش مقدار دبی پمپاژ گل حفاری شده است که این کاهش دبی باعث کاهش تمیزسازی چاه، دوباره خرد کردن کنده ها، کاهش نرخ حفاری و در نتیجه افزایش انرژی ویژه مکانیکی در آن مقطع زمانی می شود لذا باید با انطباق داده های ثبت شده با گزارشات حفاری این گونه داده ها نیز اصلاح یا حذف شوند تا از ایجاد خطا در محاسبات جلوگیری شود.

۳-۴ معرفی چاه ها و تحلیل کیفی داده ها

در این تحقیق از داده های حفاری دو چاه A و B جهت بررسی انرژی ویژه مکانیکی استفاده شده است. هر دو چاه تا عمق ۳۹۱۵ متری (درون سازند گدوان) حفاری شده اند. با توجه به وجود داده های پتروفیزیکی در اعماق خاصی از چاه ها، لایه سروک به عنوان سازند مورد نظر جهت بررسی انتخاب شد زیرا اولاً مهمترین مخزن میدان است و همچنین تمامی داده های مورد نیاز (نتایج مغزه گیری، داده های حفاری و نگاره های پتروفیزیکی) برای این سازند موجود می باشد. در جدول ۴-۱ اطلاعات مربوط به دو چاه A و B قابل مشاهده است. بازه مورد بررسی در این تحقیق در هر دو چاه از عمق ۲۹۸۰ تا عمق ۳۳۰۰ متری می باشد.

جدول ۴-۱ مشخصات چاه های مورد بررسی

چاه B	چاه A	ردیف
۳۹۱۵	۳۹۱۵	عمق نهایی چاه (متر)
۸,۵	۸,۵	قطر مته جهت حفاری سازند سروک (اینچ)
PDC	PDC	نوع مته مورد استفاده
۲۷۱۳	۲۷۰۷	عمق ابتدای سازند سروک (متر حفار)
KCl-Polymer / 74-81 PCF	Ultra-inhibit fluid /75-85.5 PCF	نوع و وزن گل مورد استفاده
سنگ آهک	سنگ آهک	لیتولوژی
ندارد	دارد	مغزه گیری

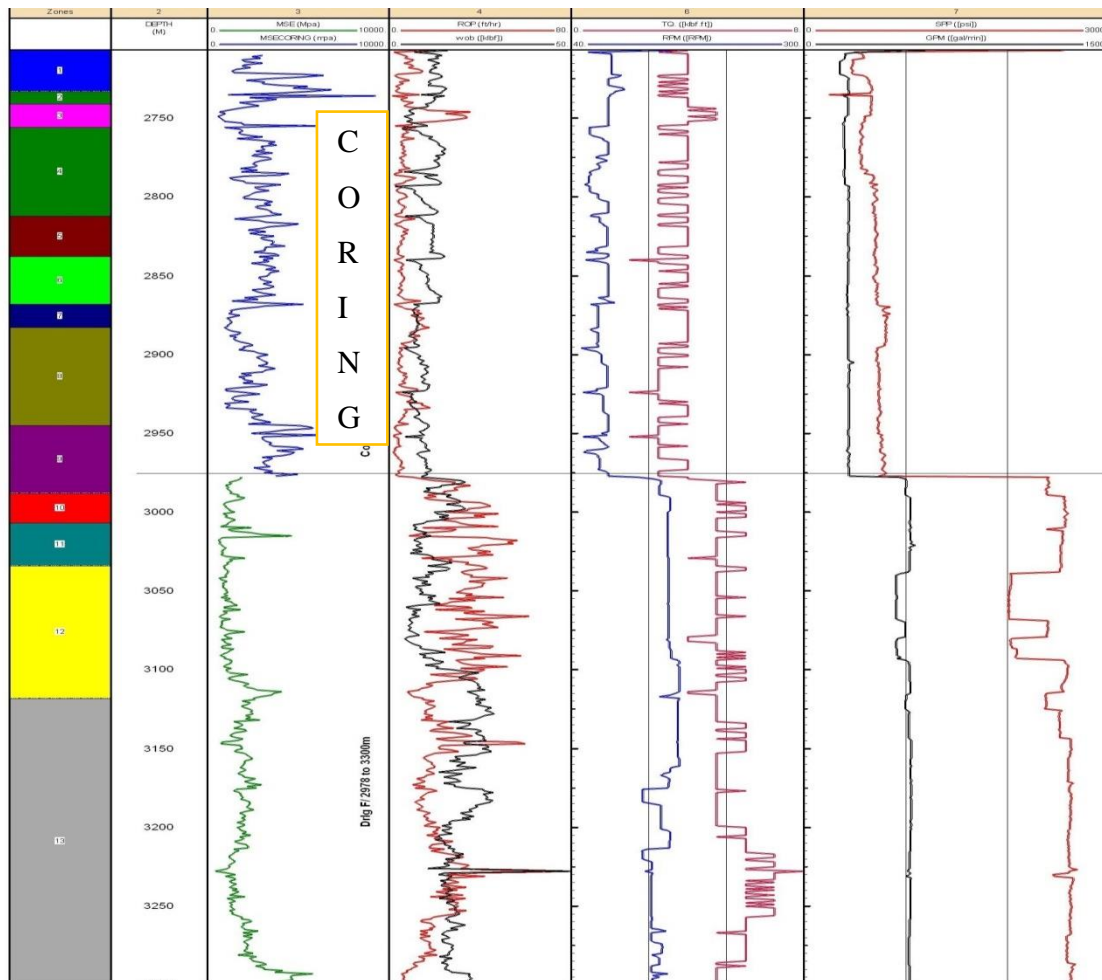
علاوه بر وجود داده های کافی دلیل دیگر انتخاب این دو چاه جهت بررسی موضوع تحقیق نزدیکی موقعیت مکانی و تشابه شرایط زمین شناسی و عملیات حفاری دو چاه می باشد که وجود این تشابهات در جهت قطعیت بخشیدن به نتایج تحقیق کمک موثری خواهد بود.

پیش از وارد شدن به مبحث تحلیل عددی و کمی داده ها، نگاه کلی و توصیفی به داده های موجود و بررسی روند تغییرات و تاثیرات متقابل پارامترها می تواند سرنخ مناسبی جهت شروع بررسی عددی باشد.

در شکل ۴-۲ پارامترهای عملیاتی مورد استفاده جهت حفاری سازند سروک در چاه A به صورت گرافیکی نشان داده شده است. همچنین با استفاده از پارامترهای ثبت شده مقدار انرژی ویژه مکانیکی نیز محاسبه و نمودار آن رسم شده است. ستون های نمودار به ترتیب شامل: زون های سازند، عمق، انرژی ویژه مکانیکی، نرخ حفاری و وزن روی مته، گشتاور و سرعت دوران رشته، دبی و فشار پمپاژ گل می باشد.

همان طور که شکل زیر نشان می دهد عملیات حفاری به دو بخش مغزه گیری و حفاری

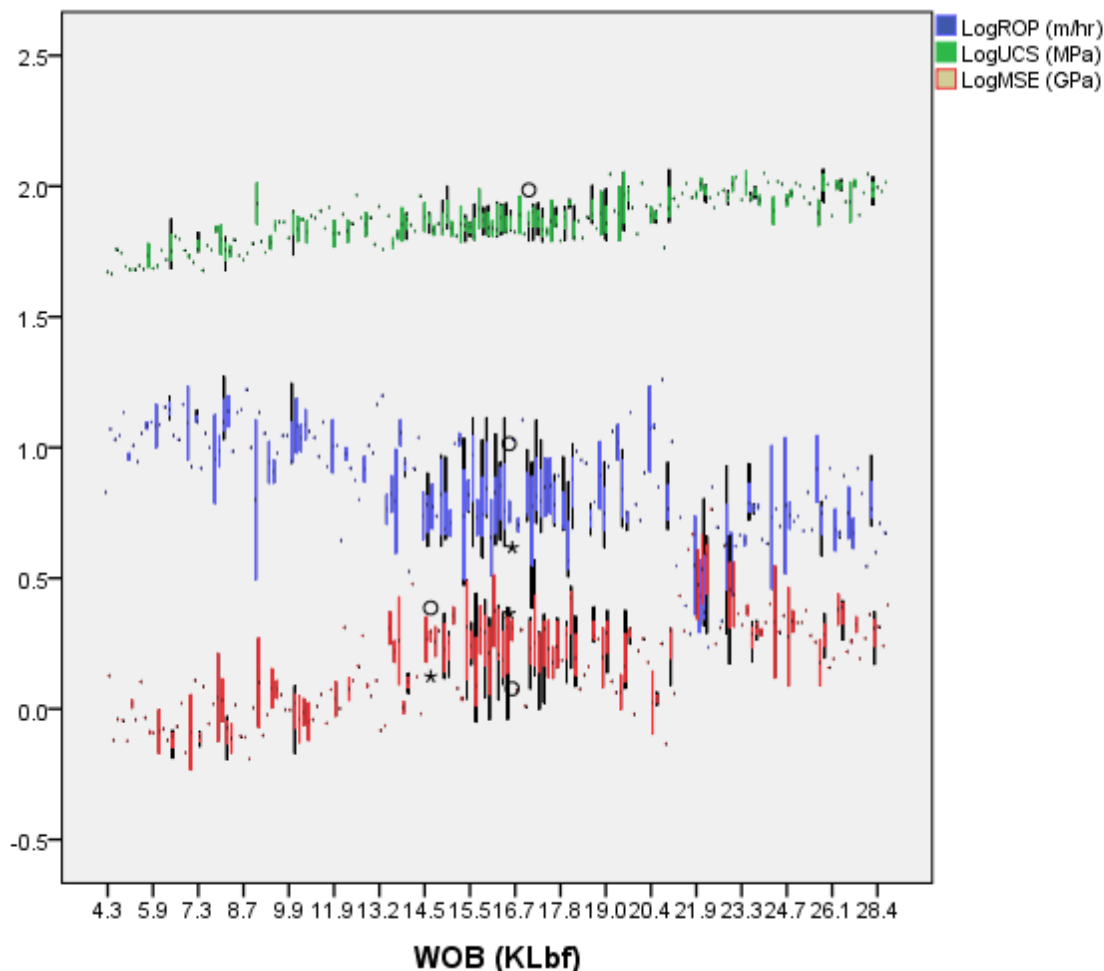
معمولی یا حفاری کارآمد^۱ (که در آن هدف افزایش نرخ حفاری و کاهش بهینه زمان و هزینه حفاری است) در لایه سروک این چاه تقسیم، که از عمق ۲۷۰۷ تا ۲۹۷۷ متری عملیات مغزه گیری انجام شده است. به دلیل حساسیت عملیات مغزه گیری و ریسک بالای به وجود آمدن مشکلاتی همچون گیر رشته، بریدن رشته و کم شدن کیفیت مغزه های حاصل، پارامترهای حفاری اعمال شده در این عملیات به صورت کنترلی و کاملاً محافظه کارانه می باشد. نتیجه این عملیات کنترلی کاهش شدید نرخ حفاری و در نتیجه افزایش مقدار انرژی ویژه مکانیکی است. لذا بررسی پارامترها در دو بخش مجزا صورت می گیرد.



شکل ۲-۴ پارامترهای حفاری در چاه A

^۱ Performance Drilling

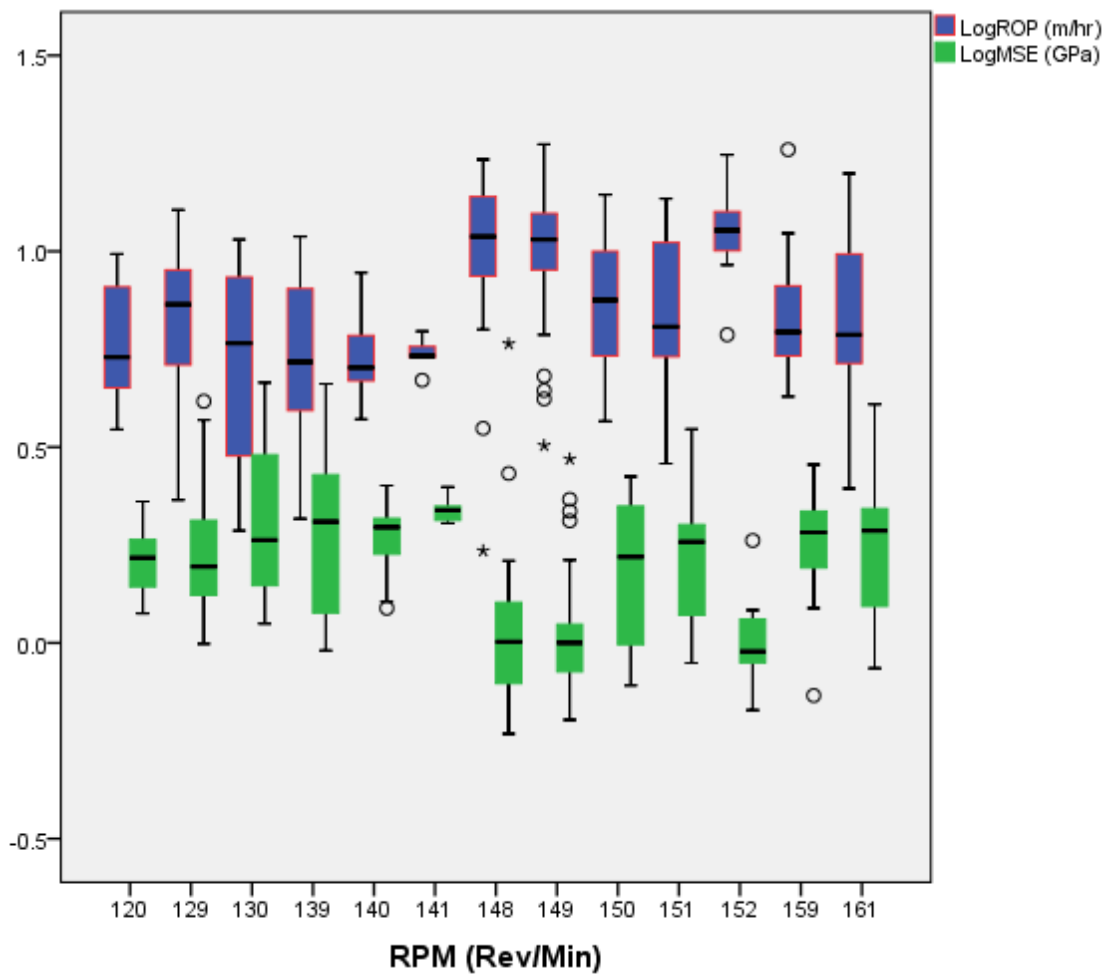
با بررسی همزمان پارامترهای وزن روی مته، نرخ حفاری، مقاومت تراکمی سنگ و انرژی ویژه (شکل ۳-۴) مشخص می شود که در مقادیر وزن روی مته ۱۳-۱۸ کیلو پوند نرخ حفاری و انرژی ویژه تقریباً مقادیر ثابتی داشته است. لذا اعمال وزن های بالا در این محدوده بدون هیچگونه افزایش بازدهی می باشد و اعمال وزن بیشتر باعث فرسایش بیشتر مته نیز می شود. همچنین مشخص است که با اعمال وزن ۱۸-۲۰ کیلو پوند نرخ حفاری تا حد زیادی افزایش یافته و متعاقب آن انرژی ویژه نیز کاهش یافته است. با بررسی مقاطعی که با این محدوده وزنی و ثابت ماندن دیگر پارامترها حفاری شده است مشخص می شود وزن روی مته در این محدوده عامل اصلی افزایش نرخ حفاری می باشد و شرایط حفاری در این محدوده وزنی بهینه می شود. نکته قابل توجه کاهش شدید نرخ حفاری و افزایش ناگهانی انرژی ویژه در هنگام اعمال بیش از ۲۰ کیلو پوند وزن بر روی مته است. با بررسی داده ها مشخص می گردد زمانی حفار اقدام به افزایش وزن روی مته نموده است که با کاهش نرخ حفاری (به دلیل افزایش مقاومت تراکمی سنگ) مواجه شده است. لذا سعی در افزایش نرخ حفاری با اعمال وزن بیشتر نموده است که به دلیل مناسب نبودن پارامترهای اعمالی، گشتاور وارد به رشته نیز افزایش یافته و این گشتاور با کاهش ناگهانی سرعت دوران رشته و نرخ حفاری همراه است. بدترین شرایط حفاری در محدوده وزنی ۲۰-۲۲ کیلو پوند مشاهده می شود که نشان از ناکافی بودن وزن روی مته جهت غلبه بر مقاومت سنگ دارد. نکته مهم دیگر مقادیر متوسط و نسبتاً بالای نرخ حفاری هنگام اعمال وزن روی مته با مقادیر کمتر از ۱۳ کیلوپوند است که آن هم به دلیل کاهش مقاومت تراکمی سنگ در این مقاطع است که نشان از اهمیت فوق العاده زیاد مقاومت تراکمی در فرآیند اندرکنش سنگ و مته دارد.



شکل ۳-۴ تغییرات انرژی ویژه، نرخ حفاری و مقاومت تراکمی نسبت به وزن روی مته

بر خلاف وزن روی مته یافتن شرایط بهینه سرعت دوران رشته (یا مته) نیاز به برنامه ریزی بیشتری دارد. یعنی جهت یافتن سرعت دوران بهینه باید وزن روی مته را ثابت نگه داشته سپس با تغییر سرعت دوران و ثبت تغییرات نرخ حفاری و انرژی ویژه سرعت دوران بهینه که در آن افزایش نرخ حفاری با کاهش قابل قبول انرژی ویژه همراه است را به دست آورد. زیرا همان طور که در شکل ۴-۴ قابل مشاهده است رابطه معناداری میان افزایش سرعت دوران و تغییرات نرخ حفاری و انرژی ویژه وجود ندارد. سرعت دوران بهینه به وزن روی مته وابستگی مستقیم دارد. زیرا هنگام افزایش سرعت دورانی ممکن است مقدار زیادی از انرژی وارد شده به صورت ارتعاشات و ضربات ناگهانی به رشته تلف شده و در نتیجه باعث آسیب دیدن به مته، رشته و دستگاه حفاری و افزایش گشتاور و در نتیجه افزایش انرژی ویژه مکانیکی شود که باعث ناموجه شدن افزایش نرخ حفاری حاصل گردد. پس

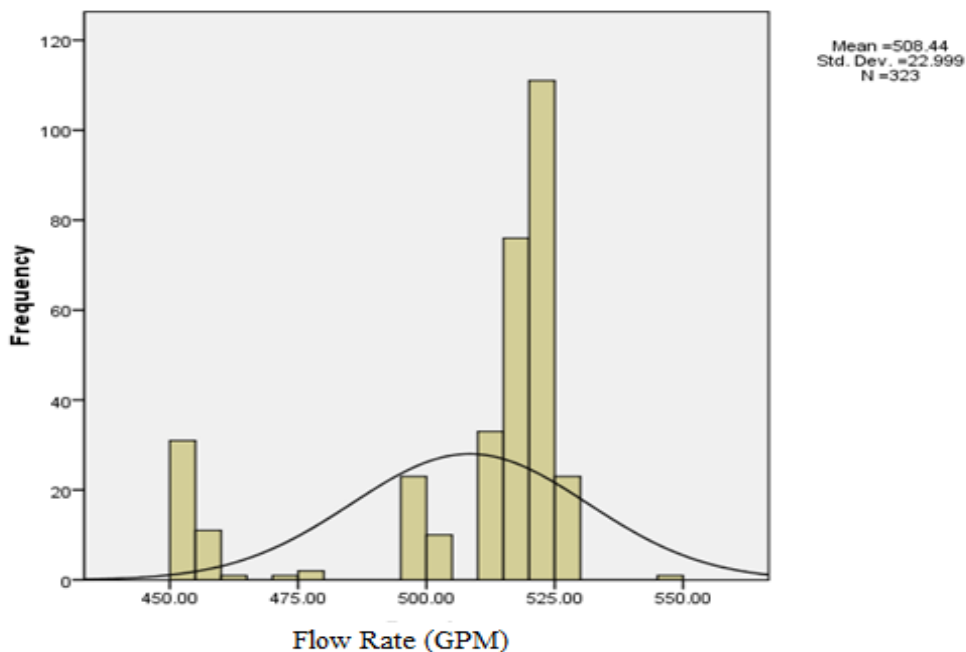
در این مورد مقادیر بالای سرعت دوران رشته و نرخ حفاری شرایط بهینه نیستند.



شکل ۴-۴ تغییرات نرخ حفاری و انرژی ویژه نسبت به سرعت دوران رشته

همان طور که در فصل دوم اشاره شد هیدرولیک حفاری به عنوان قلب عملیات حفاری شناخته می شود و از طریق نیروی جت وارده، خارج سازی کنده های حفاری شده زیر مته و انتقال کنده ها به بیرون از چاه باعث افزایش سرعت حفاری می گردد. در مقطع مورد بررسی در چاه مورد نظر دبی پمپاژ گل حفاری تقریباً ثابت بوده است و در صورت تغییر دبی گل، همزمان دیگر پارامترها نیز توسط حفار دچار تغییر شده اند که امکان بررسی تاثیر مستقل هیدرولیک حفاری بر روی نرخ حفاری و انرژی ویژه ممکن نیست. در شکل ۴-۵ نمودار فراوانی دبی پمپاژ در بازه مورد بررسی را مشاهده می

شود. همان طور که پیش از این ذکر شد اغلب طول بازه با دبی ثابت ۵۲۰ گالن بر دقیقه (GPM)^۱ حفاری شده است.



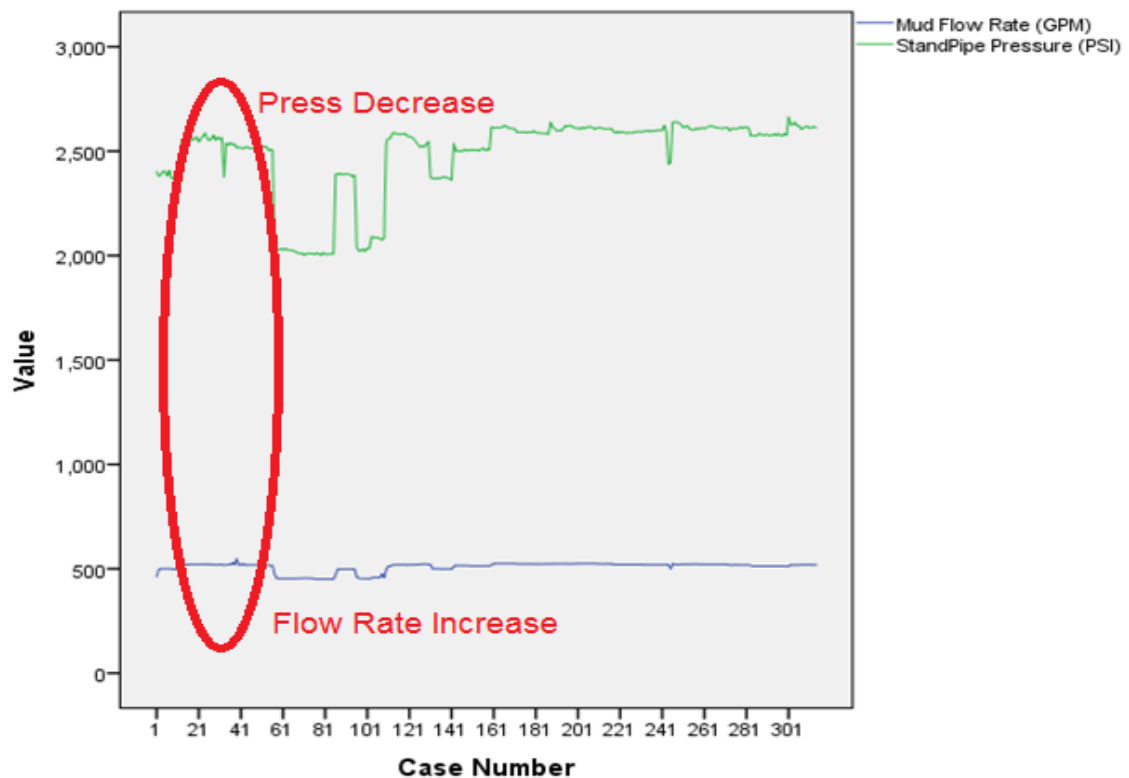
شکل ۴-۵ نمودار هیستوگرام مقادیر دبی پمپاژ گل

نکته مهمی که در بررسی و مقایسه دبی پمپاژ گل و فشار پمپاژ (یا فشار لوله قائم^۲) مشخص می شود عدم تطابق دبی با فشار پمپاژ است که یکی از عمده دلایل آن کاهش بازدهی پمپ به دلیل خرابی پیستون های آن می باشد که در صورتی که تصور می شود دبی پمپاژ ثابت است ولی در واقعیت گل کمتری پمپ می شود در نتیجه فشار پمپاژ کاهش می یابد. دیگر دلایل این اتفاق مواردی چون جریان یافتن سیال سازند به درون چاه، سوراخ شدن رشته حفاری و مواجهه ناگهانی با سازند متخلخل و سست می باشد.

شکل ۴-۶ به وضوح اختلاف روند تغییر فشار نسبت به دبی پمپاژ را در نقاط خاص (رفتار متناقض آنها) نشان می دهد که با وجود افزایش دبی پمپاژ گل، فشار پمپاژ کاهش یافته است.

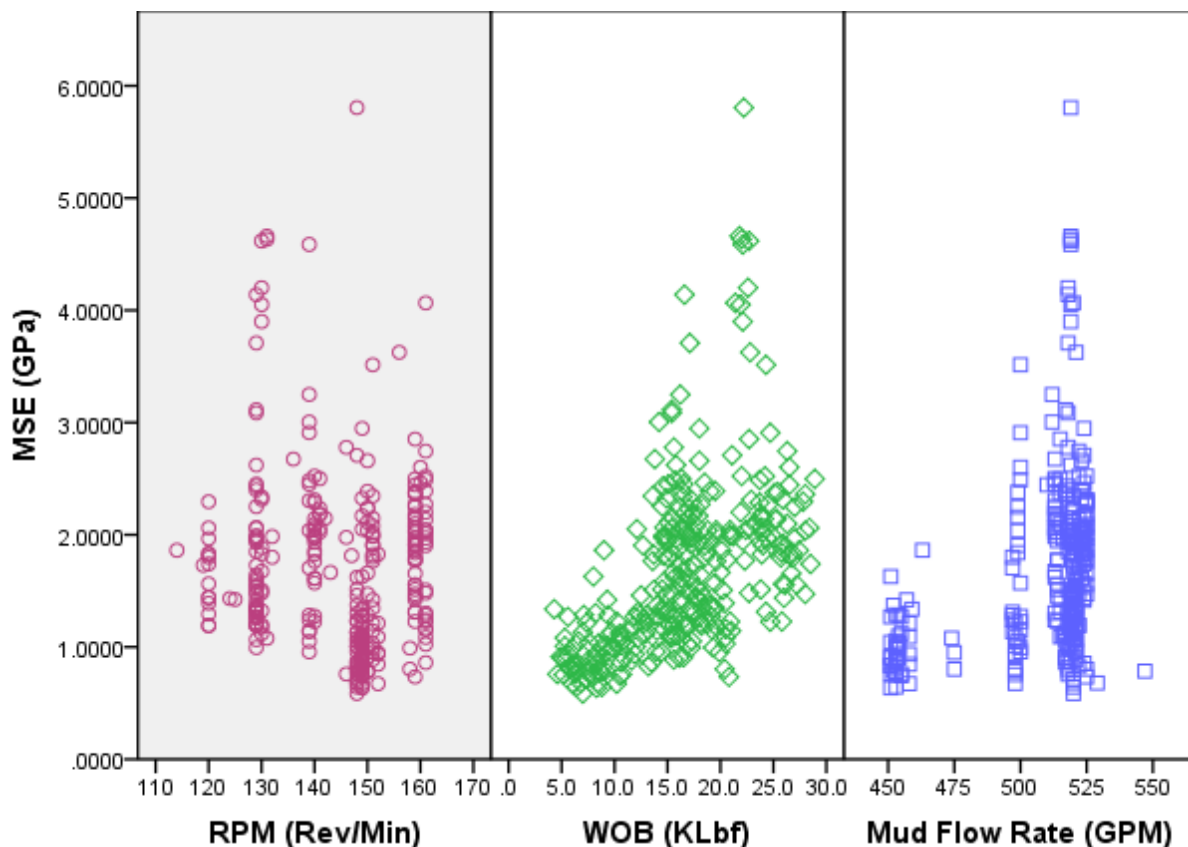
^۱ Gallon Per Minute

^۲ Standpipe Pressure



شکل ۴-۶ کاهش فشار و افزایش دبی پمپاژ به دلیل نامشخص

در شکل ۴-۷ به طور همزمان تغییرات انرژی ویژه را همراه با تغییرات پارامترهای وزن روی مته، سرعت دوران مته و دبی پمپاژ گل مشاهده می شود. همان طور که شکل نشان می دهد به دلیل استفاده مداوم از یک دبی خاص یا سرعت دوران ثابت در اکثر مواقع، تغییرات انرژی ویژه بیشتر به وزن روی مته وابستگی نشان می دهد. زیرا وزن روی مته پارامتری است که بیشترین تغییرات را دارد.



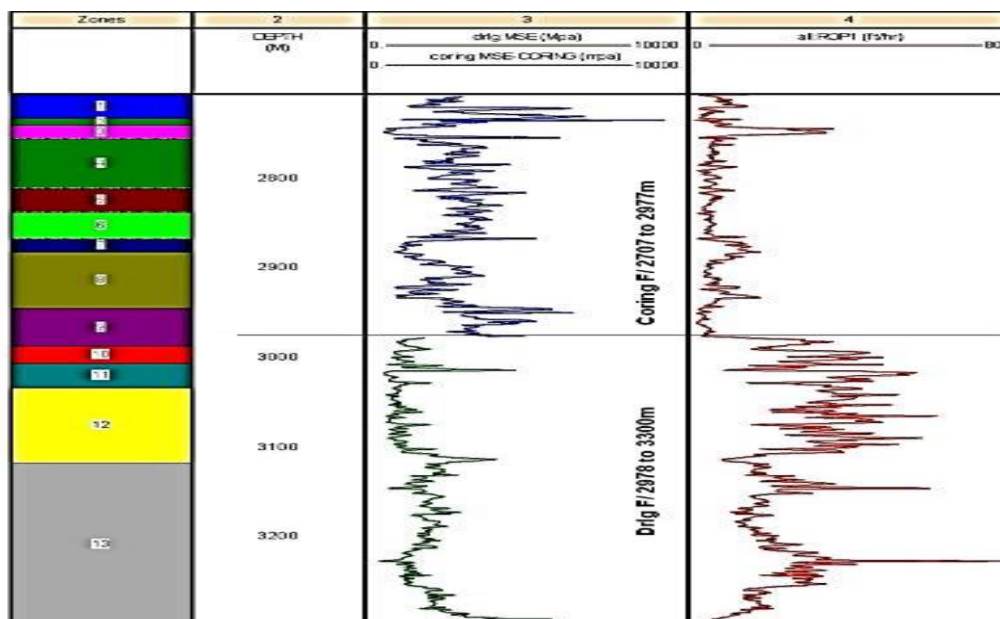
شکل ۴-۷ تغییرات انرژی ویژه نسبت به پارامترهای حفاری سرعت دوران رشته، وزن روی مته و دبی پمپاژ گل

حفاری چاه از عمق ۲۷۰۷ تا ۲۹۷۷ متری با استفاده از مته و رشته مغزه گیری انجام شده است. به دلایلی که در قسمت قبل ذکر شد در عملیات مغزه گیری هدف دیگر بالا بردن نرخ حفاری نیست بلکه پرسنل عملیات در تلاشند با کنترل پارامترها و اعمال پارامترهای حداقلی (جدول ۴-۲) خطر بریدن رشته را کاهش داده و حداکثر طول ممکن مغزه را کسب کنند. جدول ۴-۲ مقایسه پارامترهای حفاری اعمال شده در دو مقطع مختلف حفاری کارآمد و مغزه گیری چاه A را نشان می دهد. به دلیل اعمال همین پارامترهای حداقلی نرخ حفاری بسیار پایین و در نتیجه مقادیر انرژی ویژه بزرگتر می شود.

جدول ۴-۲ مقایسه پارامترهای حفاری کارآمد و مغزه گیری

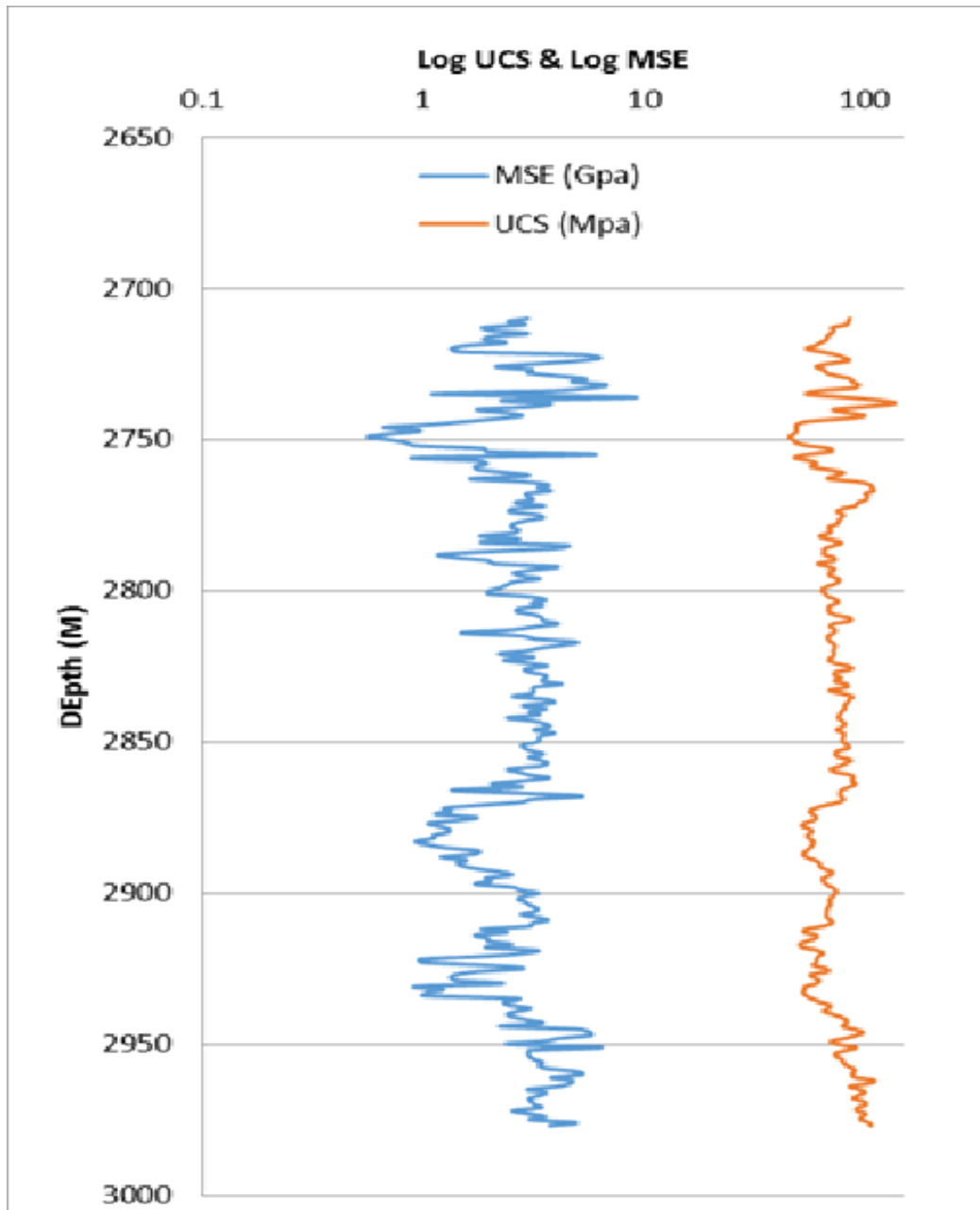
حفاری معمولی	مغزه گیری	پارامتر
افزایش نرخ حفاری	افزایش کیفیت مغزه	هدف عملیات
۳۳۰۰-۲۹۷۸	۲۹۷۷-۲۷۰۷	عمق (متر)
سروک	سروک	سازند
۳۰-۴	۱۳-۴	وزن روی مته (Klbs)
۱۶۰-۱۲۰	۸۰	سرعت دوران رشته (RPM)
۵۳۰-۴۵۰	۲۲۰	دبی پمپاژ گل (GPM)
۸-۵	۴-۳	گشتاور وراد به رشته (KLbf.ft)
۴۰-۷	۷-۳	نرخ نفوذ (ft/hr)

در شکل ۴-۸ مقایسه مقادیر انرژی ویژه و نرخ حفاری در حالت کارآمد و مغزه گیری تغییرات انرژی ویژه در ستون سوم و نرخ نفوذ حفاری در ستون چهارم کاملاً مشخص است و مرز قابل تشخیصی از عمق ۲۹۷۷ متری بین دو نوع عملیات ایجاد شده است.



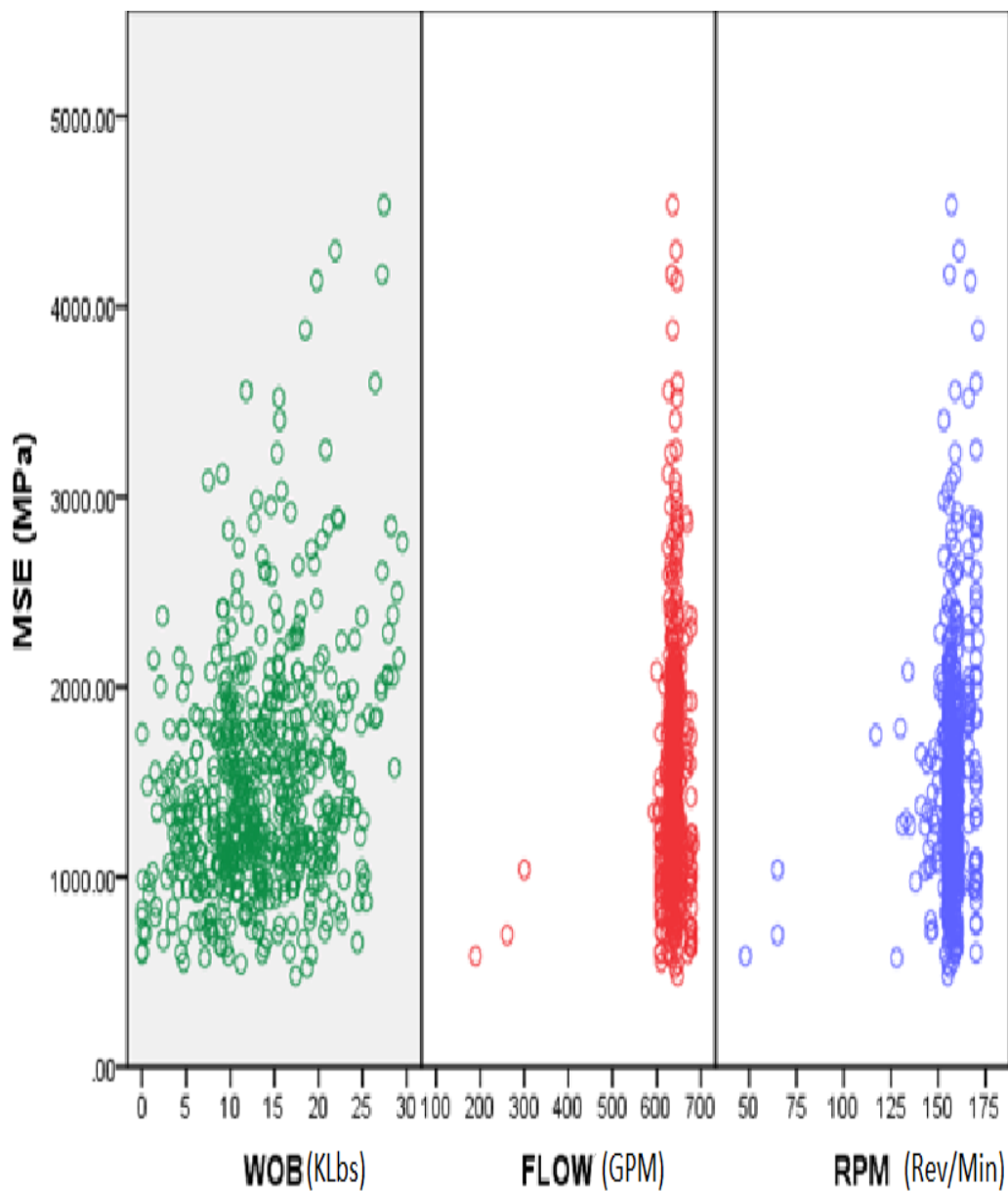
شکل ۴-۸ مقایسه مقادیر انرژی ویژه و نرخ حفاری در حالت کارآمد و مغزه گیری

در حفاری مغزه گیری با رسم نمودارهای انرژی ویژه و مقاومت فشاری تک محوره منطبق بودن تغییرات انرژی ویژه بر تغییرات مقاومت تراکمی کاملاً مشهود است که این ایده را در ذهن القامی کند که در حفاری مغزه عامل اصلی کنترل کننده شرایط حفاری خواص مکانیکی سنگ و به خصوص مقاومت تراکمی سنگ است (شکل ۹-۴).

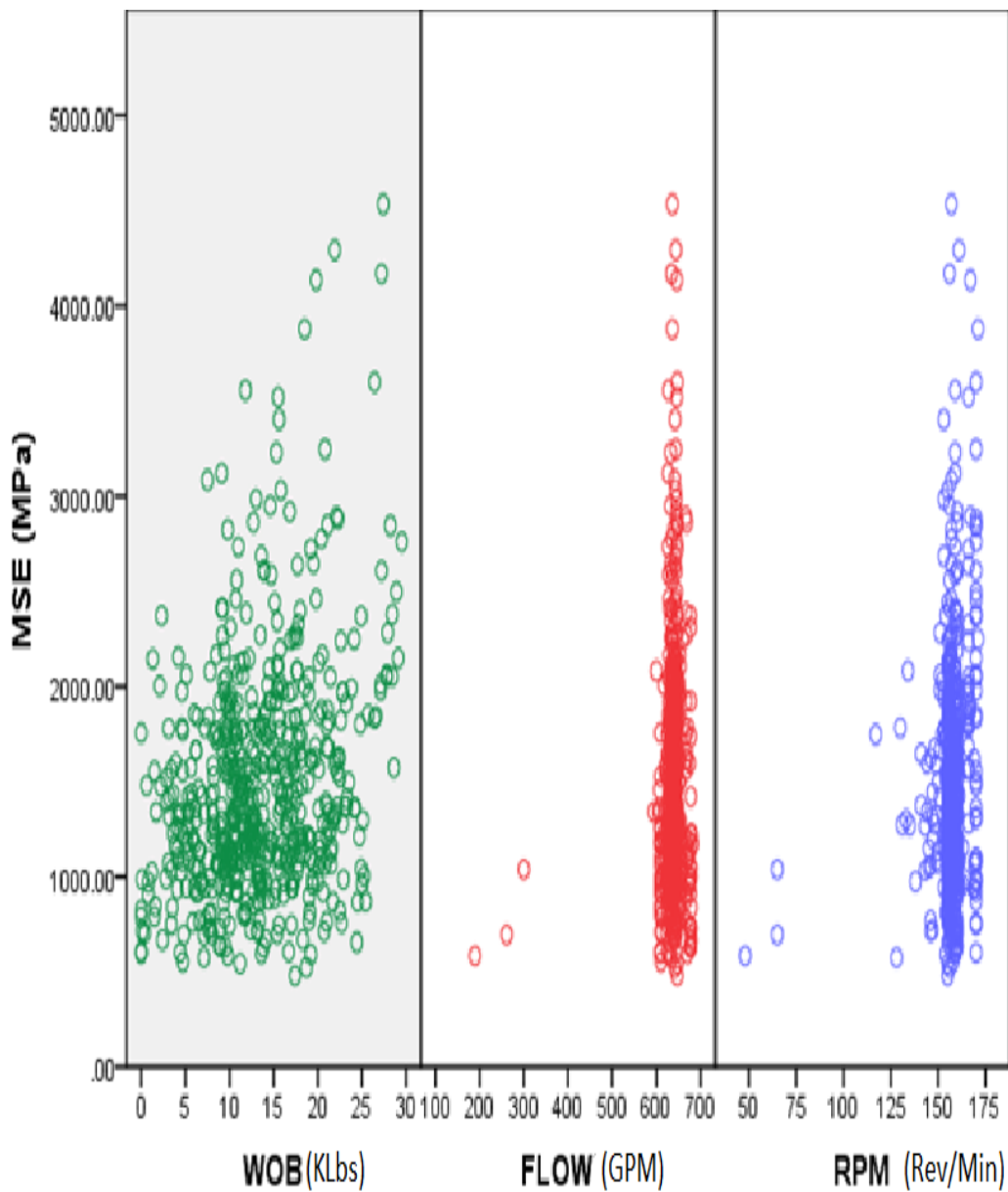


شکل ۹-۴ انطباق پذیری تغییرات انرژی ویژه و مقاومت تراکمی سنگ نسبت به عمق در حفاری مغزه گیری چاه

A



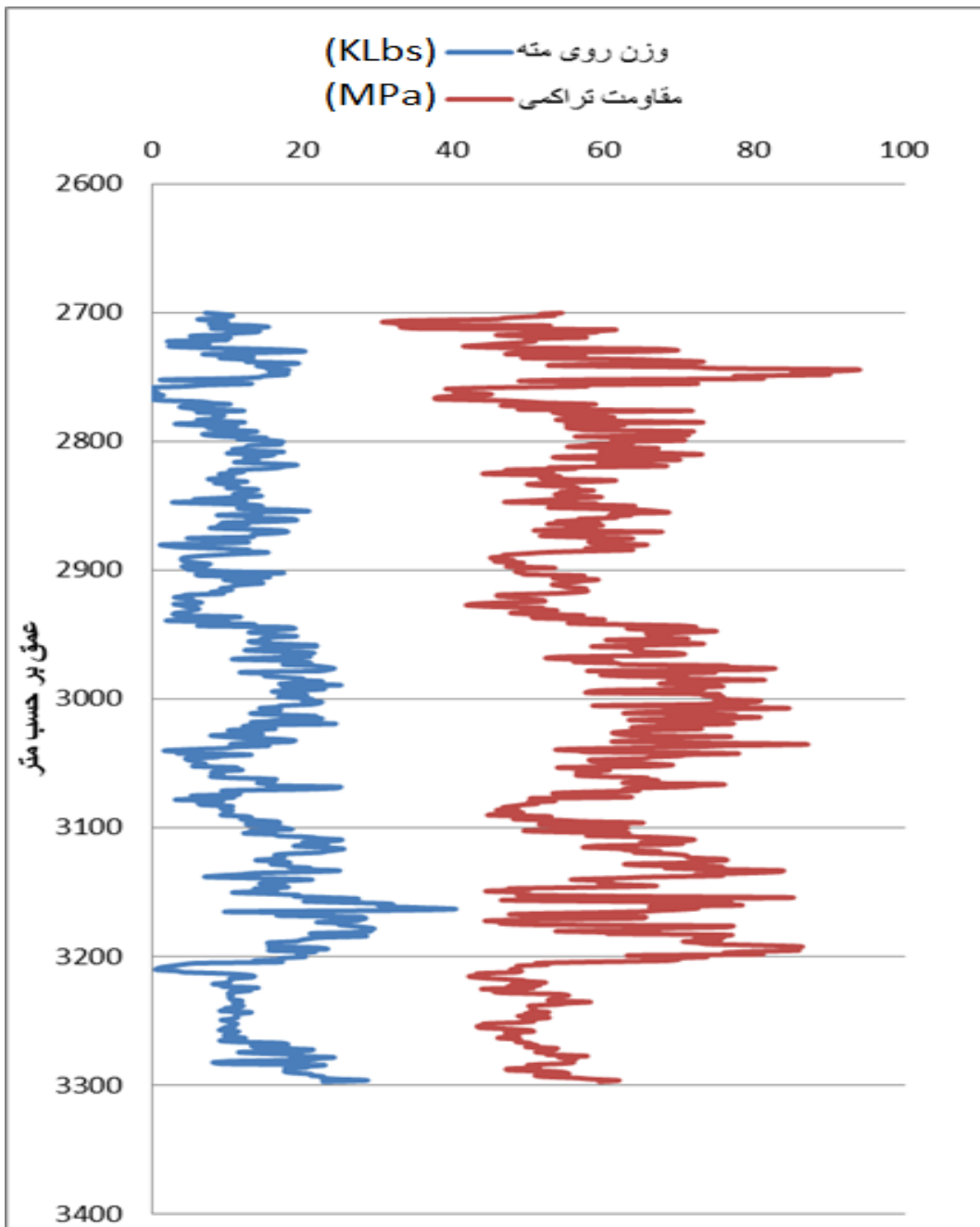
شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ نمودارهای مربوط به بحث تحلیل کیفی داده ها در چاه B را نشان می دهند. لازم به ذکر است تمامی موارد مربوط به چاه B مشابه نتیجه گیری های قسمت حفاری کارآمد چاه A می باشد که از تکرار آنها خودداری می شود.



شکل ۴-۱۰ تغییرات انرژی ویژه نسبت به پارامترهای حفاری در چاه B

در شکل زیر نیز متناسب بودن تغییرات وزن اعمالی روی مته با مقاومت تراکمی سنگ در چاه B

قابل ملاحظه است.



شکل ۴-۱۱ متناسب بودن وزن روی مته با تغییرات مقاومت تراکمی سنگ با افزایش عمق در چاه B

۴-۴ بررسی عددی ارتباط انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی

همانطور که گفته شد می توان با استفاده از روابط الاستیسیته پارامترهای ژئومکانیک را تخمین

زد و در نهایت با کمک آزمایشات مخرب، تخمین مورد نظر را کالیبره کرد. به دست آوردن پارامترهای

ژئومکانیک، بدلیل عدم وجود نگار های چاه پیمایی، در همه لایه های حفاری امکانپذیر نیست و نمی توان مطالعات ژئومکانیکی در لایه های غیر مخزنی از قبیل بررسی پوش سنگ در هنگام تزریق سیال، مچاله شدگی لوله جداری و غیره انجام داد. یکی از پارامتر ها جهت محاسبه انرژی ویژه مکانیکی، سرعت حفاری است. در سال ۲۰۰۳ بررسی قهرمان و همکاران^۱ نشان داد که بین سرعت حفاری در معادن و پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ، مقاومت کششی تک محوره، مقاومت کششی برزیلی و غیره روابط منطقی برقرار است که در زیر آورده شده است (Kahraman, et al.):

$$ROP = -0.0079 UCS + 1.67 \quad R= 0.97 \quad (4-1)$$

$$ROP = -0.083 \sigma_t + 1.67 \quad R= 0.67 \quad (4-2)$$

$$ROP = -7 \times 10^{-5} E + 1.61 \quad R= 0.6 \quad (4-3)$$

در روابط فوق ROP بر حسب متر بر دقیقه، E مدول یانگ بر حسب مگا پاسکال، σ_t مقاومت کششی تک محوره و مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال است.

آرمنتا^۲ در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد کرد که هیدرولیک یکی از پارامتر های مهم در انرژی ویژه مکانیکی است که با تصحیح انرژی ویژه مکانیکی با هیدرولیک آن را انرژی ویژه حفاری^۳ نامید که به صورت زیر تعریف می شود (Armenta):

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \times \pi \times RPM \times TQ}{A_B \times ROP} - \frac{1980000 \times HF \times HP}{ROP \times A_B} \quad (4-4)$$

که در معادله فوق DSE بر حسب پوند-فوت بر فوت مکعب، HF فاکتور بی بعد هیدرولیکی و HP قدرت هیدرولیکی مته بر حسب اسب بخار است.

^۱ Kahraman, 2003

^۲ Armenta

^۳ Drilling Epecific Energy (DSE)

آقای محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مفهوم DSE سعی در پیدا کردن رابطه بین این پارامتر حفاری و پارامترهای ژئومکانیک نمودند که روابط زیر و ضریب رگرسیون بدست آمده در جدول ۴-۳ آورده شده است (Mohammadi Behbud, et al.).

جدول ۴-۳ روابط بین DSE و پارامترهای ژئومکانیکی (Mohammadi Behbud, et al., 2016)

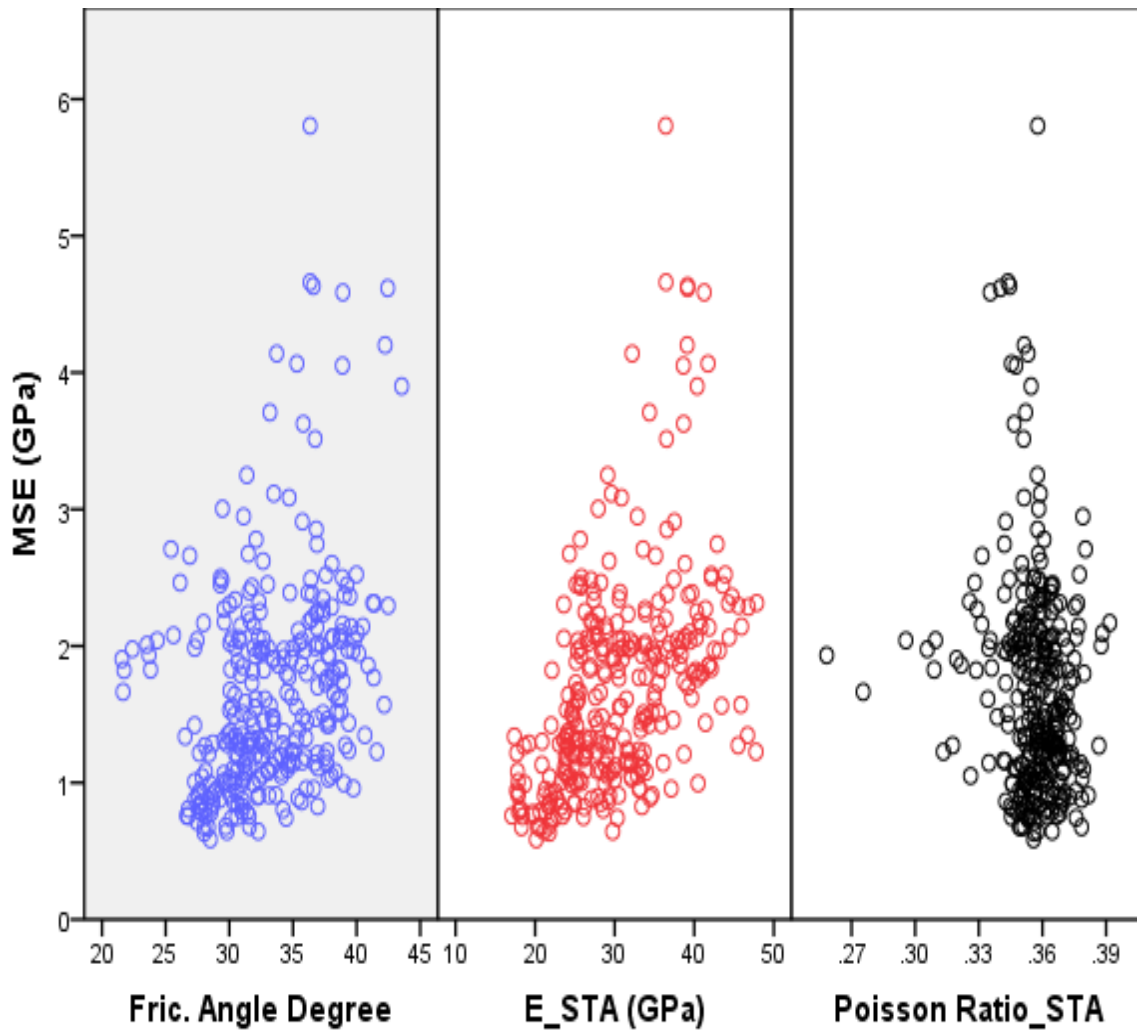
پارامتر	معادله مورد نظر	ضریب رگرسیون
مدول یانگ (گیگا پاسکال)	$DSE = 81.285 \times e^{0.0356E}$ (۴-۵)	0.63
مقاومت فشاری تک محوره (مگا پاسکال)	$DSE = 74.387 \times e^{0.0093UCS}$ (۴-۶)	0.67
نسبت پواسون	$DSE = 168.4 \times (PR)^{0.132}$ (۴-۷)	0.14
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	$DSE = 154 \times e^{0.0102PHI}$ (۴-۸)	0.30
چسبندگی (مگا پاسکال)	$DSE = 138 \times e^{0.013C}$ (۴-۹)	0.35

مطالعه نتایج این محققان نشان می دهد که می توان روابطی عددی بین انرژی ویژه و خواص ژئومکانیکی سنگ برقرار کرد که در بخش بعد به این موضوع پرداخته می شود.

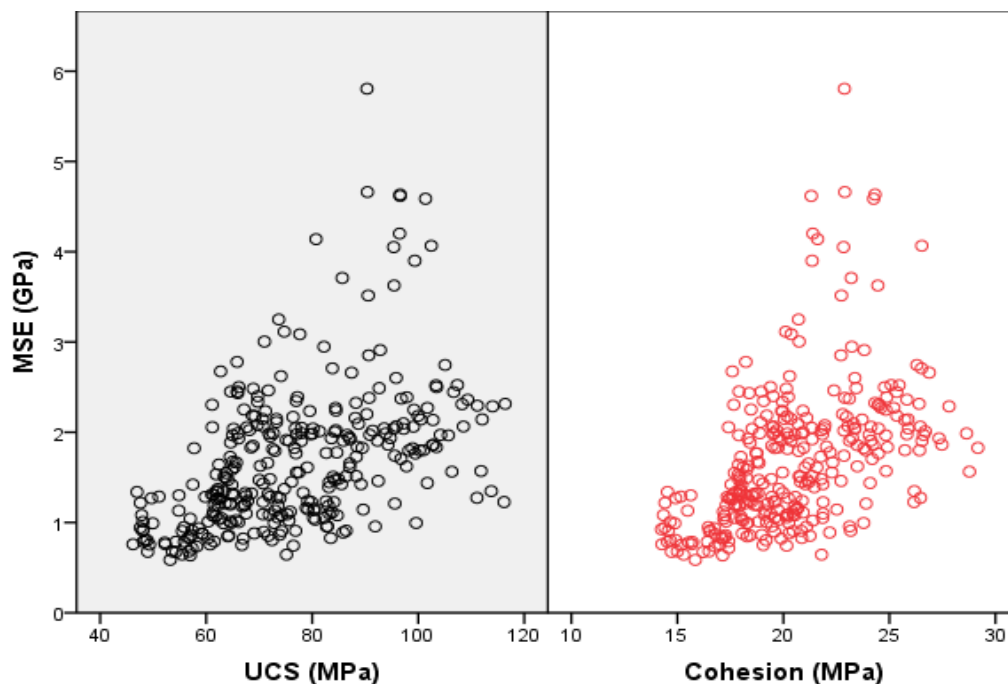
۴-۴-۱ تخمین انرژی ویژه سنگ با استفاده از خصوصیات ژئومکانیکی

تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه مکانیکی بر کسی پوشیده نیست ولی مدل سازی و چگونگی ارتباط انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی دارای اهمیت می شود که با ابزاری که مهندسی در دست دارند می توانند مدل سازی را انجام دهند. لازم به توضیح است روند تشریحی تحلیل ها در چاه A ارایه شده است. در مورد چاه B با توجه به نزدیکی نتایج و جهت جلوگیری از تکرار، تنها به ذکر نتیجه نهایی بسنده شده است.

برای تخمین انرژی ویژه مکانیکی از خصوصیات ژئومکانیکی، ابتدا لازم است متغیرهای مستقل موثر بر انرژی ویژه سنگ بررسی شود. در شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ رابطه بین انرژی ویژه و پارامترهای ژئومکانیکی در چاه A با استفاده از روابط فصل قبل آورده شده است.



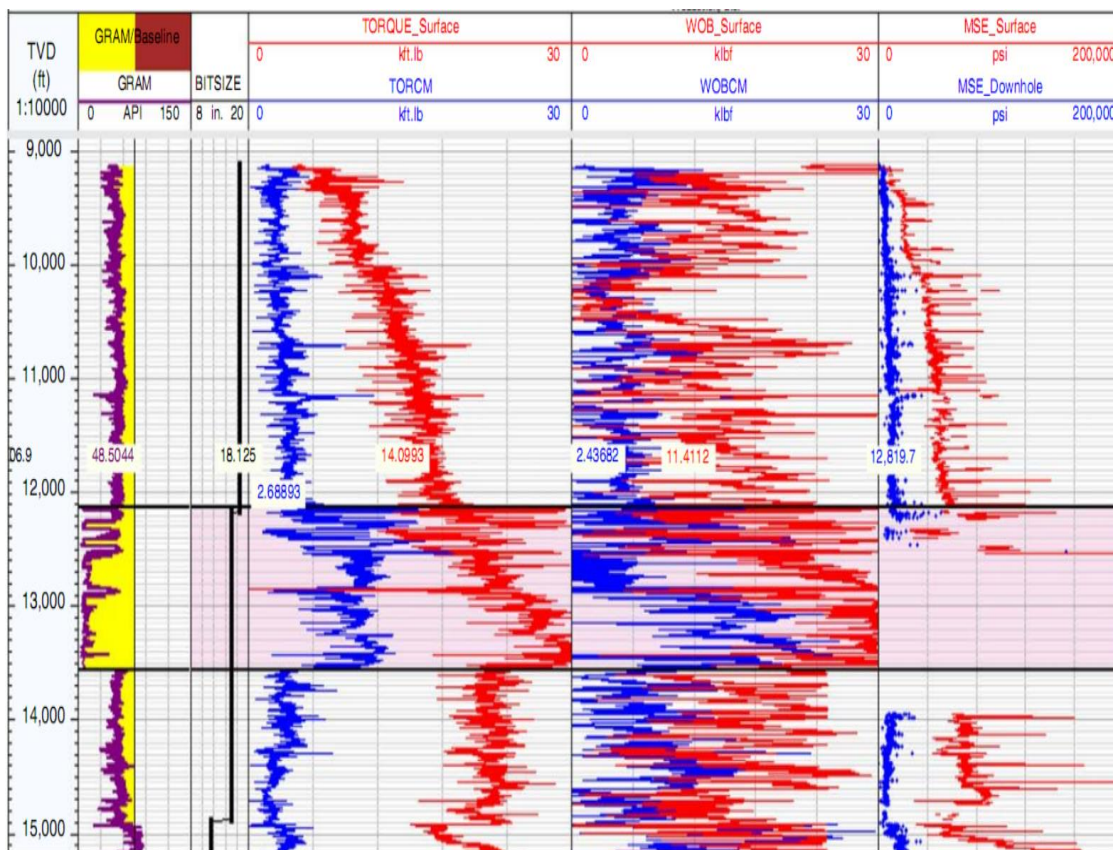
شکل ۴-۱۲ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی در چاه A نسبت به ترتیب از راست: نسبت پواسون، مدول یانگ استاتیک و زاویه داخلی اصطکاک



شکل ۱۳-۴ تغییرات انرژی ویژه در چاه A نسبت به ترتیب از راست: چسبندگی ذاتی، مقاومت فشاری (تراکمی) تک محوره

همچنین باید به این نکته اشاره شود که مقادیر بسیار زیاد انرژی ویژه مکانیکی محاسبه شده در چاه های مورد بررسی به دلیل استفاده از مقادیر سطحی پارامترهای حفاری است. در صورتی که جهت محاسبه صحیح و دقیق مقدار انرژی ویژه مکانیکی باید از مقادیر ته چاهی که توسط ابزار اندازه گیری حین حفاری (MWD^1) ثبت شده استفاده نمود که مقدار پارامترهای حفاری در ته چاه کمتر از مقادیر سطحی است در نتیجه انرژی ویژه نیز کمتر می شود. علت این اختلاف نیز به دلیل برخورد های رشته حفاری با دیواره چاه است که باعث افزایش مقادیر می شود. در شکل ۱۴-۴ اختلاف مقادیر سطحی (نمودار قرمز رنگ) و مقادیر ته چاهی (نمودارهای آبی رنگ) برای پارامترهای گشتاور، وزن روی مته و انرژی ویژه مشخص است (Majidi, et al., 2017).

¹ Measurement While Drilling



شکل ۱۴-۴ مقایسه مقادیر سطحی (نمودار قرمز) و ته چاهی (نمودار آبی) پارامترهای حفاری (Majidi, et al., 2017)

متاسفانه در این تحقیق داده های ته چاهی پارامترهای حفاری در دسترس و موجود نبودند و انرژی ویژه سطحی جهت بررسی استفاده شده است.

در اینجا علاوه بر پارامترهای ژئومکانیکی، جهت بررسی تاثیر گل و هیدرولیک حفاری پارامترهای دبی و فشار پمپاژ گل حفاری نیز مورد بررسی گرفتند. همچنین عمق چاه به عنوان نماینده تنش های برجا مد نظر قرار گرفت. دو پارامتری که نقش مهمی در تخمین انرژی ویژه دارند شامل عمق و فشار پمپاژ است که باید در نظر گرفته شود. همانطور که در شکل ۱۲-۴ و شکل ۱۳-۴ آورده شده است، انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای زاویه داخلی اصطکاک، مدول یانگ، مقاومت تنش تک محوره و چسبندگی سنگ رابطه مستقیم و رگرسیون نسبتا نرمال دارد در حالیکه با نسبت پواسون رابطه منطقی وجود ندارد. در اینجا ابتدا با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه مدل سازی انجام می شود.

یکی از روش‌های مفید برای رگرسیون چندگانه، روش پیشرو^۱ است. در این روش انتخاب متغیرهای مستقل بر اساس ضریب همبستگی آنها با متغیر وابسته وارد مدل می‌شوند. متغیر مستقلی که با متغیر وابسته بیشترین ضریب همبستگی را دارد اول مدل می‌شود، سپس متغیر مستقل دیگری که بیشترین ضریب همبستگی را دارد. ورود متغیرها زمانی به پایان می‌رسد که متغیر جدید در پیش‌بینی متغیر وابسته، دیگر نقش معنا داری نداشته باشد. لازم به ذکر است به دلیل هم خطی مقاومت فشاری تک محوره با مدول یانگ و همچنین فشار منفذی با عمق، از هر زوج پارامترهای ذکر شده فقط یکی از آنها می‌تواند در رابطه قرار گیرد. در جدول زیر نتیجه نهایی اجرای رگرسیون خطی و پارامترهای مستقل منتخب جهت تخمین انرژی ویژه مکانیکی را مشاهده می‌کنید که در نهایت چهار فاکتور عمق، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و فشار پمپاژ گل جهت تشکیل رابطه انتخاب شده‌اند. رابطه خطی حاصل به صورت زیر می‌باشد:

$$MSE = -13.882 + 0.00549 * Depth + 0.025 * UCS - 7.229 * PR - 0.061 SPP \quad (4-10)$$

جدول ۴-۴ نتیجه رگرسیون خطی جهت پیش‌بینی انرژی ویژه با خواص ژئومکانیکی سنگ

مدل	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R Square)	ضریب تعیین تعدیل شده (Adj. R Square)	خطای استاندارد تخمین
۱	۰/۵۷	۰/۳۲۸	۰/۳۲۶	۰/۶۵۲۱۱
۲	۰/۷۶	۰/۵۷۸	۰/۵۷۶	۰/۵۱۷۳۴
۳	۰/۷۷۱	۰/۵۹۵	۰/۵۹۱	۰/۵۰۸۱۱
۴	۰/۷۷۵	۰/۶۰۱	۰/۵۹۶	۰/۵۰۴۷۳
پیش‌بینی کننده های هر مدل	۱- عمق ۲- عمق، مقاومت فشاری تک محوره ۳- عمق، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون ۴- عمق، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون، فشار پمپاژ گل			

طبق جدول ۴-۴ ضریب همبستگی رابطه فوق ۰/۷۷۵ و ضریب تعیین آن ۰/۶۰ می‌باشد. همچنین با دقت به داده‌های تحلیل رگرسیون، در آزمون F مقدار بالا (و در عین حال قابل قبول

^۱ Forward

قبول ۰/۰۲۳) برای معناداری پارامتر فشار ثبت شده است که بیانگر این است که بررسی عملکرد این پارامتر در معادله نیاز به داده های بیشتری دارد.

همان طور که انتظار می رفت طبق رابطه ۴-۱۰ افزایش عمق (در نتیجه افزایش وزن روباره و تنش های وارد بر سنگ) و مقاومت فشاری تک محوره (در نتیجه نیاز به انرژی بیشتر جهت غلبه بر آن و شکستن سنگ) موجب افزایش مقدار انرژی مکانیکی ویژه می گردد. همچنین افزایش فشار پمپاژ گل (که در واقع نشان داده افزایش واقعی دبی پمپاژ گل است) نیز موجب تمیز سازی بهتر چاه و افزایش نرخ حفاری و در نتیجه کاهش مقدار انرژی مکانیکی است که علامت منفی فشار پمپاژ در معادله حاصل نیز موید این مطلب است.

از آنجایی که انرژی ویژه با هر کدام از پارامترهای فوق لزوماً رابطه خطی ندارد لذا باید سعی شود با استفاده از روش های آماری بهترین رابطه چند متغیره غیرخطی را جهت افزایش دقت پیش بینی مقدار انرژی ویژه مکانیکی به دست آورد. در جدول زیر ارتباط انرژی ویژه با هر پارامتر جداگانه مشاهده می شود:

جدول ۴-۵ ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای موجود در رابطه رگرسیونی

پارامتر	رابطه با بالاترین دقت تخمین	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R) (Square)
عمق (متر)	$MSE = 0.0002 \times e^{0.0029 * Depth}$ (۴-۱۱)	۰/۶۱	۰/۳۸
مقاومت فشاری تک محوره (مگا پاسکال)	$MSE = 0.011 \times UCS^{1.153}$ (۴-۱۲)	۰/۵۶	۰/۳۲
نسبت پواسون (بدون بعد)	$MSE = 4.6 - 8.168 * (PR)$ (۴-۱۳)	۰/۱۵۵	۰/۰۲۴
فشار پمپاژ گل (مگاپاسکال)	$MSE = 0.109 \times e^{0.001 * spp}$ (۴-۱۴)	۰/۴۸	۰/۲۳

با آزمون رابطه های غیر خطی متفاوت، مناسبترین رابطه به صورت زیر می باشد:

$$MSE = \frac{0.000163 \times 10^{0.006*UCS} \times 10^{0.001*Depth}}{10^{1.51PR}} \quad (4-15)$$

در رابطه فوق انرژی ویژه بر حسب گیگاپاسکال، مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال و عمق بر حسب متر می باشد. همان طور که مشاهده می شود پارامتر فشار پمپاژ از رابطه نهایی خارج شده است زیرا بعد از غیر خطی کردن رابطه اولیه، معنی داری فشار پمپاژ نیز از بین می رود.

در جدول ۴-۶ به ترتیب ضرایب همبستگی و رگرسیون، تحلیل رگرسیون و ضرایب رابطه

(۴-۱۵) را مشاهده میکنید:

جدول ۴-۶ تحلیل آماری رابطه پیش بینی کننده انرژی ویژه با استفاده از خواص ژئومکانیکی

جزئیات						نوع تحلیل
خطای استاندارد تخمین	ضریب تعیین تعدیل شده (Adj. R Square)	ضریب تعیین (R Square)	ضریب همبستگی (R)			خلاصه مدل
۰/۱۰۳۸۰۸۲	۰/۶۹۸	۰/۷۰۱	۰/۸۳۷			
معناداری	آزمون F	مربع میانگین	درجه آزادی	مجموع خطاها		تحلیل رگرسیونی
۰/۰۰۰	۲۴۲/۵۹۱	۲/۶۱۴	۳	۷/۸۴۳	رگرسیون	
		۰/۰۱۱	۳۱۰	۳/۳۴۱	باقیمانده	
			۳۱۳	۱۱/۱۸۳	مجموع	
معناداری	آزمون t	ضرایب استاندارد	ضرایب استاندارد نشده			معنی داری ضرایب
		بتا	خطای استاندارد	B		
۰/۰۰۰	-۱۵/۸۰۰		۰/۲۴۰	-۳/۷۸۷	ثابت	
۰/۰۰۰	-۳/۸۲۶	-۰/۱۲۰	۰/۳۹۴	-۱/۵۰۸	نسبت پواسون	
۰/۰۰۰	۱۷/۲۴۹	۰/۵۴۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	مقاومت فشاری تک محوره	
۰/۰۰۰	۲۰/۲۵۲	۰/۶۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	عمق	

در عملیات مغزه گیری تلاش در جهت ثابت نگه داشتن پارامترهای حفاری است لذا پس از تحلیل آماری جهت بررسی رابطه انرژی ویژه با خواص مکانیکی سنگ و هیدرولیک حفاری، مشخص شد که مقدار انرژی ویژه مکانیکی تنها به مقاومت فشاری تک محوره سنگ همبستگی نشان می دهد. زیرا در هر عملیاتی جهت بررسی همبستگی پارامتر وابسته به پارامتر مستقل باید به صورت هدفمند پارامتر مستقل را تغییر داد و تغییرات متغیر وابسته را مشاهده و بررسی نمود. رابطه رگرسیون خطی جهت تخمین انرژی ویژه مکانیکی در مقطع مغزه گیری به صورت زیر می باشد:

جدول ۴-۷ روابط بین انرژی ویژه مکانیکی و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در حفاری مغزه گیری

نوع رابطه	رابطه	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین (R Square)
توانی	$MSE = 0.001 \times UCS^{1.886}$ (۴-۱۶)	۰/۷۷	۰/۵۹
نمایی	$MSE = 0.431 * e^{5.062PR}$ (۴-۱۷)	۰/۱۹	۰/۰۳
خطی	$MSE = 0.049 * UCS - 0.87$ (۴-۱۸)	۰/۶۰	۰/۳۸

در واقع طبق رابطه ۴-۱۶ عملیات مغزه گیری را می توان به عنوان بهترین اثبات وابستگی شدید انرژی ویژه مکانیکی به مقاومت فشاری سنگ در نظر گرفت.

بررسی آماری داده ها در چاه B نیز نتیجه ای مشابه قسمت حفاری چاه A دارد و در این چاه هم جهت پیش بینی انرژی ویژه مکانیکی از پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و عمق استفاده می شود. به دلیل بالا بردن دقت مقایسه ها تحلیل ها در دو بازه عمقی یکسان (۲۹۸۰ تا ۳۳۰۰ متر) انجام شد. رابطه پیش بینی کننده انرژی ویژه مکانیکی بر اساس خواص ژئومکانیکی سنگ در چاه B به صورت زیر می باشد:

$$MSE = \frac{0.117382 \times 10^{0.007971*UCS} \times 10^{0.000442*Depth}}{10^{3.8736*PR}} \quad (۴-۱۹)$$

در رابطه فوق انرژی ویژه مکانیکی بر حسب گیگاپاسکال، مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال و عمق بر حسب متر می باشد. ضریب همبستگی رابطه فوق حدود ۷۹ درصد می باشد که دقت کمتری را نسبت به رابطه مشابه در چاه A ارائه می دهد. به نظر می رسد وجود چنین اختلافی با توجه به اعمال پارامترهای حفاری مختلف در دو چاه و همچنین متفاوت بودن سیستم های اندازه گیری پارامترهای حفاری دو دکل قابل توجیه باشد.

۴-۴-۲ تخمین انرژی ویژه مکانیکی سنگ با استفاده از نگاره های چاه پیمایی

یکی دیگر از روش های مدل سازی انرژی ویژه سنگ، استفاده از نگاره های چاه پیمایی است. همانطور که در روش قبل مشخص شد ضریب رگرسیون بدست آمده نسبی بوده و نمی توان از آن برای مدل سازی استفاده کرد. بدلیل اینکه پارامترهای ژئومکانیکی از نگاره های چاه پیمایی استخراج می شوند پس می توان با استفاده از این نگاره ها بطور مستقیم انرژی ویژه را تخمین زد. ابتدا بایستی رابطه بین نگاره ها و انرژی ویژه بررسی تا در صورت داشتن رابطه منطقی از آنها برای تخمین انرژی ویژه استفاده کرد. در جدول زیر ضریب همبستگی برای هر نگاره با انرژی ویژه سنگ در چاه A نشان داده شده است.

جدول ۴-۸ ضریب همبستگی نگاره های مختلف با انرژی ویژه سنگ در چاه A

پارامتر	ضریب همبستگی (R) با انرژی ویژه سنگ	
	مغزه گیری	حفاری کارآمد
CGR	۰/۱۰۱	۰/۱۳۶
NPHI	-۰/۴۸۶	-۰/۵۵۷
RHOB	۰/۶۰۶	۰/۵۳۶
DTC	-۰/۶۱۳	-۰/۵۳۰
Caliper	۰/۲۲۴	-۰/۱۵۵
PEF	۰/۰۶۲	-۰/۰۲۶
DTS	-۰/۶۲۴	-۰/۵۶۲
Depth	۰/۰۲۷	۰/۶۱۴

در اینجا نیز در دو حالت حفاری کارآمد و مغزه گیری سعی در بررسی ارتباط انرژی ویژه با نگاره های پتروفیزیکی گردید و ورودی های مدل از جدول فوق استخراج شده و همه وارد مدل سازی شدند. بعد از تحلیل به روش رگرسیون چندگانه، بهترین معادله برازش داده شده به فرم زیر بدست آمد:

حالت حفاری	شماره رابطه	ضریب تعیین (R Square)	رابطه
کارآمد	(۴-۲۰)	۰/۴۶	$\log MSE = 2.387 - .0268 PEF - 2.44 NPHI + .063 GR - .083 C$
کارآمد	(۴-۲۱)	۰/۳۸	$\log MSE = 1.798 - .006 DTS + .007 GR - .113 C - .0741 NPHI$
مغزه گیری	(۴-۲۲)	۰/۶۷	$\log .MSE = -2.0596 - .0055 DTS + 1.252 RHOB + .0018 GR$

همان طور که مشخص است در حالت حفاری کارآمد استفاده از نگاره های فتوالکتریک، تخلخل نوترون، گاما و کالیپر ضریب تعیین بالاتری می دهد. ضریب فتوالکتریک (PEF) می بایست با چگالی (و همچنین مقاومت فشاری) و سرعت موج برشی رابطه مستقیم و مثبت داشته باشد ولی در بررسی داده های موجود مشخص شد رابطه عکس و منفی نشان میدهد. با توجه به نکته ذکر شده عدم توجه ضریب منفی نگاره فتوالکتریک در رابطه موجب بی اعتبار شدن رابطه (۴-۲۰) می شود لذا رابطه (۴-۲۱) جهت استفاده انتخاب می شود که در آن نگاره فتوالکتریک از محاسبات خارج شده است و دقت رابطه نیز کاهش پیدا کرده است. در حالت مغزه گیری نیز بهترین رابطه جهت تخمین انرژی ویژه رابطه (۴-۲۲) می باشد که متشکل از نگاره های زمان گذر موج برشی، چگالی و پرتو گاما می باشد. همان طور که در بخش قبل نیز ذکر شد در حفاری مغزه گیری انرژی ویژه وابستگی شدیدی با مقاومت فشاری تک محوره نشان می دهد و در نظر گرفتن اینکه مقاومت فشاری تک محوره با چگالی رابطه مستقیم و با زمان گذر موج صوتی رابطه عکس دارد لذا ضریب مثبت چگالی و همچنین ضریب منفی زمان موج برشی در معادله توجه می شوند.

در این تحقیق از دو روش برای تخمین انرژی ویژه مکانیکی استفاده شد. در روش اول سعی در تخمین انرژی ویژه مکانیکی با استفاده از خواص مکانیکی سنگ و در روش دوم ورودی های رابطه تخمین نگاره های پتروفیزیکی بودند. با توجه به تحلیل های انجام شده و روابط به دست آمده به نظر می رسد در هنگام حفاری کارآمد باید از رابطه (۴-۱۵) که از پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، عمق و نسبت پواسون جهت پیش بینی استفاده می کند، بهره جست که ضریب تعیین آن ۰/۷ می باشد ولی در حالت حفاری مغزه استفاده از رابطه (۴-۲۲) و ورودی های نگاره های پتروفیزیکی کندی موج برشی، چگالی و پرتو گاما معقولتر می نماید زیرا ضریب تعیین بالاتر (۰/۶۷) دارد. شکل نهایی رابطه به صورت زیر می باشد و تحلیل رگرسیونی آن نیز در ادامه آمده است:

$$MSE = 0.00872 \times \frac{10^{(1.2152RHOB+0.0089 GR)}}{10^{0.0055 DTS}} \quad (4-23)$$

در رابطه فوق انرژی ویژه مکانیکی بر حسب گیگاپاسکال و ضریب تعیین آن ۶۷ درصد می باشد. بر خلاف چاه A رابطه پیش بینی کننده در چاه B تنها به نگاره تخلخل نوترون وابستگی نشان می دهد و همپنین نسبت به رابطه ۴-۱۹ نیز دقت پیش بینی کمتری دارد. ضریب تعیین رابطه زیر ۰/۴۲ می باشد. در این رابطه انرژی ویژه بر حسب گیگاپاسکال می باشد.

$$MSE = \frac{3.069}{10^{1.74 * NPHI}} \quad (4-24)$$

در این چاه نیز پیش بینی انرژی ویژه مکانیکی با استفاده از خواص ژئومکانیکی نسبت به نگاره های پتروفیزیکی دقت بیشتری نشان می دهد.

جدول ۹-۴ تحلیل آماری رابطه پیش بینی کننده انرژی ویژه با استفاده از نگاره ها در مغزه گیری

جزئیات						نوع تحلیل
خطای استاندارد تخمین	ضریب تعیین تعدیل شده (Adj. R Square)	ضریب تعیین (R Square)	ضریب همبستگی (R)			خلاصه مدل
۰/۱۱۴۵۴۲	۰/۶۶۷	۰/۶۷۱	۰/۸۱۹			
معناداری	آزمون F	مربع میانگین	درجه آزادی	مجموع خطاها		تحلیل رگرسیونی
۰/۰۰۰	۱۷۰/۵۰۵	۲/۲۳۷	۳	۶/۷۱۱	رگرسیون	
		۰/۰۱۳	۲۵۱	۳/۲۹۳	باقیمانده	
			۲۵۴	۱۰/۰۰۴	مجموع	
معناداری	آزمون t	ضرایب استاندارد	ضرایب استاندارد نشده			معنی داری ضرایب
		بتا	خطای استاندارد	B		
۰/۰۰۰	-۳/۸۱۰		۰/۵۴۱	-۲/۰۶	ثابت	
۰/۰۰۰	-۴/۲۶۵	-۰/۲۹۹	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۶	کندی موج برشی	
۰/۰۰۰	۷/۷۳۵	۰/۵۲۳	۰/۱۵۷	۱/۲۱۵	چگالی	
۰/۰۴۷	۱/۹۹۴	۰/۰۷۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	پرتو گاما	

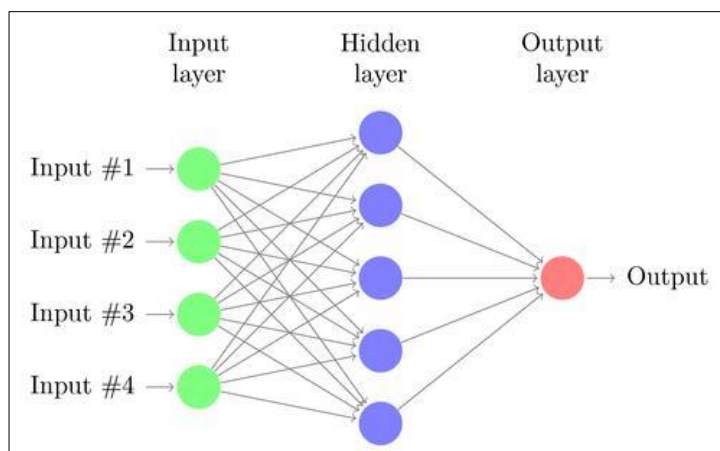
۴-۵ تخمین انرژی ویژه مکانیکی سنگ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از پرکاربردترین ساختارهای مورد استفاده در هوش مصنوعی می‌باشند. امروزه از این ساختارها در علوم مهندسی و پایه در راستای خودکارسازی، طبقه‌بندی و تخمین توابع پیچیده استفاده می‌شود. یکی از ویژگی‌های این نرم‌افزار جعبه ابزار شبکه‌های عصبی است که در واقع یک آزمایشگاه مجهز است. نورون‌های مورد استفاده در شبکه‌های عصبی مصنوعی شکل بسیار ساده‌ای از نورونهای بیولوژیکی می‌باشند. این نورونها از طریق اتصالات ساده‌ای با یکدیگر در ارتباطند. نورون‌ها در قالب لایه‌ها سازماندهی می‌شوند. هر لایه وظیفه خاصی به عهده دارد، بطور

کلی در یک شبکه مصنوعی سه نوع لایه وجود دارد.

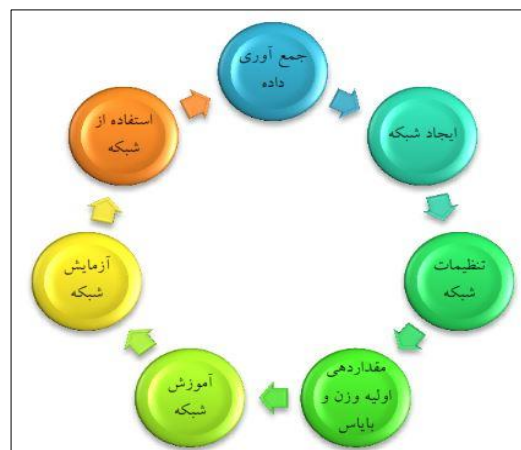
- لایه ورودی که اطلاعات را در قالب یک مجموعه از شاخصهایی که الگو را شکل می دهند از محیط دریافت می کند و آن را به لایه پنهان یا لایه میانی انتقال می دهد.
- لایه میانی که کار پردازش و تجزیه و تحلیل اطلاعات را انجام می دهد و به همین طریق لایه میانی نیز به لایه خروجی مرتبط است.
- لایه خروجی که نتیجه تجزیه و تحلیل اطلاعات را دریافت کرده و آنرا به یک تفسیر با معنی برای ابلاغ و برگشت دادن به محیط تبدیل می کند.

یک نورون ساده از دو عنصر کلیدی وزن و تابع انتقال تشکیل شده است. ورودی P به نورون اعمال می شود، از طریق ضرب در وزن w ، وزن دار می شود و با اضافه کردن بایاس b ، حاصل $(wp+b)$ به تابع انتقال f بعنوان ورودی اعمال می شود و خروجی a را تولید می کند، یعنی $a=f(wp+b)$ شماتیک نورون در شکل ۱۵-۴ با R ورودی نشان داده شده است. ایده اصلی شبکه های عصبی این است که با تغییر مقادیر w و b ، شبکه یک رفتار یا تصمیم را اتخاذ کند. w و b دو پارامتر تنظیم شونده در نورون ها می باشد. قابل توجه است که بایاس یک پارامتر قابل تنظیم نورون ها است نه یک ورودی (اسرادل، ۱۳۹۴).



شکل ۱۵-۴ شماتیک لایه های ورودی، میانی و خروجی در شبکه هوش مصنوعی (اسرادل، ۱۳۹۴)

در این مطالعه از شبکه مصنوعی عصبی پس انتشار استفاده می شود زیرا این شبکه در حالت چند لایه به منظور پیش بینی الگوریتم های پیچیده در بین ورودی ها بسیار پر کاربرد است. مطابق شکل ۴-۱۶ به طور کلی هفت مرحله در طراحی شبکه های عصبی وجود دارد: جمع آوری داده ها، ایجاد شبکه، تنظیمات شبکه، مقدار دهی اولیه وزن ها و بایاس ها، آموزش شبکه، آزمایش شبکه و استفاده از شبکه.

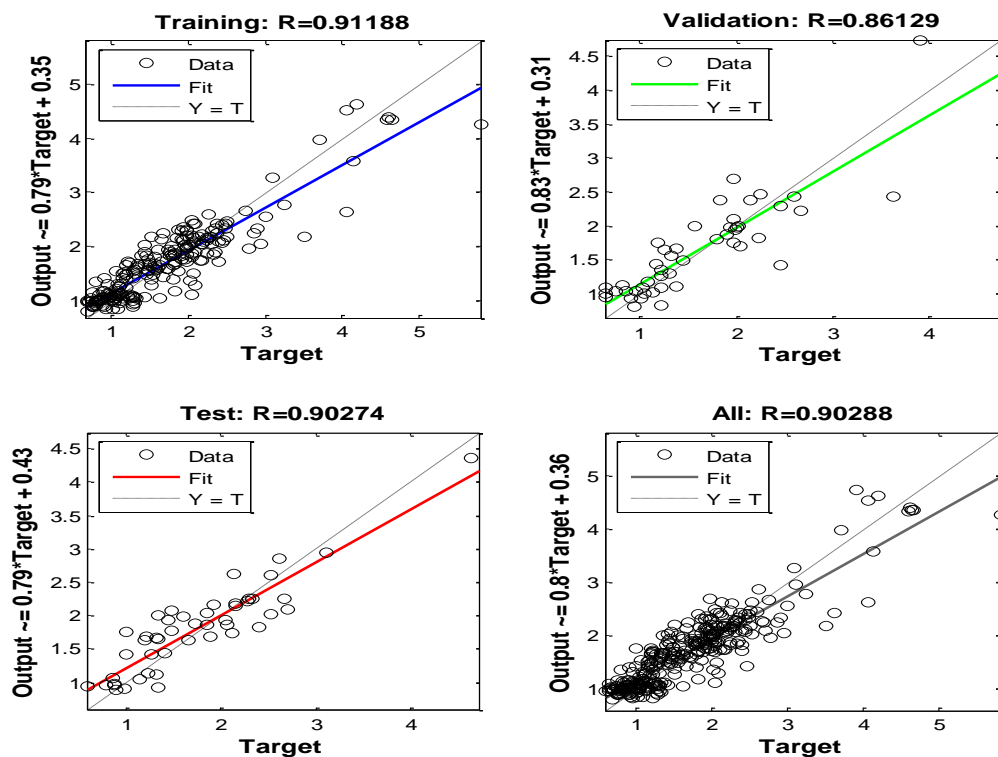


شکل ۴-۱۶ مراحل گام به گام طراحی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی از الگوریتم ثابتی پیروی نمی کنند، آنها تنها به چیزهایی که از طریق تجربه یاد گرفته اند، پاسخ می دهند. لازم است شبکه را در معرض مثال های کافی قرار داد تا بتواند ارتباط بین اطلاعات را فرا گیرد. این مثال ها یعنی الگوها یا مجموعه آموزشی، شامل ورودی ها خروجی های مطلوب مربوط به آنها می باشد. معمولاً از ۸۰٪ داده ها برای آموزش شبکه و از ۲۰٪ باقی مانده به منظور آزمایش شبکه استفاده می شود. برای آموزش و آزمایش شبکه دو روش وجود دارد روش اول بدین صورت است که ابتدا در یک چاه شبکه آموزش داده می شود و سپس در چاه بعدی این شبکه آزمایش می شود ولی در روش دوم از بخشی از اطلاعات کل چاهها (بطور مثال ۸۰٪) برای آموزش و از بخش دیگر اطلاعات کل چاهها برای آزمایش شبکه و اعتبارسنجی استفاده می شود. در روش اول ممکن است اطلاعات چاه ها به نسبت معینی پراکنده نشده باشند ولی از برخی چاهها بعنوان آموزش و از

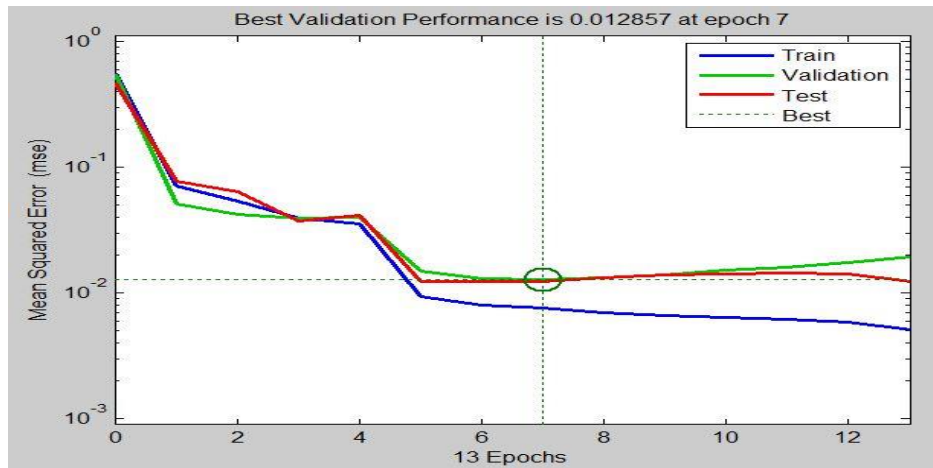
برخی بعنوان آزمایش شبکه استفاده شود. بنابراین در این تحقیق، از ۸۰٪ اطلاعات دو چاه بعنوان آموزش شبکه، از ۱۰٪ برای اعتبارسنجی و از ۱۰٪ باقیمانده برای آزمایش شبکه استفاده می‌شود.

در طراحی این شبکه که با استفاده از نرم افزار Matlab انجام شده است، از سه لایه میانی با پنج نورون و یک لایه خروجی با یک نورون استفاده می‌شود. داده‌های ورودی که بعنوان بردار ورودی به شبکه عصبی معرفی می‌شود، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و عمق می باشند. داده‌های هدف در اینجا همان انرژی ویژه سنگ در نظر گرفته شد. در مرحله آموزش از ۸۰٪ داده‌های ورودی دو چاه مورد نظر جهت آموزش شبکه استفاده شد. ضریب رگرسیون در شکل ۱۷-۴ نشان داده شده است. شبکه در مرحله آموزش ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۱۲ دارد که نسبتاً قوی است. اکنون از ۱۰٪ کل داده‌های ورودی دو چاه مورد نظر جهت آزمایش استفاده می‌شود، در این مرحله نیز شبکه ضریب همبستگی خوبی برابر ۰/۹۰ دارد.



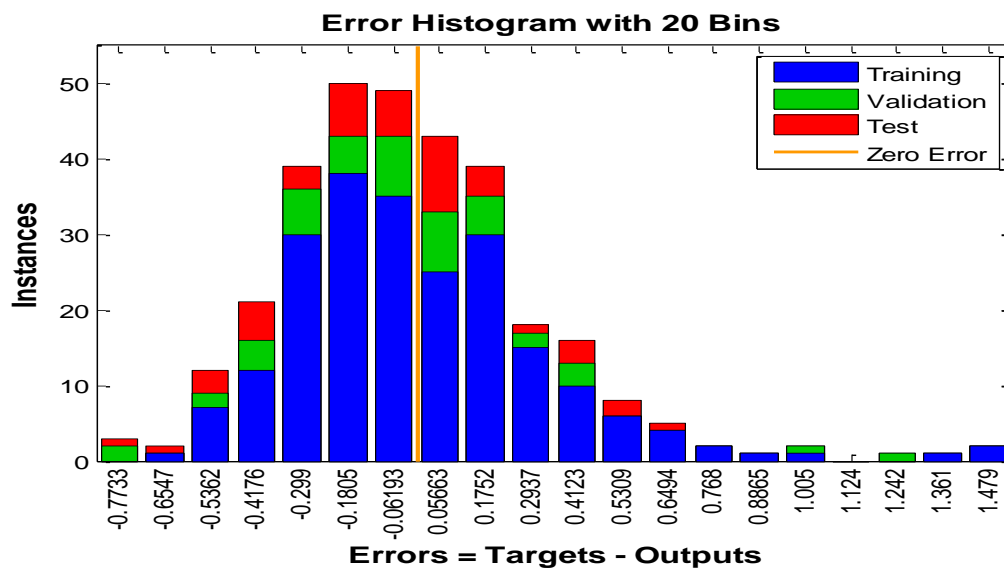
شکل ۱۷-۴ نتایج رگرسیون شبکه عصبی طراحی شده در مراحل مختلف

همانطور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود آموزش شبکه در تکراری متوقف می‌شود که خطای مرحله آزمایش در حال افزایش است.



شکل ۴-۱۸ نمودار عملکرد خطای مراحل آموزش و آزمایش در برابر تکرارهای انجام شده در شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده

لازم بذکر است که ضریب همبستگی ۰/۹۱ ضریب همبستگی بسیار مناسبی است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری پارامترهای حفاری از قبیل گشتاور وارده به مته، وزن روی مته و غیره معمولاً همراه خطا است، این ضریب بسیار مطلوب به نظر می‌آید.

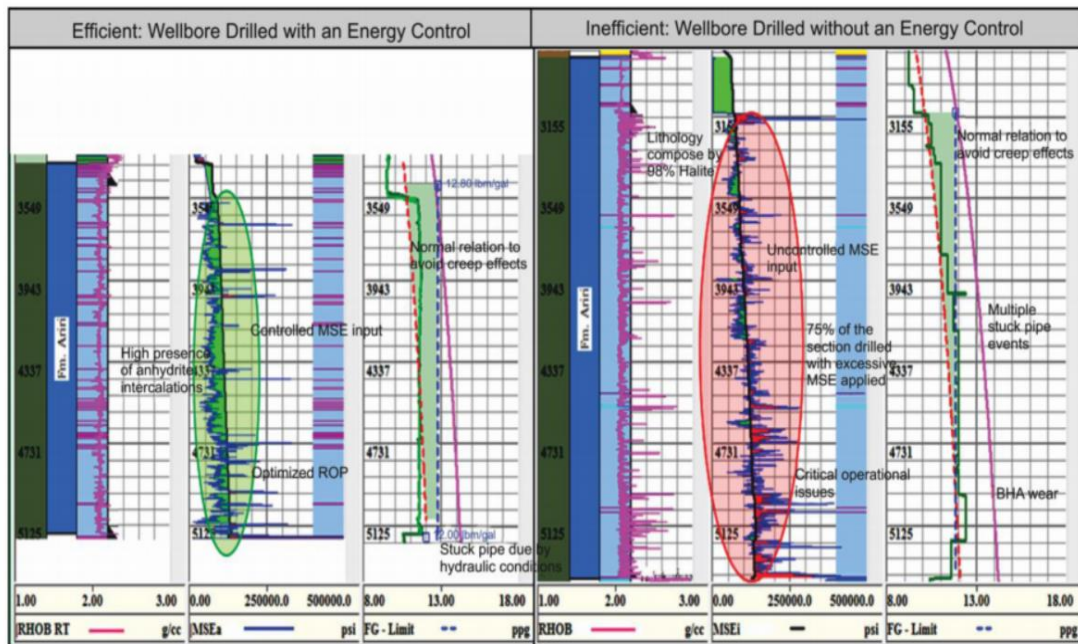


شکل ۴-۱۹ نمودار فراوانی خطای پیش بینی مدل طراحی شده در شبکه عصبی مصنوعی

۴-۶ بهینه سازی با استفاده از انرژی ویژه مکانیکی

هدف اصلی از بررسی هر پارامتر پیش بینی کننده ای، بهینه سازی عملیات حفاریست. در بحث انرژی ویژه مکانیکی زمانی شرایط بهینه است که بتوان با صرف کمترین انرژی بالاترین نرخ حفاری را دست یافت. پینتو^۱ در سال ۲۰۱۶ یک تحلیل ژئومکانیکی بر اساس انرژی ویژه مکانیکی جهت بهینه سازی حفاری و جلوگیری از زمان غیرمفید در حفاری بازه های تبخیری (لیتولوژی غالب هالیت به همراه میان لایه های گل سنگ و انهیدریت) استفاده کرد. این تحلیل دو حد انرژی حداقل و حداکثر بر اساس عمق تعریف نمود. دو مقدار به صورت لحظه ای و به ترتیب با استفاده از مقدار مقاومت فشاری محصور و انرژی ویژه ذاتی تخمین زده شدند. محاسبه انرژی ویژه ذاتی بر اساس خواص مکانیکی سنگ (مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی و محیط سنگ) و با استفاده از رابطه ارائه شده توسط دتورنی و چی (۳-۲) می باشد. بعد از انجام تحلیل و مقایسه سه مقدار مقاومت فشاری محصور، انرژی ویژه ذاتی و انرژی ویژه حاصل از پارامترهای حفاری، نواحی با اتلاف بالای انرژی تشخیص داده شد تا جهت کاهش ارتعاشات محوری، جانبی و جلوگیری از فرسایش رشته در سازند زمین شناسی به کار رود (شکل ۲۰-۴). نتیجه این تحلیل باعث کاهش ۱۲ روزه زمان حفاری یکی از چاه های برزیل گردید (Pinto, et al).

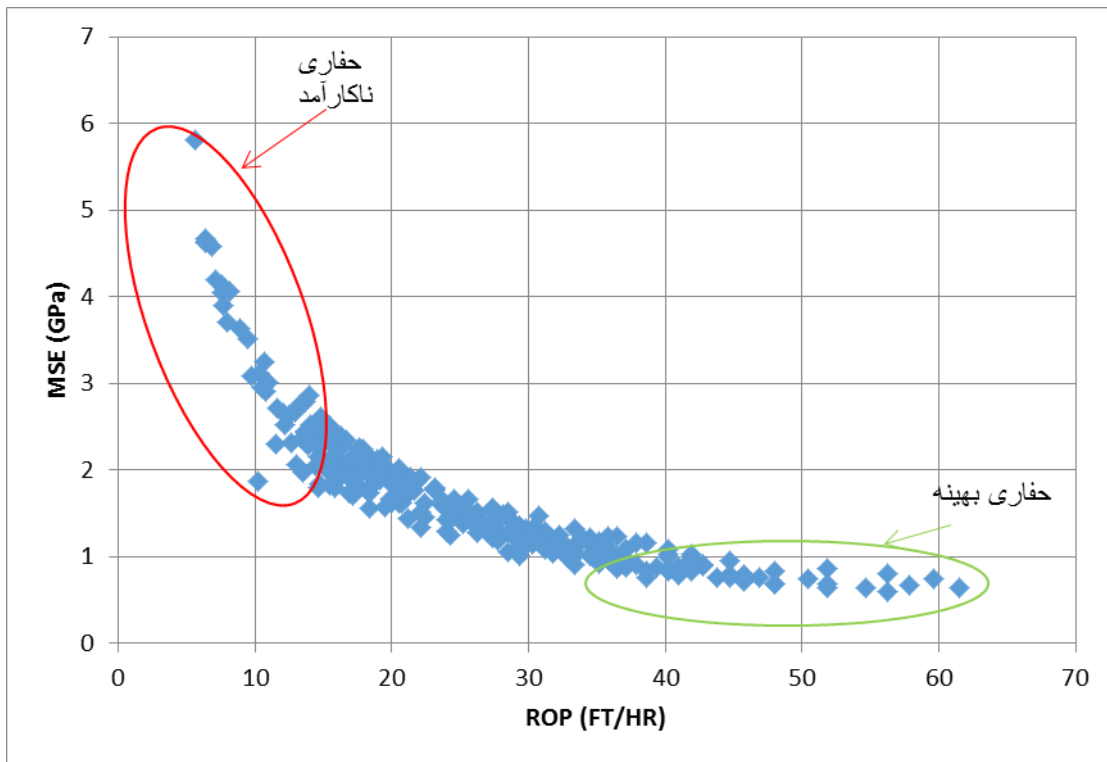
^۱ Pinto



شکل ۲۰-۴ مقایسه دو مورد یکی با ناحیه اتلاف بالای انرژی (سمت راست) و مورد دوم با وارد کردن تحلیل انرژی ویژه (شکل سمت چپ) (Pinto, et al., 2016)

از آنجا که در عملیات مغزه گیری نرخ حفاری بالا اهمیتی ندارد لذا در این قسمت فقط حفاری کارآمد^۱ مورد بحث قرار می گیرد. شکل ۲۱-۴ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ حفاری در چاه A تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ حفاری را در حفاری کارآمد در چاه A نشان می دهد:

^۱ Performance Drilling

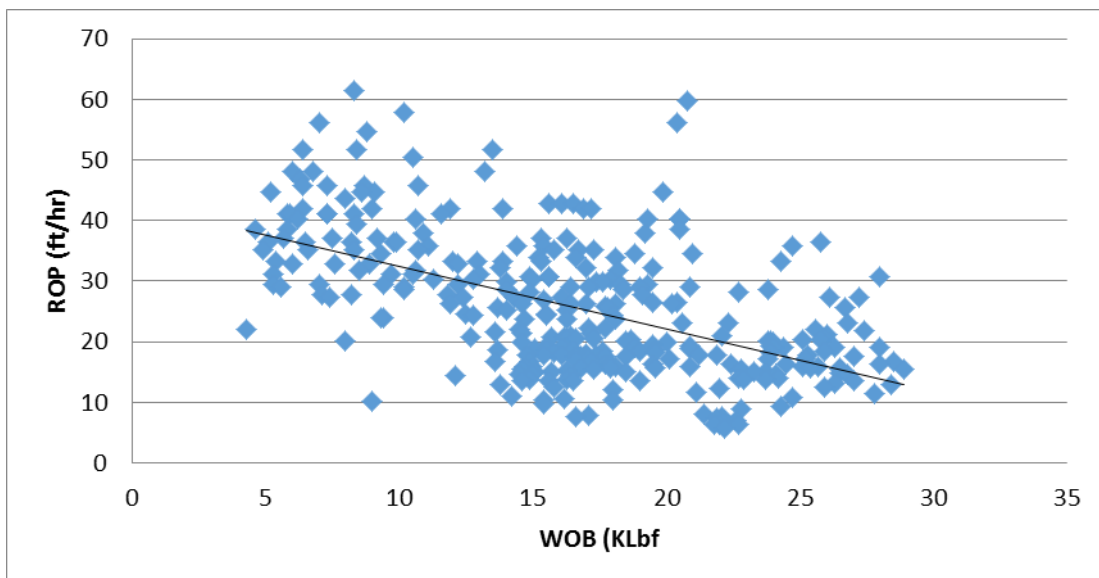


شکل ۲۱-۴ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ حفاری در چاه A

همان طور که شکل نشان می دهد در نرخ نفوذهای بالاتر از ۴۰ فوت بر ساعت شرایط حفاری بهینه و در واقع اتلاف انرژی کمینه می شود که مقادیر انرژی ویژه کمتر از ۱ گیگاپاسکال در این شرایط ثبت شده است. ولی در شرایطی که مقدار انرژی ویژه بالاتر از ۲ گیگاپاسکال و نرخ نفوذ کمتر از ۱۵ فوت بر ساعت می باشد می توان شرایط حفاری ناکارآمد را به وضوح مشاهده نمود که نشان دهنده ناکافی بودن یا نامناسب بودن پارامترهای اعمالی حین حفاری باشد. محدوده بین حفاری بهینه و ناکارآمد بستگی به توانایی پرسنل حفاری در تطبیق دادن پارامترهای حفاری با تغییرات سازند و نرخ حفاری می باشد زیرا در سازند سخت باید از وزن روی مته بیشتر و سرعت دوران کمتر استفاده کرد و در سازند نرم عکس آن را انجام داد تا نرخ نفوذ مناسب حاصل شود. همچنین با افزایش نرخ حفاری می بایست هیدرولیک حفاری و دبی پمپاژ گل نیز تغییر کند تا حجم افزایش یافته کنده های جدا

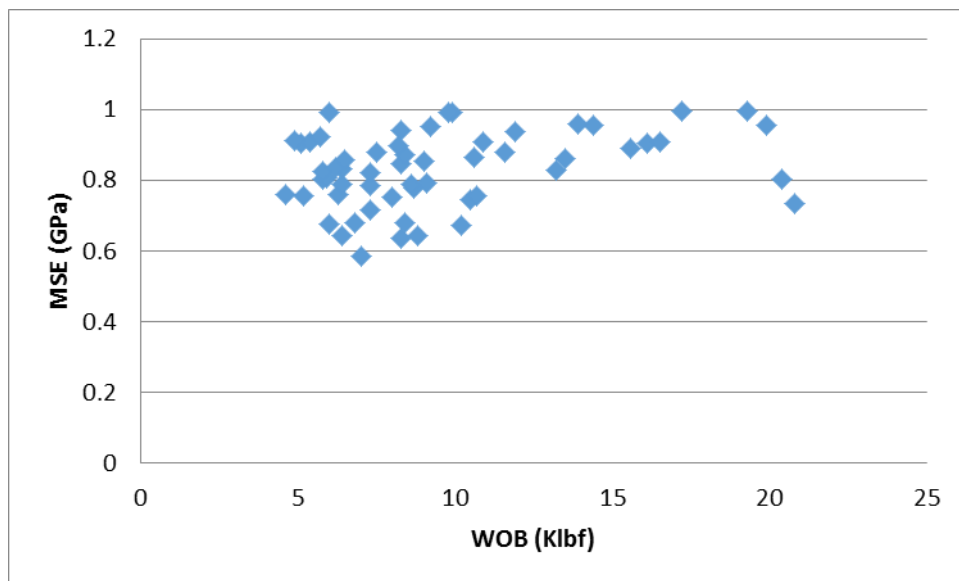
شده از سنگ سریعتر از چاه خارج شده و از خردایش مجدد^۱ کنده ها و در نتیجه اتلاف انرژی و افزایش مقدار انرژی ویژه جلوگیری شود. پروسه عملیاتی در این گونه مواقع استفاده از drill off test می باشد. نحوه انجام این آزمایش به این صورت است که ابتدا سرعت دوران رشته را ثابت نگه داشته و اقدام به حفاری با وزن روی مته های مختلف در بازه زمانی ثابت می شود و نرخ حفاری در هر بازه زمانی ثبت می شود. سپس وزن روی مته ای که بیشترین مقدار نرخ نفوذ را می دهد به عنوان وزن روی مته بهینه انتخاب می شود. سپس با ثابت نگه داشتن وزن روی مته مقدار بهینه اقدام به تغییر سرعت دوران رشته و حفاری در بازه ی زمانی ثابت با یک سرعت دوران مشخص و ثبت نرخ حفاری حاصل است. مشابه وزن روی مته در این حالت نیز سرعت دوران بهینه (سرعت دوران با بیشترین نرخ حفاری) مشخص می شود. به این ترتیب پارامترهای وزن روی مته و سرعت دوران رشته بهینه به دست می آیند که در ادامه عملیات باید از ترکیب آنها استفاده شود. نکته مهم در انجام این آزمایش این است که حین تعیین هر پارامتر، مقدار اولیه و نهایی پارامتر اعمالی و نرخ حفاری حاصله باید یکسان باشد تا از یکسان بودن سازند در تمام طول مدت آزمایش اطمینان کسب نمود. باید یادآوری شود بسیاری از نقاطی که در محدوده بهینه قرار گرفته اند به دلیل مقاومت پایین سازند بوده است. در اثبات این مسئله می توان به تغییرات کلی نرخ حفاری با وزن روی مته (شکل ۲۲-۴) رجوع نمود که با افزایش وزن روی مته نرخ حفاری کاهش یافته است.

^۱ Regrinding



شکل ۴-۲۲ تغییرات نرخ حفاری نسبت به وزن روی مته در حفاری کارآمد چاه A

با بررسی تغییرات انرژی ویژه در ناحیه بهینه با وزن روی مته در شکل ۴-۲۳ گستردگی محدوده وزن روی مته مشخص می شود. پراکندگی وزن ها بیشتر در وزن های پایینتر است که دلیل مصرف انرژی ویژه کم در این وزن ها کم بودن مقاومت تراکمی سنگ است. همچنین نکته جالب عدم وجود دامنه وزنی ۲۱-۳۰ کیلو پوند در ناحیه بهینه است که اثباتی بر این مدعاست که اعمال وزن بیشتر لزوما شرایط بهتری را حاصل نمی کند. متأسفانه به دلیل این گونه خطاهای عملیاتی امکان تصمیم گیری مناسب جهت کشف یک رابطه جهت تخمین انرژی ویژه بر اساس خواص مکانیکی سنگ مختص ناحیه بهینه وجود ندارد.



شکل ۲۳-۴ پراکندگی انرژی ویژه بر اساس وزن روی مته های مختلف در ناحیه حفاری بهینه چاه A

جهت اثبات این ادعا محاسبات رگرسیونی در ناحیه بهینه انجام شد که نتیجه محاسبات به صورت زیر است:

جدول ۱۰-۴ روابط تخمین انرژی ویژه در ناحیه حفاری بهینه چاه A

شماره رابطه	ضریب تعیین (R Square)	رابطه
(۴-۲۵)	۰/۲۲	$MSE = -1.723 + 0.004UCS + 0.001DEPTH$
(۴-۲۶)	۰/۱۳	$MSE = -0.413Log(DTC) + 2.584$

همان طور که نتایج جدول نشان می دهند در ناحیه بهینه رابطه معناداری با قابلیت و دقت پیش بینی بالا قابل کشف نیست.

حال اگر تعریف بازه بهینه را تغییر داده و مقادیر انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکا و نرخ نفوذ بالای ۱۷ فوت بر دقیقه را به عنوان بازه بهینه تعریف شود تنها ۲۹ درصد از داده ها حذف می شوند و قسمت عمده ای از داده ها جهت انجام تحلیل باقی می ماند. تحلیل رگرسیونی در این بازه جهت ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با پارامترهای ژئومکانیکی و همچنین نگاره های

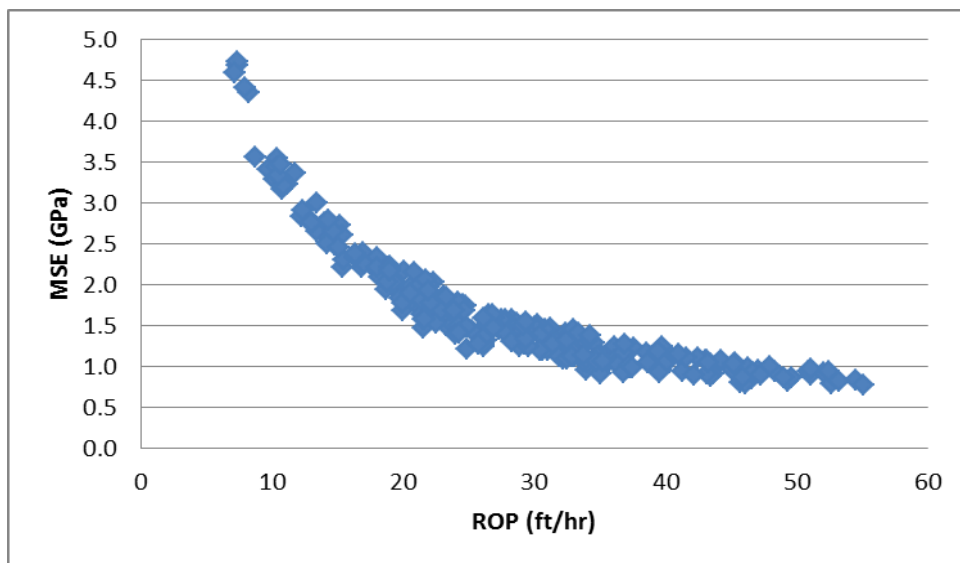
پتروفیزیکی روابط (۴-۲۷) و (۴-۲۸) را حاصل می کند که در حالت بهینه نیز استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی دقت تخمین بیشتری نشان می دهند.

جدول ۴-۱۱ روابط رگرسیونی در ناحیه بهینه (انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال) جهت پیش بینی انرژی ویژه در چاه A

رابطه	ضریب تعیین (R Square)	شماره رابطه
$MSE = \frac{0.00165 \times e^{0.002 \text{ Depth}} \times e^{0.011 \text{ UCS}}}{e^{2.3 \text{ PR}}}$	۰/۶۳	(۴-۲۷)
$MSE = \frac{0.0077 \times 10^{0.915 \text{ RHOB}}}{10^{0.003 \text{ GR}}}$	۰/۳۷	(۴-۲۸)

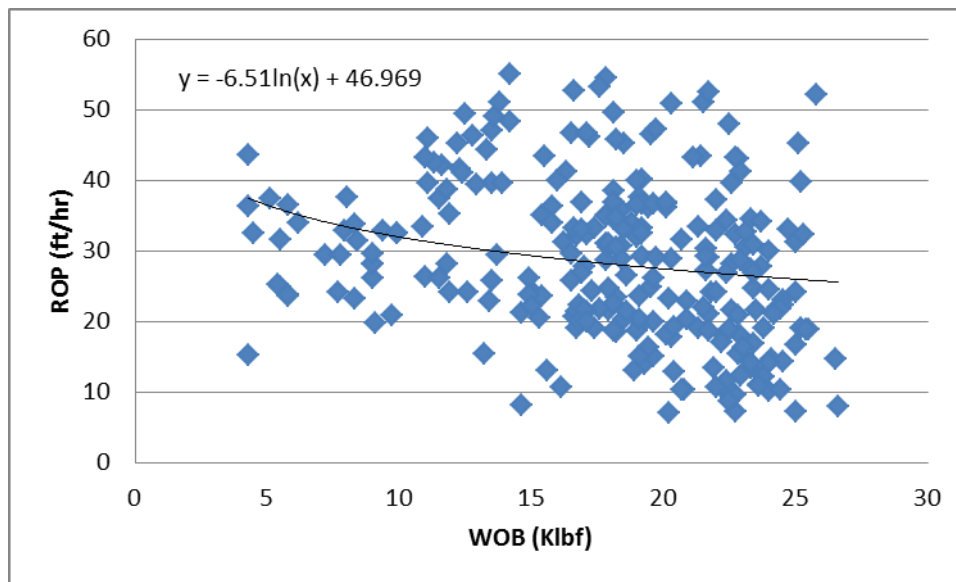
با مقایسه روابط ۴-۱۵ و ۴-۲۷ مشترک بودن پارامترهای مستقل در رابطه رگرسیونی در کل بازه و بازه بهینه مشخص می شود.

جهت بررسی موارد فوق در چاه B نمودار تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ نفوذ حفاری در این چاه در شکل ۴-۲۴ رسم شده است. مقایسه این شکل با شکل ۴-۲۱ نشان از شباهت رفتاری تغییرات در دو چاه دارد.



شکل ۴-۲۴ تغییرات انرژی ویژه مکانیکی نسبت به نرخ نفوذ در چاه B

همچنین بررسی تغییرات نرخ نفوذ نسبت به وزن روی مته در این چاه نیز نشان از اعمال پارامترهای حفاری نامناسب دارد زیرا روند کلی تغییرات حین افزایش وزن روی مته، کاهش نرخ نفوذ را نشان می دهد (شکل ۴-۲۵).



شکل ۴-۲۵ تغییرات نرخ نفوذ حفاری نسبت به وزن روی مته در حفاری چاه B

همانند چاه A در چاه B نیز ناحیه بهینه بر اساس مقادیر انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال تعریف می شود. این مرز انرژی ویژه منطبق با مقادیر نرخ نفوذ بیشتر از ۱۸ فوت بر ساعت می گردد که بسیار نزدیک به مرز تعریف شده جهت چاه A بود. بررسی داده ها نشان می دهد ۷۷ درصد از داده ها در ناحیه بهینه قرار می گیرد.

نتایج تحلیل رگرسیونی جهت پیش بینی مقدار انرژی ویژه در ناحیه بهینه چاه A در جدول ۴-۱۲ آورده شده است. مقایسه نتایج نشان از دقت بیشتر پارامترهای ژئومکانیکی در پیش بینی انرژی ویژه نسبت به نگاره های پتروفیزیکی است. در مقایسه با رابطه چاه A، در چاه B نسبت پواسون از رابطه خارج و از دو پارامتر عمق و مقاومت فشاری تک محوره جهت تخمین انرژی ویژه استفاده شده است.

جدول ۴-۱۲ روابط رگرسیونی در ناحیه بهینه (انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال) جهت پیش بینی انرژی ویژه در چاه B

رابطه	ضریب تعیین (R Square)	شماره رابطه
$MSE = 0.0275 \times e^{0.001 Depth} \times e^{0.011 UCS}$	۰/۵۱	(۴-۲۹)
$MSE = \frac{1.3364 \times e^{0.372 RHOB}}{e^{0.015 DTC}}$	۰/۳۵	(۴-۳۰)

در فصل دوم به معیارهای انتخاب مته اشاره شد که طبق جدول ارائه شده از طرف سازمان بین المللی پیمانکاران حفاری مهمترین معیار انتخاب مته مقاومت تراکمی سنگ می باشد. به همین دلیل اگر بتوان قبل از راندن مته اطلاعات دقیقی از خواص مقاومتی سنگ داشت می توان دقت در انتخاب مته متناسب با سازند را به حداکثر رساند و بازده عملیات را افزایش داد. همچنین اگر حین عملیات نیز بتوان به نحوی در حین حفاری متوجه تغییرات سازند (تغییرات مقاومتی سازند) گشت می توان با اصلاح پارامترهای حفاری شرایط را بهینه کرد. در مبحث تخمین انرژی ویژه مکانیکی وابستگی انرژی به مقاومت تراکمی سنگ مشاهده و اثبات شد لذا باید ارتباط عکس آن نیز صادق باشد. یعنی انرژی مکانیکی ویژه نیز به عنوان نماینده پارامترهای حفاری می تواند نمایانگر مقاومت سنگ باشد و از آن برای تخمین مقاومت سنگ استفاده کرد. در صورت معتبر بودن این فرضیه، به دلیل اندازه گیری لحظه به لحظه پارامترهای حفاری توسط گروه نمودارگیری گل، در نتیجه محاسبه لحظه ای انرژی ویژه مکانیکی، امکان تخمین مقاومت تراکمی سنگ در حین حفاری^۱ و تغییر پارامترهای حفاری به سمت پارامترهای بهینه ممکن خواهد شد.

با انجام تحلیل عددی در قسمت حفاری کارآمد و مغزه گیری رابطه تخمین مقاومت تراکمی تک

^۱ Real-Time

محوره از انرژی ویژه به صورت زیر می باشد:

جدول ۴-۱۳ روابط تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس انرژی ویژه مکانیکی چاه A

رابطه	ضریب تعیین (R) (Square)	بازه	شماره رابطه	نوع حفاری
$UCS = -769274 + 14.018MSE + 192247\Delta P + 0.224FLOW$	۰/۴۶	کل بازه حفاری	(۴-۳۱)	حفاری کارآمد
$UCS = -1124883 + 281141\Delta P + 50.195MSE$	۰/۳۵	فقط قسمت بهینه	(۴-۳۲)	
$UCS = 54.265 + 7.212MSE$	۰/۳۶	کل بازه	(۴-۳۳)	مغزه گیری

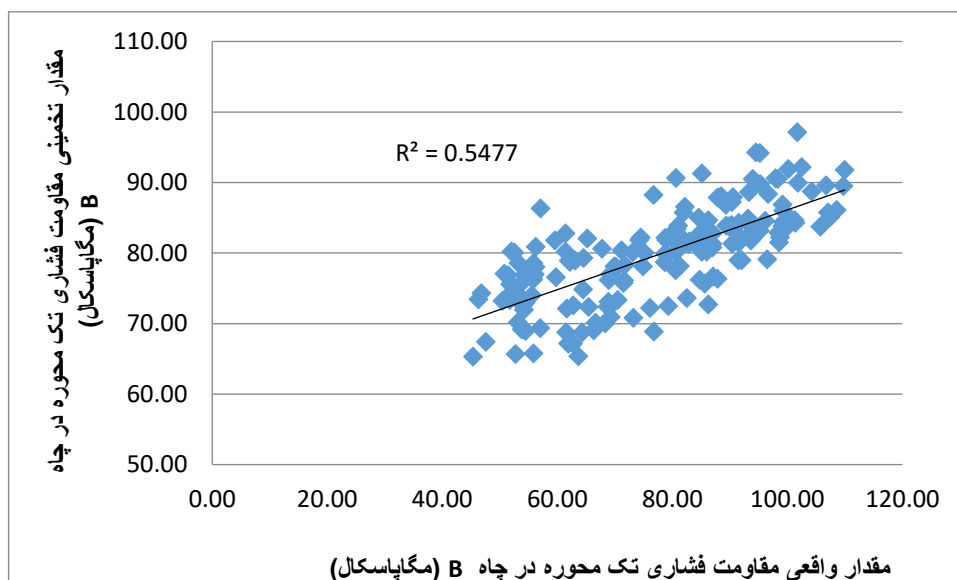
همان طور که مشاهده می شود روابط فوق از قدرت پیش بینی بالایی جهت تخمین مقاومت تراکمی سنگ برخوردار نیستند. همچنین ضرایب بزرگ رگرسیونی باعث زیاد شدن مقدار خطای پیش بینی می شود که این ضرایب بالا به دلیل وارد شدن پارامتر اختلاف فشار می باشد. لذا در مرحله بعد به جای استفاده از انرژی ویژه مکانیکی ارتباط مقاومت تراکمی با پارامترهای حفاری به صورت جداگانه بررسی که نتیجه آن در جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است:

جدول ۴-۱۴ روابط تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس پارامترهای حفاری در چاه A

رابطه جهت تخمین مقاومت تراکمی تک محوره	ضریب تعیین (R) (Square)	بازه	شماره رابطه	نوع حفاری
$UCS = \frac{84.14 * 10^{0.012 WOB}}{10^{(0.001 ROP)} * 10^{(0.039 TQ)}}$	۰/۷۳	کل بازه حفاری	(۴-۳۴)	حفاری کارآمد
$UCS = 61.999 + 2.232 * WOB - 0.478ROP$	۰/۵۲	فقط قسمت بهینه	(۴-۳۵)	
$UCS = 58.222 - 5.061ROP + 1.438WOB + 3.653TORQUE$	۰/۴۱	کل بازه	(۴-۳۶)	مغزه گیری

با مقایسه دو جدول بهبود قابل توجه دقت پیش بینی مقاومت تراکمی در حفاری کارآمد مشخص است که در مقایسه با مغزه گیری باید گفت چون در مغزه گیری تغییرات پارامترها تا حد ممکن کم شده است لذا نمی توان به پارامترهای حفاری به دید متغیرهای واقعی نگاه کرد زیرا در هر شرایطی پارامترها ثابت نگه داشته می شوند. ولی در حفاری کارآمد به محض کاهش نرخ حفاری تلاش برای افزایش آن از طریق تغییر پارامترها شروع می شود و اولین اقدام در این راستا افزایش وزن روی مته است که ضریب بتای $0/6$ و $0/78$ وزن روی مته به ترتیب در معادلات (۴-۳۴) و (۴-۳۵) نشان از اثرگذاری شدید وزن روی مته در پیش بینی هاست. همچنین در برخورد با سازند نرم اولین پارامتری که از کنترل خارج می شود نیز وزن روی مته است. نکته قابل توجه وارد شدن پارامتر دبی جریان در معادله مربوط به قسمت بهینه است که نشان دهنده تاثیر هیدرولیک حفاری در بهینه سازی شرایط حفاری است. در فرآیند استخراج روابط با رفتارهای متفاوتی برای پارامتر دبی پمپاژ مواجه می شویم که جهت تایید این تفاوت رفتاری باید گفت که در شرایط حفاری بهینه سازند حفاری شده از مقاومت تراکمی پائینی برخوردار بوده است که همین کم شدن ناگهانی مقاومت باعث کاهش فشار پمپاژ و در نتیجه افزایش دبی پمپاژ گل می شود در حالی که در کل بازه حفاری وجود مشکلات دیگری چون خرابی پمپها، بریدن رشته نیز باعث تغییر رفتار دبی پمپاژ می شود.

روند معمول اعتبار سنجی یک رابطه رگرسیونی آزمایش آن رابطه در شرایط مشابه است لذا با استفاده از رابطه (۴-۳۴) مقدار مقاومت فشاری تک محوره را در بازه ۲۹۸۰ تا ۳۳۰۰ متری چاه B که شرایط بسیار مشابه چاه A دارد محاسبه می شود. بر اساس شکل ۲۶-۴ مشخص می شود استفاده از رابطه ۴-۳۴، مقدار مقاومت فشاری تک محوره را در چاه B با دقت ۵۴ درصد پیش بینی میکند.



شکل ۲۶-۴ مقایسه مقدار واقعی و مقدار تخمینی مقاومت فشاری تک محوره در چاه B

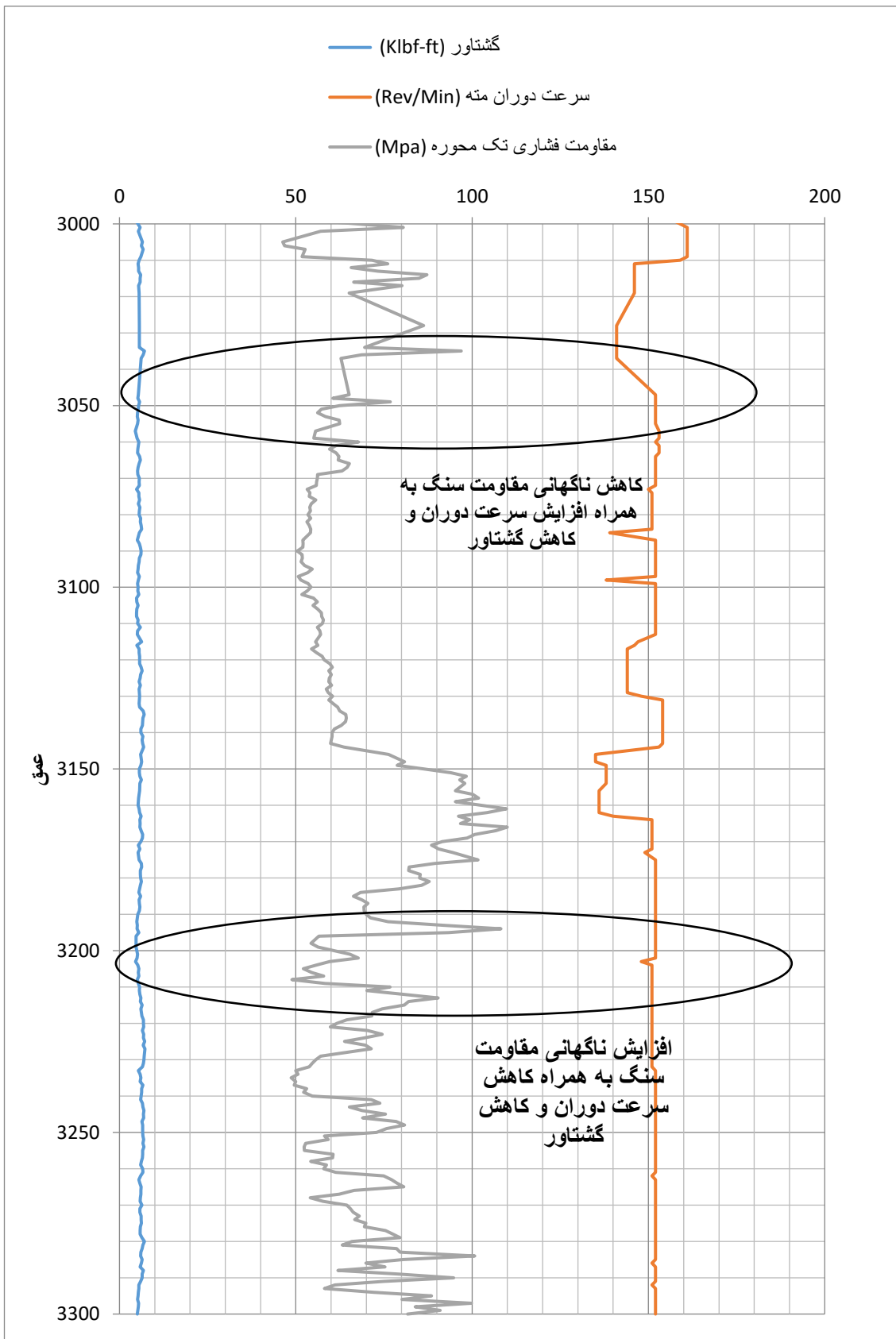
جهت افزایش دقت پیش بینی مقاومت فشاری در چاه B می توان با استفاده از داده های خود چاه روابطی استخراج نمود که روابط حاصل در جدول زیر آورده شده اند:

جدول ۱۵-۴ روابط رگرسیونی جهت پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره در چاه B

رابطه جهت تخمین مقاومت تراکمی تک محوره	ضریب تعیین (R Square)	شماره رابطه	نوع متغیر
$UCS = \frac{323.594 * 10^{0.074} MSE}{10^{0.0003} SPP}$	۰/۳	(۴-۳۷)	بر اساس انرژی ویژه
$UCS = \frac{101.32 * 10^{0.0045} WOB * 10^{0.106} Torque}{10^{0.006} ROP}$	۰/۶۶	(۴-۳۸)	بر اساس پارامترهای حفاری

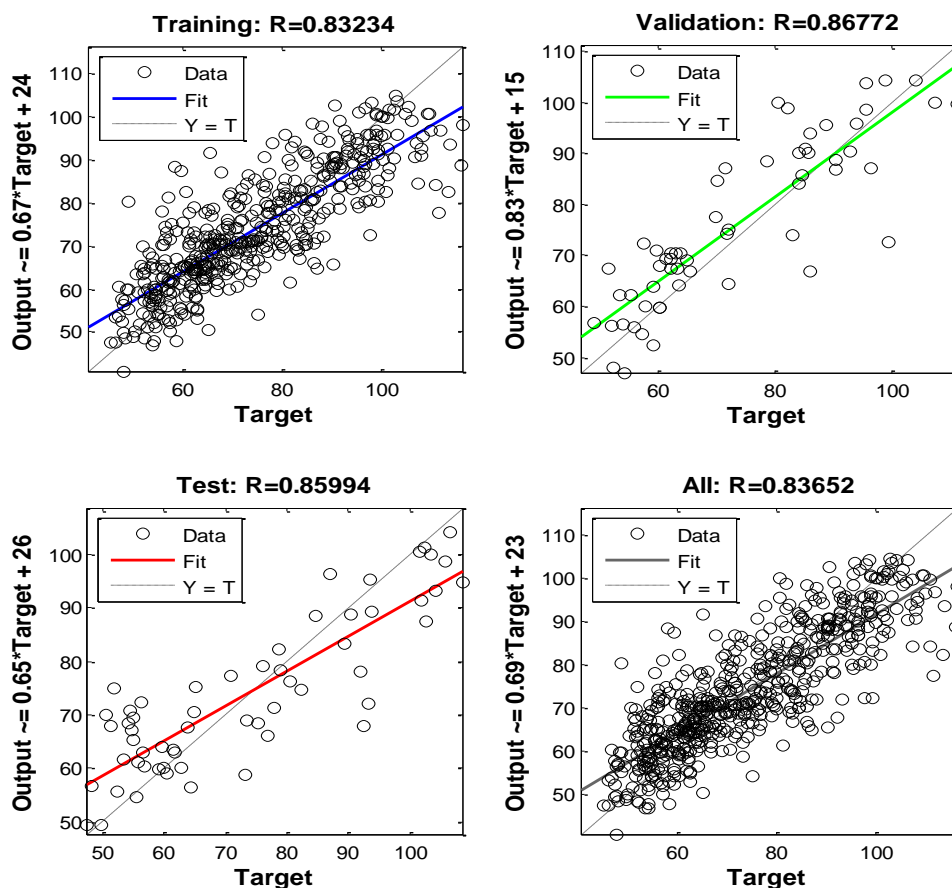
در تمامی رابطه بالا وزن روی مته بر حسب کیلوپوند، نرخ حفاری بر حسب فوت بر ساعت، گشتاور بر حسب کیلو پوند-فوت و مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگا پاسکال می باشد. نکته مهم در مقایسه روابط (۴-۳۴) و (۴-۳۸) استفاده هر دو رابطه از پارامترهای یکسان (وزن روی مته، نرخ حفاری و گشتاور) است که تشابه رفتاری را مشخص می کند. از سوی دیگر شاید کاهش دقت رابطه ۴-۳۴ در

پیش بینی را بتوان به تفاوت علامت و رفتار پارامتر گشتاور در دو رابطه نسبت داد که در رابطه مربوط به چاه A علامت منفی و در چاه B علامت مثبت دارد. لذا در استفاده از هر کدام از رابطه ها جهت پیش بینی در چاه دیگر گشتاور موجب دور شدن از مقدار واقعی و در نتیجه ایجاد خطا و کم شدن ضریب تعیین معادله می شود. جهت تشریح این مسئله که کدام رفتار گشتاور منطقی است با بررسی نمودار تغییرات مقاومت فشاری، گشتاور و سرعت چرخش مته (شکل ۲۷-۴) می توان نتیجه گرفت که حین تغییر سازند از سازند سخت به نرم به دلیل کم شدن ناگهانی نیروی سایشی مقاوم در برابر چرخش مته به طور ناگهانی کم می شود لذا مته با سرعت بیشتر و اصطکاک کمتر به چرخش ادامه می دهد، در نتیجه سرعت دوران زیاد و گشتاور کم می شود. با ادامه کار به دلیل سست بودن سازند نرخ حفاری و حجم کنده ها افزایش یافته و در نتیجه گشتاور وارد بر رشته زیاد می شود. در نتیجه در مقاومت فشاری کم، کاهش و افزایش گشتاور با هم اتفاق می افتند. عکس این حالت در هنگام تغییر سازند از نرم به سخت نیز اتفاق می افتد. همچنین تغییرات اعمالی سرعت دوران رشته توسط حفار در این گونه مواقع بسیار بر گشتاور ثبت شده موثر است. علاوه بر این ها توانایی حمل کنده ها بر اساس نرخ حفاری جدید نیز بر مقدار و روند تغییرات گشتاور موثر می باشد که نقش هیدرولیک حفاری را مشخص می کند. لذا با جمع بندی این مطالب می توان گفت هر دو معادله و هر دو علامت گشتاور در جای خود صحیح هستند و جهت استفاده در چاه دیگر باید ضریب تصحیح بر آن وارد شود. جهت یافتن مقدار ضریب تصحیح نیاز است تا مقدار واقعی گشتاور اعمالی در ته چاه اندازه گیری شود و همچنین پرسنل حفاری نیز رفتار مشابهی نسبت به اعمال تغییرات از خود نشان دهند که متاسفانه در این تحقیق به دلیل در اختیار نداشتن چنین امکاناتی یافتن ضریب تصحیح مقدور نیست.

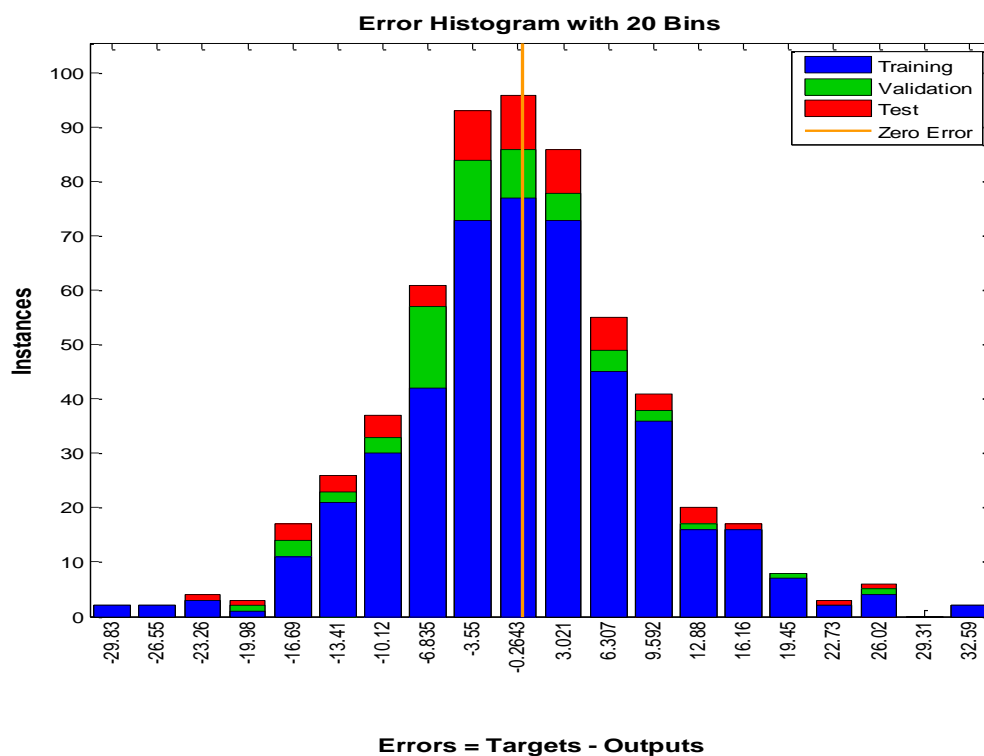


شکل ۲۷-۴ تغییرات گشتاور و سرعت دوران در هنگام تغییر مقاومت فشاری سازند

با استفاده ترکیبی از داده های نرخ حفاری، گشتاور و وزن روی مته ابزار شبکه عصبی جهت پیش بینی مقدار مقاومت فشاری تک محوره اجرا شد که همانند روابط رگرسیونی حاصل دقت پیش بینی ها کمتر از دقت پیش بینی انرژی ویژه مکانیکی است. نتایج اجرای شبکه عصبی با ۱۵ لایه میانی در شکل های زیر نشان داده است که شبکه عصبی توانسته است با استفاده از ورودی های وزن روی مته، نرخ حفاری و گشتاور دو چاه و انتخاب تصادفی داده ها از هر دو چاه مقدار مقاومت فشاری را با ضریب همبستگی ۰/۸۴ پیش بینی کند. همان طور که در شکل ۲۹-۴ مشخص است تمرکز مقدار خطای پیش بینی در اطراف مقدار کمینه است که نشان از قدرت مناسب مدل در تخمین پارامتر وابسته دارد.



شکل ۲۸-۴ نتیجه رگرسیون پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره در دو چاه



شکل ۲۹-۴ فراوانی خطای پیش بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین مقاومت فشاری تک محوره در دو

چاه

با مقایسه نتایج حاصل از رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی، دقت بیشتر شبکه عصبی در تخمین مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ مشخص می باشد و می توان حین حفاری با استفاده از این مدل، تغییرات مقاومتی سازند را بررسی و پارامترهای حفاری را منطبق با خواص سنگ تنظیم نمود.

۴-۷ جمع بندی

در ابتدای این فصل بیان شد که انرژی ویژه مکانیکی یکی از معیارهای سنجش بازدهی عملیات حفاری است که می توان با پیدا کردن حالت بهینه آن با کمترین صرف انرژی بیشترین نرخ حفاری را کسب نمود. جهت محاسبه انرژی ویژه مکانیکی به داده های حفاری نیاز است که توسط واحد نمودارگیری گل ثبت می شوند.

در این تحقیق دو چاه با شباهت های زمین شناسی فراوان و همچنین شباهت عملیات حفاری انجام شده جهت بررسی سازند سروک انتخاب شدند. در ابتدا به معرفی چاه ها و تحلیل کیفی داده های حفاری پرداخته شد. بیان شد که در چاه A بخش عمده ای به صورت حفاری مغزه گیری انجام شده است و در عملیات مغزه گیری پارامترهای حفاری به صورت کنترل شده است که باعث افزایش مقدار انرژی ویژه می شود. با بررسی پارامترهای مورد استفاده در دو چاه مشخص شد حداقل مقدار انرژی ویژه در دو حالت اتفاق می افتد: اول در سازند نرم و دوم در حالتی که پارامترهای حفاری بهینه باشد. همچنین مشخص شده بازه وزنی ۱۸ تا ۲۰ کیلوپوند می تواند وزن ایده الی جهت حفاری باشد. متأسفانه به دلیل تغییرات نامناسب دبی پمپاژ و سرعت دوران رشته امکان یافتن مقدار بهینه این دو پارامتر وجود نداشت.

در حفاری مغزه گیری مشخص شد روند تغییرات انرژی ویژه مصرفی بسیار وابسته به مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. در بحث تحلیل عددی ابتدا رابطه بین انرژی ویژه و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بررسی شد که انرژی ویژه به پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و عمق وابسته بود که رابطه حاصل در چاه A و B به ترتیب ضریب تعیین ۰/۷ و ۰/۶۲ دارد. در این رابطه عمق نماینده تنش های برجا به شمار می رود.

مقادیر انرژی ویژه مکانیکی با استفاده از داده های سطحی پارامترهای حفاری محاسبه شده اند و به همین دلیل مقدارشان بسیار بیشتر از مقدار واقعی می باشد. علاوه بر پارامترهای ژئومکانیکی ارتباط انرژی ویژه با نگاره های پتروفیزیکی نیز بررسی گردید که مشخص شد در حالت حفاری کارآمد بهترین رابطه پیش بینی متشکل از پارامترهای ژئومکانیکی و در حفاری مغزه گیری پیش بینی با استفاده از نگاره های پرتو گاما، سرعت موج برشی و چگالی نتیجه مناسبتری می دهد. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی سعی در بهبود رابطه پیش بینی کننده گردید.

جهت استفاده کاربردی از روابط به دست آمده نمودار انرژی ویژه بر حسب نرخ حفاری رسم

گردید و برای هر دو چاه مقادیر انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگا پاسکال به عنوان حفاری بهینه در نظر گرفته شد. در چاه های مورد بررسی به دلیل اعمال پارامترهای نامناسب نرخ حفاری با افزایش وزن روی مته کاهش یافته است.

اگر بتوان با استفاده از انرژی ویژه مکانیکی، مقدار مقاومت فشاری سنگ را حین حفاری به دست آورد می توان در انتخاب مته های آینده و هم چنین اعمال پارامترهای حفاری بهینه دقت بیشتری نمود. لذا به بررسی ارتباط انرژی ویژه با مقاومت فشاری تک محوره پرداخته شد که رابطه عددی حاصل قدرت پیش بینی بالایی نداشت. ولی با در نظر گرفتن پارامترهای حفاری به صورت جداگانه، روابطی برای پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس وزن روی مته، گشتاور و نرخ حفاری در هر دو چاه با ضریب تعیین های ۰/۷۳ و ۰/۶۶ به دست آمد. متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به داده های ته چاهی و همچنین اعمال سلیقه های مختلف انسانی حین حفاری، استفاده از رابطه پیش بینی کننده مختص چاه A در پیش بینی مقاومت فشاری چاه B با کاهش دقت پیش بینی همراه است و نیاز به وارد کردن یک ضریب تصحیح در محاسبات دارد.

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ جمع بندی و نتیجه گیری

- حفاری چاه نفت پرهزینه ترین بخش بالادستی توسعه نفت و گاز است و باید تلاش شود با هر وسیله و علم ممکن هزینه و زمان حفاری کاهش یابد. متداول ترین روش حفاری، حفاری دورانی است که در آن رشته حفاری توسط کلی^۱ یا گرداننده فوقانی^۲ چرخانده می شود.
- مته حفاری به عنوان ابزار برش سنگ به وسیله نیروی فشاری و جانبی سعی در غلبه بر مقاومت فشاری و برشی سنگ دارد که مته های کاج دار از مکانیزم فشاری و مته های تیغه ثابت عموماً از مکانیزم شکست برشی استفاده می کنند. از آنجا که مقاومت برشی سنگ کمتر از مقاومت فشاری آن است، معمولاً نرخ نفوذ حفاری با استفاده از مته های تیغه ثابت بیشتر است.
- پارامترهای مهم در انتخاب مته شامل هزینه و پارامترهای مقاومتی سنگ همچون مقاومت فشاری و سختی سنگ و سیال حفاریست. در صنعت متداول ترین راهنمای انتخاب مته جداولی هستند که انجمن بین المللی پیمانکاران حفاری ارائه نموده است.
- انرژی ویژه مکانیکی در واقع کمی کردن انرژی مصرفی جهت خردایش واحد حجمی سنگ است و به عنوان یک معیار سنجش بازدهی عملیات حفاری به کار می رود. در واقع هنگامی حفاری بهینه است که تمامی انرژی مصرفی در جهت خرد کردن سنگ و غلبه بر مقاومت سنگ به کار برود و هدر نرود. پس باید مقدار کمینه انرژی ویژه حاصل شود.
- قدم اول برای هرگونه مطالعه ژئومکانیکی ساخت مدل ژئومکانیکی است. مدل ژئومکانیکی یک نمایش عددی از وضعیت تنش های برجا و خواص مکانیکی برای یک ستون چینه شناسی در یک میدان است. در این تحقیق با استفاده از روابط ارایه شده حاصل از تست های آزمایشگاهی بر روی مغزه، مدل ژئومکانیکی کالیبره گردید.

^۱ Kelly

^۲ Top Dirve

- جهت محاسبه مقادیر دینامیک خواص ژئومکانیکی نیاز به داده های سرعت موج برشی است که این نگاره در هر میدان در تعداد معدودی چاه موجود است. لذا با در دست داشتن داده های سرعت موج برشی در چاه A دو رابطه رگرسیونی، با استفاده از سرعت موج فشاری و چگالی، جهت پیش بینی سرعت موج برشی با ضریب تعیین ۰/۹۲ (رابطه ۵-۱) و ۰/۹۱ (رابطه ۵-۲) به دست آمد و سرعت موج برشی در چاه دوم با استفاده از رابطه ۵-۱ تخمین زده شد. روابط مورد نظر به صورت زیر می باشند:

$$DTS = 7.808 + 3.616DTC + 0.014DTC^2 + 16.653 RHOB \quad (5-1)$$

$$DTS = -54.006 + 3.729DTC - 0.0154DTC^2 \quad (5-2)$$

- جهت تخمین فشار منفذی از روش گرادیان سیال استفاده و با استفاده از نتایج تست MDT کالیبره گردید. کالیبراسیون مدل ژئومکانیکی با استفاده از معیارهای شکست موهر-کولومب و موگی-کولومب انجام شد که معیار موگی-کولومب دقت بیشتری در پیش بینی شکستگی های برشی نشان می دهد.

- جهت محاسبه انرژی ویژه مکانیکی ابتدا داده های حفاری مورد نیاز در دو چاه جمع آوری و دسته بندی و مقیاس داده ها جهت هماهنگی با داده های نگاره های پتروفیزیکی اصلاح شد. زیرا داده های پتروفیزیکی در فواصل ۱۵ سانتیمتر ولی داده های حفاری در فاصله های زمانی ثانیه ای ثبت شده بودند. به دلیل همگن بودن لیتولوژی سازند هر دو دسته داده در فواصل یک متر بررسی گردید. نکته مهم دقت در کنار گذاشتن داده های نامتجانس دارد که هیچ توجیه فنی ندارد لذا باید با دید عملیاتی به داده ها نگریست تا از بروز خطا جلوگیری شود.

- شباهت دو چاه از نظر سازند و لیتولوژی و ابزار مورد استفاده حفاری تا حد زیادی می تواند به

قابل اعتماد بودن نتایج کمک کند. در این تحقیق در هر دو چاه سازند مورد نظر، لایه سروک و لیتولوژی غالب سنگ آهک با میان رگه های رس می باشد. اعماق مورد بررسی در زمینه حفاری کارآمد از ۲۹۸۰ تا ۳۳۰۰ متری می باشد.

- حفاری یکی از چاه ها به دو قسمت حفاری کارآمد و حفاری مغزه گیری تقسیم شده است که در حفاری کارآمد هدف به حداقل رساندن زمان حفاری، ولی در مغزه گیری هدف کاهش ریسک عملیاتی و افزایش کیفیت مغزه به دست آمده است. پارامترهای حفاری مورد استفاده در دو حالت بسیار متفاوتند. حفاری مغزه از عمق ۲۹۰۷ تا ۲۹۷۷ متری در چاه A انجام شده است.

- با تحلیل کیفی داده های حفاری مشخص شد در دو حالت انرژی ویژه در حالت کمینه قرار داشته است: (۱) هنگام حفاری سازند با مقاومت فشاری کم (۲) هنگام اعمال پارامترهای حفاری مناسب که نرخ حفاری افزایش یافته است. از آنجا که در اکثر مواقع حفاری دبی پمپاژ گل حفاری و سرعت دوران رشته ثابت است (یا در صورت تغییر یکی، دیگر پارامترهای حفاری نیز تغییر یافته است) لذا یافتن مقدار بهینه این دو پارامتر میسر نبود ولی مشخص شد در محدوده وزن روی مته ۱۸-۲۰ کیلو پوند نرخ حفاری با افزایش و انرژی ویژه با کاهش زیاد مواجه می شود.

- توازن مناسبی بین مقاومت فشاری تک محوره و وزن روی مته اعمالی مشاهده می شود.
- به دلیل کنترلی بودن شرایط حفاری در مغزه گیری، مقدار انرژی ویژه مصرفی در این حالت بیشتر از حفاری کارآمد است. همچنین در دو حالت به دلیل استفاده از مقادیر سطحی پارامترهای حفاری انرژی ویژه مکانیکی محاسبه شده بسیار بیشتر از مقدار واقعی و ته چاهی آن است.

- بعد از مطالعه تحقیقات محققان پیشین سعی شد رابطه ای عددی بین انرژی ویژه مکانیکی و خواص سنگ به وجود آید. با انجام تحلیل های آماری مشخص شد انرژی ویژه مکانیکی با

عمق و مقاومت فشاری تک محوره رابطه مستقیم و با نسبت پواسون ارتباط عکس دارد. در این رابطه عمق به عنوان نماینده تنش های برجا در نظر گرفته می شود. روابط رگرسیونی ۵-۳ و ۴-۵ با دقت ۷۰ و ۶۲ درصد به ترتیب جهت چاه های A و B حاصل شدند.

$$MSE = \frac{0.000163 \times 10^{0.006*UCS} \times 10^{0.001*Depth}}{10^{1.51PR}} \quad (5-3)$$

$$MSE = \frac{0.117382 \times 10^{0.007971*UCS} \times 10^{0.000442*Depth}}{10^{3.8736*PR}} \quad (5-4)$$

- در روش دوم جهت تخمین انرژی ویژه مکانیکی از نگاره های پتروفیزیکی استفاده گردید. با مقایسه روابط، استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی جهت تخمین در قسمت حفاری کارآمد و استفاده از نگاره ها در حفاری مغزه گیری پیشنهاد می شود. روابط ۵-۵، ۵-۶ و ۵-۸ به ترتیب برای حفاری A، مغزه گیری چاه A و حفاری چاه B دارای ضریب تعیین ۰/۳۸، ۰/۶۷ و ۰/۴۲ می باشند.

$$MSE = \frac{62.81 \times 10^{0.007*GR}}{10^{0.006 DTS} \times 10^{0.113 Caliper} \times 10^{NPHI}} \quad (5-5)$$

$$MSE = 0.00872 \times \frac{10^{(1.2152RHOB+0.0089 GR)}}{10^{0.0055 DTS}} \quad (5-6)$$

$$MSE = \frac{3.069}{10^{1.74*NPHI}} \quad (5-7)$$

- استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل های رگرسیونی دقت بالاتری در پیش بینی مقدار انرژی ویژه از خود نشان داد.

- جهت استفاده کاربردی از روابط به دست آمده نمودار انرژی ویژه بر حسب نرخ حفاری رسم گردید که مشخص گردید که در هر دو چاه در حالتی که مقدار انرژی ویژه کمتر از ۲ گیگاپاسکال می شود حفاری بهینه می شود. در چاه های مورد بررسی به دلیل اعمال

پارامترهای نامناسب نرخ حفاری با افزایش وزن روی مته کاهش یافته است.

- هدف اولیه انجام تحقیق استفاده از انرژی ویژه مکانیکی جهت تخمین خواص ژئومکانیکی سنگ به خصوص مقدار مقاومت فشاری سنگ در حین حفاری است که می تواند در انتخاب مته های آینده و هم چنین اعمال پارامترهای حفاری بهینه کمک نماید. لذا به بررسی ارتباط انرژی ویژه با مقاومت فشاری تک محوره پرداخته شد که رابطه عددی حاصل قدرت پیش بینی بالایی نداشت. ولی با در نظر گرفتن پارامترهای حفاری به صورت جداگانه، روابطی برای پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس وزن روی مته، گشتاور و نرخ حفاری در هر دو چاه حاصل شدند که طبق روابط ۵-۸ و ۵-۹ ضریب تعیین آن ها برای چاه های A و B به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۶ می باشد.

$$UCS = \frac{84.14 * 10^{0.012 WOB}}{10^{(0.001 ROP)} \times 10^{(0.039 TQ)}} \quad (5-8)$$

$$UCS = \frac{101.32 * 10^{0.0045 WOB} * 10^{0.106 Torque}}{10^{0.006 ROP}} \quad (5-9)$$

- متأسفانه به دلیل عدم کیفیت داده ها، عدم دسترسی به داده های ته چاهی و همچنین اعمال سلیقه های مختلف انسانی جهت حفاری، استفاده از رابطه پیش بینی کننده مختص چاه A در پیش بینی مقاومت فشاری چاه B، با کاهش دقت پیش بینی همراه است و نیاز به وارد کردن یک ضریب تصحیح در محاسبات دارد.
- استفاده از شبکه عصبی دقت پیش بینی را تا حد زیادی بالا برد. لذا حین حفاری سازند سروک در محدوده ۲۹۸۰ تا ۳۳۰۰ متری این میدان می توان با استفاده از پارامترهای وزن روی مته، نرخ حفاری و گشتاور تخمین مناسبی از مقاومت فشاری تک محوره سنگ به دست آورد. با در دست داشتن راهنمای استفاده از مته می توان از پارامترهای حفاری را متناسب با مقاومت تخمینی سنگ اصلاح و بهینه سازی نمود.

۲-۵ پیشنهادات

- با توجه به اینکه تنش افقی حداقل تاثیر زیادی روی شکست سنگ دارد، استفاده از روش های اندازه گیری مستقیم چون Leak Off Test می تواند اعتبار مدل را دو چندان کند (هر چند در اینجا تنش های افقی درجا به صورت غیر مستقیم کالیبره شد).
- مدل های شکست سنگ همه شکستگی ها را پیش بینی نمی کنند و شاید لازم است با ترکیب معیار های شکست دقت مدل ژئومکانیکی را افزایش داد.
- در چاه های آینده اثر وجود یا عدم وجود درزه بر مقادیر انرژی ویژه مکانیکی بررسی شود.
- لازم است جهت بررسی تاثیر دقیق هر پارامتر در هر چاه و به طور سیستماتیک Drill-Off Test انجام شود تا رابطه نهایی پارامترهای حفاری با انرژی ویژه مکانیکی کاملا مشخص شود.
- جهت افزایش دقت تخمین ها باید خطاهای ناشی از عامل انسانی را تا حد ممکن کم کرد زیرا تفاوت رفتاری پرسنل حفاری در برخورد با تغییرات سازند تاثیر کاملا مستقیم بر مقدار انرژی ویژه محاسباتی دارد که باعث کاهش دقت پیش بینی می شود.
- در تحقیقات آینده می توان تاثیر نوع مته مورد استفاده و میزان فرسوده بودن مته را بر انرژی ویژه مطالعه نمود.
- بهتر است این تحقیق در دیگر سازندها و لیتولوژی های مختلف انجام شود. به خصوص در سازندهای مخزنی که لیتولوژی مشابه با سنگ شناسی قسمت اول چاه^۱ دارند زیرا در قسمت های بالایی چاه به دلیل نبود نگاره های پتروفیزیکی اطلاعات دقیقی از خواص سنگ وجود ندارد و به همین دلیل حفاری این قسمت با مشکلات پایداری چاه مواجه است.

^۱ Top Hole

منابع

اسرار دل م. (۲۰۱۵) پایان نامه کارشناسی ارشد "پیش بینی احتراق دینامیک در محفظه احتراق آزمایشی با گرداب های متلاطم پایدار شده همراه با تزریق سوخت ثانویه" دانشگاه تهران.

رحمانی ع. ا. (۱۳۸۹) "فیزیک سنگ" شرکت ملی نفت ایران.

صائمی م. و کریمی غ. (۱۳۹۲) "تعیین گرادیان فشار منفذی، فشار شکست و فشار روباره در یکی از میادین جنوب غرب ایران" اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت.

نوروزی بزمین آبادی س. (۱۳۹۳) پایان نامه ارشد "بررسی تاثیر پارامترهای مکانیک سنگ مخزن بر روی نرخ نفوذ حفاری در یکی از میادین نفتی شرکت مهندسی توسعه نفت" دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Adams N. J. (1985) "**Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach**" PennWell Publishing Company.

Afsari M., Amani M., Razmgir S. M., Karimi H. and Yousefi S. (2010) "Using Drilling and Logging Data for Developing 1D Mechanical Earth Model for a Mature Oil Field to Predict and Mitigate Wellbore Stability Challenges" Pp. 1-12 for presentaion at the CPS/SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.

Akbari B., Miska S. and Ozbayoglu M. (2014) "Experimental Investigations of the Effect of the Pore Pressure on the MSE and Drilling Strength of a PDC Bit" Pp. 1-9 for Presentaion at the SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers.

Al-Ajmi A. and Zimmerman R. (2006) "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43., 1200–1211.

Alkaabi A. (2003) "Stimulate the flow" Schulmberger Middle East & Asia Reservoir Review.

Allison P. D. (1999) "**Multiple Regression: A Primer**" Pine Forge Press.

Al-Wardy W. and Urdaneta O. P. (2010) "Geomechanical Modelling for Wellbore Stability during Drilling Nahr Umr Shales in a Field in Petroleum Development Oman." Pp. 1-11 in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Society of Petroleum Engineers.

Ameen M. S., Smart B. G. D., Somerville J. Mc., Hammilton S. and Naji N. A. (2009) "Predicting Rock Mechanical Properties of Carbonates from Wireline Logs (A Case Study: Arab-D Reservoir, Ghawar Field, Saudi Arabia)" Marine and Petroleum Geology. pp. 1-15.

Archer S. and Rasouli V. (2012) "A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin." Pet. Miner. Resour. 81, 163-174.

Armenta M. (2008) "Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling Specific Energy" Pp. 1-16 for presentation at the 2008 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver. Society of Petroleum Engineers.

Balci C. (2004) "Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance" The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 633-642.

Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. (1986) "**Applied Drilling Engineering**" Society of Petroleum Engineers.

Castagna J. P., Batzle M. L. and Eastwood R. L. (1985) "Relationship Between Compressional-wave and Shear Wave Velocities in Clastic Silicate Rocks" Geophysics. 50 (4): 571-581. Society of Exploration Geophysicists.

Castagna J. P., Batzle M. L. and Kan T. K. (1993) "Rock physics-the link between rock properties and AVO response. In offset-dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis" Pp. 135-171, Society of Exploration Geophysicists.

Chang Ch., Zoback M. D. and Khaksar A. (2006) "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks" Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 51: Pp. 223-237. Elsevir.

Chardac O., Murray D., Carnegi A. and Marsedn J. R. (2005) "A Proposed Data

Acquisition Program for Successful Geomechanics Projects" Pp. 1-16 for presentaion at the 14th SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers.

Chen. Xu, Honghai. F, Boyun.G, Gao. D, Wei. Ho, Zhi .Ye. (2014) "Real-Time Prediction and Optimization of Drilling Performance Based on a New Mechanical Specific Energy Model". Arab J. Sci Eng. 39:8221–8231.

Detournay. E and Chee P. T. (2002) "Dependence of Drilling Specific Energy on Bottom-Hole Pressure in Shales" Society of Petroleum Engineers.

Eissa. A, Kazi. A. 1988." Relation between statics and dynamic Young`s moduli of Rocks." Internatonal Journal of rock mechanics and mining Science and geomechanics abstracts: 479-482.

Eskandari H., Rezaee M., Javaherian A. and Mohammadnia M. (2003) "Shear Wave Velocity Estimation Utilizing Wireline Logs for a Carbonate Reservoir, South-West Iran." Iranian Int. Journal of Science. 4(2):209–21.

Fjaer E., Holt R.M., Hordurt P., Raeen A.M. and Risnes R. (2008) "**Petroleum Related Rock Mechanics**" Elsevier.

Freeman M. A., Shen Y. and Zhang Y. (2012) "Single PDC Cutter Studies of Fluid Heat Transfer and Cutter Thermal Mortality in Drilling Fluid" Pp. 1-8 for presentaion at the 2012 AADE National Technical Conference and Exhibition, American Association of Drilling Engineers.

Hamrick T. R. (2011) "Optimization of Operating Parameters for Minimum Mechanical Specific Energy in Drilling" PHD Thesis, West Virginia University.

Han G., Bruno M. & Lao Kh. (2005) " Percussion Drilling in Oil Industry: Review and Rock Failure Modelling" Pp: 1-10 for presentaion at the AADE 2005 NTCE, Held at Texas, American Association of Drilling Engineers.

Huang S. L. and Wang Z. W. (1997) "The Mechanics of Diamond Core Drilling of Rocks" Int. J. Rock Mech. & Mm. Sci. 34:3-4, Paper No. 134, Elsveir.

Hudson J. A. and Harrison J. P. (2003) "**Engineering Rock Mechanics: An Introduction to Principles**" University of London, Pergamon.

Johnson D. E. and Pile K. E. (2002) "**Well Logging in Nontechnical Language**" Pennwell.

Kahraman, S., Bilgin, N. and Feridunoglu, C. (2003) "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40: 711-723. Elsevier.

Kassab M. A. and Weller A. (2013) "Porosity Estimation from Compressional Wave Velocity: A study based on Egyptian Carbonate Sample" *Journal of Earth Science and Engineering*. 3: 314-321. David Publishing.

Kerkar P. B., Hareland G., Fonseca E. R. and Hackbarth C. J. (2014) "Estimation of Rock Compressive Strength using Downhole WOB and Drilling Models" Pp. 1-12, for presentation at the IPTC, Doha.

Koederitz W. L. and Weis J. (2005) "A Real-Time Implementation of MSE" Pp. 1-8 for presentation at the AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition, American Association of Drilling Contractors.

Lal M. (1999) "Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength" Pp. 1-10 for presentation at the 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Society of Petroleum Engineers.

Majidi R., Albertin M. and Last N. (2017) "Pore-Pressure Estimation by use of Mechanical Specific Energy and Drilling Efficiency" Pp. 1-8 for presentation at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition held in Texas, Society of Petroleum Engineers.

Maurer W. C. (1965) "Bit-Tooth Penetration Under Simulated Borehole Conditions" Pp. 1433-1442, *Journal of Petroleum Technology*, December.

Mohammadi B. M., Ramezanzadeh A. and Tokhmechi B. (2016) "Studying empirical correlation between drilling specific energy and geo-mechanical parameters in an oil field in SW Iran" *Journal of Mining & Environment*. DOI: 10.22044/jme.2016.689.

Moore P. L. (1986) "**Drilling Practices Manual**" PennWell Publishing Company.

Nguyen J. P. (1996) "**Drilling: Oil and Gas Field Development Techniques**" Technip.

NIOC (2014) "Front End Engineering Design" NIOC.

Osquye R. E. (2007) "Rate of Penetration Estimation Model for Directional and Horizontal Wells" Petroleum and Natural Gas Engineering Department, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University.

Paithankar A. G. and Misra G. B. (1976) "A Critical Appraisal of the Protodyakonov index" Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.. Vol. 13: 249-251. Pergamon Press.

Pessier R. C. and Fear M. J. (1992) "Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction" Pp. 1-16 for presentation at the 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Washington. - Washington D. C. Society of Petroleum Engineers.

Pickett G. R. (1963) "Acoustic character logs and their applications in formation evaluation" Journal of Petroleum Technology. 659-667.

Pinto C. N. and Lima A. L. P. (2016) "Mechanical Specific Energy for Drilling Optimization in Deepwater Brazilian Salt Environments" Pp. 1-17, for presentation at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore, SPE.

Rashidi B., Hareland G. and Nygard R. (2008) "Real-Time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts" paper for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 3rd – 6th November Society of Petroleum Engineers.

Rasouli V., Pallikathakathil and Elike (2010) "Optimum Well Trajectory Design in a Planned well in Blacktip Field, Australia: a case study" APPEA, 50th Anniversary issue: 535-548.

Reddish D. J. and Yasar E. (1996) "A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling" Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 33.:543-548. Pergamon.

Sarmadivaleh M. and Rasouli V. (2010) "Simulation of hydraulic fracturing in tight formations" APPEA, 50th Anniversary issue: 581-591.

Schlumberger (2005) "Bits and Hole Making" Schlumberger.

Shewalla M. and Smith J. R. (2015) "Measure of Specific Energy During Drilling of Rocks" EJGE. Vol. 20: 6675-6686.

Smith Bits Co. (2002) "Introduction to PDC Bits" Smith International Inc.

Teale R. (1965) "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling" Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 2: 57-73. Pergamon.

Walker D. R. & Shaw M. C. (1954) "Mining Engng 6" Pp. 313-20.

Tuna E., Mehmet E. O. (2010) "Real-Time-Optimization of drilling parameters during drilling operations." SPE Oil and gas India conference and exhibition. Mumbai India: SPE.

Waughman R. J., Kenner J. V. and Moore R. A. (2003) "Real-Time Specific Energy monitoring Enhances the understanding of when to pull worn PDC bits" Pp. presented at IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, SPE.

Wei M., Li G., Shi H., Li Zh & Zhang Y (2016) "Theories and Applications of Pulsed-Jet Drilling with MSE" Pp. 1-8. Society of Petroleum Engineers.

Yale D. P. and Jamieson, Jr. W. H. (1994) "Static and Dynamic Rock Mechanical properties in the Hugoton and Panama fields" Rock Mechanics:463-471. ISBN 90 5410 380 8 .

Zhang J. (2011) "Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches" Earth Science Reviews. Vol. 108: 50-63. Elsevier.

Zhou Y., Zhang W., Gamwo I. K., Lin J. S., Eastman, Harvey, Gill, Magdalena, Whipple and Gordon "Mechanical Specific Energy Versus Depth of Cut" Pp. 1-6 paper was prepared for presentation at the 46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association,

Zoback M., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A. and Finkbeiner T.F. (2003) "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 1049–1076.

Zoback M.D (2007) "**Reservoir Geomechanics**" Paperback edition. New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-14619-7.

Abstract

Drilling oil and gas wells are among the most challenging and expensive rock works that affecting parameters include: geology formation, drilling technology & human factor. So it is essential to find a way to predict rock properties and analyze operation performance. Formation is the place where bit encounter rock so it is necessary to know it better by measure/estimate geomechanical properties of rock.

Calculation of Mechanical Specific Energy (MSE) is the method that is used in this research to measure operation performance. MSE is energy required to remove one unit volume of rock that has to be minimized to increase performance. MSE value is calculated using weight on bit, penetration rate, torque and string rotation speed.

In this research initially made comprehensive data base by collecting drilling data, petrophysical logs and results of core lab tests. Using logs dynamic 1-D geomechanical model built and calibrated using core data. Testing model to predict breakout observed in borehole confirmed its applicability. MSE is calculated for interval. Quantitative analysis of data showed in performance drilling interval specific energy has good correlation with UCS, Poisson's Ratio and depth. Also main parameter affecting MSE in coring operation is UCS. So by changing plan found that it is better to correlate MSE with petrophysical logs including density, shear wave slowness and GR for coring. In all stages analysis made using statistical regression and Neural Networks (NN) that NN gives better results.

Optimized drilling condition occurred in ROP greater than about 17 ft. /hr. & MSE less than 2 GPa. So using N.N. to predict UCS based on inputs (ROP, WOB and TQ.) can give real-time estimation of UCS and enable driller to adjust drilling parameters to UCS and reach optimum drilling condition.

Keywords: Mechanical Specific Energy, Geomechanical Properties, Multiple Regressions, Neural Network, Optimization.



Shahrood University of Technology

Faculty of mining, petroleum and geophysics engineering

MSc Thesis in petroleum engineering drilling and production

Impacts of some Reservoir Geomechanical Properties on Mechanical Specific Energy in Oil Well Drilling - A Case Study: Two Oil Wells in South-West of Iran

By: Mohammad Teimuri

Supervisors:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Dr. Behzad Tokhmechi

September 2017