



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایاننامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن بر پارامترهای عملیاتی حفاری در تعدادی از چاههای

یکی از میادین جنوب غرب کشور

محمدرضا دلاور خشكلات

استاد راهنما:

دكتر احمد رمضانزاده

استاد مشاور:

دکتر بهزاد تخمچی

تیر ۱۳۹۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: مهندسی مکانیک سنگ

پایان نامهی کارشناسی ارشد آقای مهندس محمدرضا دلاور خشکلات

تحت عنوان: تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن بر پارامترهای عملیاتی حفاری در

تعدادی از چاههای یکی از میادین جنوب غرب کشور

در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۱۶ توسط کمیتهی تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با

امضاء	اساتيد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	دکتر بهزاد تخمچی		دکتر احمد رمضانزاده

گرفت.	قرار	پذيرش	مورد	•••••	درجەى
-------	------	-------	------	-------	-------

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			دکتر مجید نیکخواه
			دکتر سجاد نگهبان

تقريم به فانوارهى مهربانم؛

پرر، مارر و فواهرم

تشکر و قدردانی:

برخود لازم میدانم از زحمات استاد گرانقدر آقای دکتر احمد رمضانزاده که در تمامی مراحل تحقیق حاضر من را صمیمانه یاری نمودند و در مسیر صنعتی شدن پروژه نقش قابل توجهی ایفا کردند، تشکر نمایم. همچنین از مشورتهای ارزشمند استاد گرامی آقای دکتر بهزاد تخمچی که راهگشای مسیر تحقیق بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل میآورم.

از همکاری ارزنده مدیران شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب در بخشهای پژوهش و فناوری، اداره حفاری و زمین شناسی و نیز از آقای مهندس مهاجر عبادی به عنوان مشاور صنعتی، آقای مهندس آزادپور و خانم مهندس آلبوغبیش جهت تحقق اهداف پژوهش تشکر میکنم.

از اساتید و پژوهشگران ارجمند آقایان دکتر محمد انهمنگلی، دکتر رئوف غلامی، مهندس محمدرضا حاجسعیدی، مهندس احمد رستمی، مهندس مرتضی محمدیان و خانم مهندس رنجبر که در مسائل مرتبط با پایاننامه لطفشان شامل حال بنده بوده است، قدردانی میکنم.

همچنین از خانم مهندس زهرا دلاور و خانم گندم ثابت که در امر ویرایش متن پایاننامه یاری رساندند، صمیمانه تشکر مینمایم و برای تمام عزیزان آرزوی موفقیت دارم.

تعهد نامه

اینجانب محمدرضا دلاور خشکلات دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن-مکانیکسنگ دانشکده

مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه:

تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن بر پارامترهای عملیاتی حفاری در تعدادی از چاه های یکی از میادین جنوب غرب کشور تحت راهنمایی دکتر احمد رمضانزاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایاننامه 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 تاکنون 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 پایاننامه تأثیر گذار بودهاند در مقالات مستخرج از پایاننامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که از موجود زنده (یا چینی جاهای 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 یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاريخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

 کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامههای رایانهای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود میباشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

عملیات حفاری، یکی از پیچیدهترین فعالیتهای مهندسی در صنایع بالادستی نفت و گاز است. عوامل متعددی در موفقیت این عملیات موثر است. در این میان تاثیر خصوصیات سازند و پارامترهای عملیاتی، در تحقیقات مهندسی حفاری مورد توجه قرار گرفته است. ویژگیهای سازند به طور مشخص با خصوصیات مکانیکی و رفتاری آن تعریف میشوند و بخش دیگر تحت تاثیر تجهیزات حفاری میباشند. شناخت نحوهی ارتباط میان عوامل ژئومکانیکی و عملیاتی حفاری میتواند در بهبود عملکرد عملیات حفاری و در نهایت کاهش هزینههای مرتبط، نقش حیاتی ایفا کند. در این تحقیق، با استفاده از روشهای هوشمند و آماری، تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل عملیاتی، با استفاده از دادههای دو چاه نفتی میدان مارون واقع در جنوب غربی کشور مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، ابتدا مدل ژئومکانیکی یکبعدی هریک از چاهها در سازندهای آسماری و سروک ساخته شده است. در ادامه پس از همگامسازی (هممقیاسسازی) دادههای حاصل از مدل ژئومکانیکی و اطلاعات عملیات حفاری، دو روش بر پایهی الگوریتم و مدلسازی بكار گرفته شد. با استفاده از روش الگوریتم K2 و شبكههای بیزین، ارتباط مستقیم و غیرمستقیم میان خصوصیات ژئومکانیکی و مهمترین پارامترهای عملیاتی حفاری به صورت گرافیکی مشخص شد. همچنین بر اساس نتایج مدلسازی عوامل حفاری در روش پرسپترون چندلایه (MLP) شبکههای عصبی، تاثیر گذاری خصوصیات ژئومکانیکی بر پارامترهای عملیاتی به صورت نمودارهای تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پیادهسازی الگوریتم K2، موید ارتباط مستقیم مقاومت تکمحوری بر نرخ نفوذ حفاری، زاویهی اصطکاک داخلی بر گشتاور و وزن روی مته است. نتایج کاربرد روش MLP در سازند آسماری و سروک نشان میدهد به ترتیب زاویهی اصطکاک داخلی و مقاومت تکمحوری بر سرعت چرخش مته بیشترین اثر را دارند. در بخشی دیگر، ویژگیهای ژئومکانیکی در هریک از زونهای چاهها همراه با پارامترهای حفاری بررسی و نتایج در قالب نمودارهای مقایسهای برای واحدهای ژئومکانیکی (GMU) مشخص ترسیم شده است. تحلیلها نشان میدهد که انتخاب و اعمال متناسب پارامترهای عملیاتی وزن روی مته، سرعت چرخش مته در ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی بر روی گشتاور و نرخ نفوذ حفاری به عنوان شاخصی از کیفیت حفاری اثرگذار است. در انتها مقادیر نسبی متناسب اعمال پارامترها در جدوال پیشنهادی ارائه شده است. **کلمات کلیدی**: خصوصیات ژئومکانیکی، پارامترهای عملیاتی، مدل ژئومکانیکی یک بعدی، شبکههای بیزین، الگوریتم K2، روش پروسپترون چندلایه (MLP)، واحدهای ژئومکانیکی (GMU)

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

دلاور، م.ر.، رمضانزاده، الف.، تخمچی، ب.، عبادی، م.، انه منگلی، م.، (۱۳۹۷). " تخمین فشار منفذی و مقایسه آن با آزمایشات MDT در یکی از چاههای جنوب غرب ایران". سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت، ۲-۳ بهمن ماه.

فهرست مطالب:

فصل اول: کلیات
۱–۱– مقدمه
۲-۱- سابقهی علمی تحقیق۳
۱–۳- ضرورت تحقيق۴
۴-۱- اهداف و روش انجام تحقیق
۵-۵- ساختار پایاننامه
فصل دوم: کلیات عملیات حفاری و پارامترهای موثر بر عملیات حفاری۹
۱۰ - مقدمه
۲-۲- اجزاء دستگاههای حفاری
۲-۲-۱ دکل حفاری
۲-۲-۲ تجهیزات ایجاد فشار و چرخش گل حفاری
۲-۲-۳ تجهیزات بالا برنده
۲-۲-۴- تجهیزات چرخشی
۲-۳- پارامترهای عملیاتی حفاری
۲–۳–۱ وزن روی مته (WOB)
۲-۳-۲ سرعت چرخش مته (RPM)
۲-۳-۳ گشتاور مته حفاری ۱۶

۴۰- نرخ نفوذ حفاری (ROP)۴۰-	-٣-٢
۵- سایر پارامترهای عملیاتی حفاری۵۰ سایر پارامترهای عملیاتی حفاری	-٣-٢
وامل ژئومکانیکی موثر بر عملیات حفاری۹	4–۴– ع و
۱۰- چگالی سنگ	-4-7
۲۰– تخلخل۲۰	-4-1
-۳- مقاومت سنگ	-4-1
۴- تنشهای برجا۴۰	-4-7
۵- سختی سنگ۵۰	-4-1
۶- زاویهی اصطکاک داخلی۲۷	-4-1
۲۰- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته۲۸	-4-1
حقیقات پیشین در زمینه ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری ۲۸	۲–۵– تح
۱۰ – تحقیقات آزمایشگاهی	-۵-۲
۲۰- تحقیقات آماری و هوشمند۲۰	-۵-۲
معبندی	۶-۶-۲ ج
: مدلسازی ژئومکانیکی چاههای مورد مطالعه۳۹	فصل سوم
فدمه	۱-۳ مة
مرفی میدان مورد مطالعه۴۱	⊷ -۲-۳

۳-۲-۱- سازندهای میدان مارون۴۲
۲-۲-۲- خصوصیات چاههای مورد مطالعه
۳-۳- نگارهای چاهپیمایی۴۴
۳–۳–۱– نگار مقاومت ۴۵
۳-۳-۲- نگار پرتو گاما ۴۵
۳–۳–۳ نگار صوتی ۴۵
۳-۳-۴- نگار نوترون ۴۶
۳–۳–۵– نگار چگالی ۴۶
۳-۳-۶- نگار قطرسنجی ۴۶
۴-۴- تعیین پارامترهای مدلسازیهای ژئومکانیکی۴۷
۳-۴-۱- تخمین سرعت موج برشی۴۷
۳-۴-۲- تخمین پارامترهای الاستیک سنگ مخزن۵۱
۳–۴–۳– پارامتر مقاومت سنگ۵۵
۳-۴-۵- پارامترهای زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور۶۱
۳-۴-۴- تخمین فشار منفذی ۶۴
۳-۴-۲- تخمین میزان تنشهای برجا ۶۷
۳-۵- جمعبندی

فصل چهارم: بررسی ارتباط میان خصوصیات ژئومکانیکی و پارامترهای حفاری با استفاده از
الگوریتم K2 و شبکههای عصبی مصنوعی MLP
۲۸ ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ
۴–۲– دادههای حفاری چاهها ۷۹
۲-۴- همگامسازی دادههای حفاری و ژئومکانیکی۸۰
۴–۴– شبکههای بیزین
۴-۴-۱ ویژگیهای شبکههای بیزین۸۳
۲-۴-۴ الگوريتم K2
۴-۴-۳ ضرایب همبستگی برای ارزیابی دادههای K2K2
۴-۴-۴ بررسی نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم K2
۹۵-۵- شبکههای عصبی مصنوعی۵۹
۴-۵-۴- شبکههای پرسپترون چندلایه (MLP)۹۷
۴–۵–۲– مقایسه میان میزان تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری در نتایج MLP ۹۸
۴-۶- جمعبندی
فصل پنجم: تفکیک واحدهای ژئومکانیکی چاهها و بررسی مقادیر پارامترهای عملیاتی در هریک
از واحدها
۵–۱– مقدمه
۵-۲- زونبندی اولیه چاهها

۵–۳– واحدهای ژئومکانیکی چاهها۹
۵–۳–۱- ویژگیهای واحدهای ژئومکانیکی بر اساس نگارهای چاهها
۵-۳-۲- خصوصیات مشترک واحدهای ژئومکانیکی بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی ۱۱۵
۵-۴- بررسی مقادیر اعمالی پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی
۵-۴-۲- چاه شماره ۱
۵-۴-۲- چاه شماره ۲
۵-۴-۳- تعیین محدودهی اعمال پارامترهای حفاری با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی ۱۳۳
۵-۵- جمعبندی
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۳۷
۶-۱- نتیجه گیری
۶–۲– پیشنهادها
منابع:

فهرست اشکال:

شکل (۲-۱). اجزا تجهیزات عملیاتی حفاری در روش حفاری چرخشی، ترجمه اسامی تجهیزات از (Lyons & Plisga,
شکل (۲- ۲). طبقهبندی مقاومت سنگها بر اساس محدودهی UCS در تحقیقات گوناگون (Bieniawski, 1984)۲
شکل (۲-۳). نمایش تنشهای برجا شامل تنشهای افقی حداقل، حداکثر و تنش قائم (O'Connell, 1994)
شکل (۲- ۴). تاثیر سختی و شرایط مختلف وزن روی مته در دو حالت ۲ و ۴ تن بر روی نرخ حفاری (& Gstalder
۲۶ (Raynal, 1966
شکل (۲- ۵). رابطهی میان نرخ حفاری و سختی موهس بر اساس آزمایشات (Hoseinie, et al., 2014)
شکل (۲- ۶). نمودارهای نسبت نرخ نفوذ حفاری به وزن روی مته در دو محیط نیمه سخت و نرم (Bielstein & Cannon,
۲۹(1950
شکل (۲- ۷). معادله گشتاور و نمودار تطبیق گشتاور تخمینی و واقعی سنگ دولومیت با فشارهای مختلف (Warren,
۳۰(1984
شکل (۲- ۸). نمودارهای نسبت نرخ نفوذ به وزن روی مته؛ ماسهسنگ (چپ) و مرمر (راست) (Judzis, et al., 2007)
۳۱
شکل (۲- ۹). نسبت نرخ نفوذ به وزن روی مته؛ سنگهای آهک، گرانیت، ماسهسنگ، انیدریت، بازالت و گابرو (,Van Hung
۳۲
شکل (۲- ۱۰). نتیجهی روش های آماری در سه حالت تخمین ، مقدار بهینه و مقایسه با مقدار واقعی ROP (Eren, 2010)
۳۳
شکل (۳– ۱). موقیعت میدان نفتی مارون در حوضه نفتی جنوب (شرکت ملی نفت ایران)(گزارش مارون، ۱۳۸۷)۴۲
شکل (۳- ۲). نگارهای سنگشناسی، مدت زمان عبور موج، سرعت موج برشی و فشاری صوتی، تخلخل، پرتو گاما و چگالی
چاه شماره ۱
شکل (۳- ۳). نگارهای سنگشناسی، مدت زمان عبور موج، سرعت موج برشی و فشاری صوتی، تخلخل، پرتو گاما و چگالی
چاه شماره ۲

شکل (۳- ۴). نگارهای تخمین پواسون، مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و ثابت لامه چاه ۱
شکل (۳- ۵). نگارهای تخمین پواسون، مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و ثابت لامه چاه ۲
شکل (۳- ۶). نگارهای تخمین مقاومت سنگ بر اساس روابط ۳-۱۹ تا ۳-۲۳ چاه ۱
شکل (۳- ۷). نگارهای تخمین مقاومت سنگ بر اساس روابط ۳-۱۹ تا ۳-۲۳ چاه ۲
شکل (۳- ۸). نگارهای تخمین مقاومت تکمحوری روابط ۳-۲۴ و ۳-۲۵ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)۵۸
شکل (۳- ۹). نگارهای تخمین مقاومت تکمحوری روابط ۳-۲۶ و ۳-۲۷ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)
شکل (۳- ۱۰). نگارهای تخمین مقاومت کششی رابطهی ۳-۲۸ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)
شکل (۳- ۱۱). نگارهای تخمین حجم شیل، زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور چاه ۱ ۶۳
شکل (۳- ۱۲). نگارهای تخمین حجم شیل، زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور چاه ۲ ۶۴
شکل (۳- ۱۳). نگارهای NCT ترسیمشده بر مدت زمان عبور موج، تخمینهای روش ژانگ، ایتون، بورز، روش تراکمپذیری
و مجموعهی تخمینها در مقایسه با آزمایش MDT چاه ۱ ۶۶
شکل (۳– ۱۴). نگارهای حجم شیل و تخمین فشارمنفذی چاه ۲
شکل (۳- ۱۵). نگارهای کرنش جهت X و Y و تخمین تنش برجا قائم، افقی حداقل و حداکثر چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)
۶۹
۶۹ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر-
۶۹ شکل (۳– ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳–۵۰) تا (۳–۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر– کلمب و هوک–براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱
۶۹ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱ شکل (۳- ۱۷). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر-
۶۹ شکل (۳– ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳–۵۰) تا (۳–۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر– کلمب و هوک–براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱ شکل (۳– ۱۷). نگارهای تخمین روابط (۳–۵۰) تا (۳–۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر– کلمب و هوک–براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۲
۹۰ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱ شکل (۳- ۱۷). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۲ ۵۷
 ۶۹ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱
 ۶۹ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۲۵) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱
 ۶۹ شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر- کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱

شکل (۴- ۷). نتایج تاثیر گذاری مستقیم هریک از پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری چاه ۱
شکل (۴– ۸). نشان دهندهی میزان خطا اعداد نتایج مدل نسبت به دادههای اصلی چاه ۲
شکل (۴- ۹). نتایج تاثیرگذاری مستقیم هریک از پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری چاه ۲
شکل (۵- ۱). زونبندی اولیه چاههای شماره ۱ (سمت چپ) و شماره ۲ (سمت راست)
شکل (۵- ۲). محدوده و تشکیل واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر اساس نگارهها۱۱۳
شکل (۵- ۳). ادامه شکل (۵-۲)؛ محدوده و تشکیل واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر
اساس نگارها
شکل (۵- ۴). محدوده و نمایش واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر اساس پارامترهای
ژئومکانیکی
شکل (۵–۵). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۱ چاه ۱
شکل (۵- ۴). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زیرزون ۱ چاه ۱
شکل (۵- ۷). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۲ چاه ۱
شکل (۵- ۸). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۳ چاه ۱
شکل (۵- ۹). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زیرزون ۳ چاه ۱۱۲۴
شکل (۵- ۱۰). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۴ چاه ۱
شکل (۵- ۱۱). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۱ چاه ۲
شکل (۵- ۱۲). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۲ چاه ۲
شکل (۵- ۱۳). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۳ چاه ۲
شکل (۵- ۱۴). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۴ چاه ۲
شکل (۵- ۱۵). تقسیمبندی مشترک میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در تحلیلها برای چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)
۱۳۱
شکل (۵- ۱۶). ادامهی شکل (۵-۱۵)؛ تقسیمبندی مشترک میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در تحلیلها برای چاه ۱
(چپ) و چاه ۲ (راست)

فهرست جداول:

جدول (۲- ۱). تشریح حالات مختلف قرار گیری گسل ها طبق تنش های برجا (Zoback, 2007)
جدول (۳- ۱). روابط تخمین سرعت موج صوتی برشی کاستانگا و همکاران (Castagna, et al., 1993)
جدول (۳- ۲). روابط پارامترهای الاستیک در حالت دینامیک
جدول (۳- ۳). روابط تخمین مقاومت فشاری تکمحوری بر اساس سرعت و مدت زمان عبور موج صوتی۵۵
جدول (۳- ۴). روابط تعیین حداقل فشار گل ((P _{w(BO}) معیار شکست موهر-کلمب۷۲
جدول (۳- ۵). روابط تعیین حداقل فشار گل ((P _{w(BO}) معیار شکست موهر-کلمب۷۳
جدول (۴– ۱). خلاصه اطلاعات حفاری تعدادی از نقاط عمقی چاه ۱
جدول (۴– ۲). خلاصه اطلاعات حفاری تعدادی از نقاط عمقی چاه ۲
جدول (۴– ۳). خلاصه اطلاعات ژئومکانیکی تعدادی از نقاط عمقی چاه ۱۸
جدول (۴- ۴). خلاصه اطلاعات ژئومکانیکی تعدادی از نقاط عمقی چاه ۲
جدول (۴- ۵). ضرایب همبستگی پیرسون متغیرهای ژئومکانیکی و حفاری در چاه شماره ۱۸
جدول (۴- ۶). ضرایب همبستگی پیرسون متغیرهای ژئومکانیکی و حفاری در چاه شماره ۲۲
جدول (۴- ۷). ضریب همبستگی مدل شبکهی عصبی چاه ۱ و ۲ در حالات Test ،training و All
جدول (۵– ۱). زونبندی و مقادیر نگارها در واحدهای ژئومکانیکی به صورت حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱
111
جدول (۵- ۲). ادامهی جدول (۵-۱)؛ زونیندی و مقادیر نگارها در واحدهای ژئومکانیکی حالت بیشینه، کمینه و میانگین
چاه ۱
جدول (۵– ۳). زونبندی و مقادیر نگارهها در واحدهای ژئومکانیکی به صورت حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲
117
جدول (۵- ۴). زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱
118

جدول (۵– ۵). ادامه جدول (۵–۴)؛ زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالت بیشینه، کمینه و
ىيانگين چاه ۱
جدول (۵- ۴). زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲
۱۱۷
جدول (۵– ۷). زونبندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱ ۱۲۹
جدول (۵– ۸). ادامهی جدول (۵–۷)؛ زون،ندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه
ر میانگین چاه ۱
جدول (۵- ۹). زونبندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲ ۱۳۰
جدول (۵- ۱۰). مقادیر نسبی اعمال متناسب پارامترهای حفاری با توجه به ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی چاه ۱۳۳۰۰۰
جدول (۵– ۱۱). ادامهی جدول (۵–۱۰)؛ مقادیر نسبی اعمال متناسب پارامترهای حفاری با توجه به ارتباط با پارامترهای
ئومكانيكى چاه ۱

فصل اول کليات

۱–۱– مقدمه

بر طبق گزارش چشم انداز انرژی بین المللی^۱ (IEO) در سال ۲۰۱۸، تا سال ۲۰۴۰ با افزایش فشار تقاضای انرژی، شرکتهای فعال در صنعت نفت و گاز به سوی توسعه بیشتر میادین و افزایش نرخ استخراج همراه با نظر گرفتن هزینه های موثر در این بخش سوق مییابند (IEO, 2018). در این میان عملیات حفاری یکی از پرهزینه ترین فعالیت های صنایع بالادستی نفت می باشد که از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این عملیات، بسیار پیچیده و متاثر از عوامل بسیار متنوع می باشد. پارامترهای موثر در فرایند حفاری به دو دسته اصلی تقسیم می شوند. دسته اول شامل پارامترهای عملیاتی حفاری مانند نرخ نفوذ حفاری^۲ (ROP)، مقدار وزن روی مته حفاری^۲ (WOB)، سرعت چرخش مته حفاری^۴ (RPM)، گشتاور مته^۵ و ... است که با توجه به شرایط سنگ قابل تغییر می باشند. دسته دوم خصوصیات ژئومکانیکی سنگ (مخزن) در دو بخش، خصوصیات فیزیکی مانند چگالی، تخلخل، درجه سیمانی شدن و دیگر خصوصیات مشابه را می توان نام برد.

برجا و … مطرح هستند (Bourgoyne & Young, 1974; Walker, et al., 1986; Eren, 2010). تعداد زیاد شرایط تاثیرگذار در محل حفاری بر روی روند عملیات حفاری باعث شده است که توسعهی یک رابطهی کلی برای عملیات حفاری و در نهایت دستیابی به بیشینه کارایی حفاری مشکل باشد. با توجه به این شرایط حفاری همواره تلاشها در جهت تدقیق، طراحی مناسب، بهینهسازی و کاهش هزینههای حفاری بوده است. یکی از بخشهای کنترل کننده شرایط، بخش ژئومکانیک پروژه است که در ارتباط با بخشهای حفاری و مخزن هستند. نتایج این ارتباط در مسائلی همچون مدلسازیها، پیشنهادهای طراحی، بررسی

¹ International Energy Outlook

 $^{^{}r}$ Rate of Penetration

[&]quot; Weight on Bit

^{*} Revolutions Per Minute

^a Torque

عوامل ژئومکانیکی، روشهای نوین حفاری و افزایش ایمنی نمود مییابند. در این تحقیق بر اساس دادههای چاههای مورد مطالعه، تاثیر برخی از مهم ترین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن (مقاومت فشاری، مدول الاستیک، تنش قائم و ضریب اصطکاک داخلی) بر مهم ترین پارامترهای عملیاتی حفاری (نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته حفاری، مقدار گشتاور مته و سرعت چرخش مته) بررسی می شود. این بررسیها امکان درک بهتر و کامل تری از نحوهی بهبود روند حفاری و کاهش مخاطرات عملیات حفاری را فراهم می کند.

۱–۲– سابقهی علمی تحقیق

از حدود پنج دهه گذشته، ضرورت بهینهسازی حفاری با مطالعات گراهام و موئینچ^۱ (۱۹۵۹) با عنوان "ارزیابی تحلیلی وزن روی مته و سرعت دوران جهت تخمین طول عمر مته و نرخ حفاری" آغاز شد (Graham & Muench, 1959). گاله و وودس^۲ (۱۹۶۳) راهکاری را برای تشخیص بهترین ترکیب پارامترهای حفاری ارائه دادند. بورگوین و یانگ^۳ (۱۹۷۴) مدلی خطی را برای تعیین نرخ نفوذ حفاری در نظر گرفتند و با استفاده از روش رگرسیون چندگانه روابطی برای انتخاب پارامترهای بهینه حفاری منتشر

مدلهایی برای عوامل موثر بر نرخ نفوذ توسط مائورر ^۹(۱۹۶۲) و والکر^۵ و همکاران (۱۹۸۶) بیان شده است که با در نظر گرفتن مکانیزم خردایش متههای چرخشی و عواملی مانند وزن روی مته و سرعت چرخش مته، مطرح شدهاند. فالکونر⁹ و همکاران (۱۹۸۸) با در نظر گرفتن تغییرات گشتاور مته حفاری، میزان نرخ نفوذ حاصل از متههای PDC و فولادی را در چینهشناسیهای گوناگون مورد مطالعه قرار دادند (Maurer,

^{&#}x27; Graham and Muench

^r Galle and Woods

[&]quot; Bourgoyne and Young

[†] Maurer

^a Walker

² Fanlconer

1962; Walker, et al., 1986; Falconer, et al., 1988). در دهه های اخیر گسترش بررسی عوامل کنترل پذیر حفاری در کارهایی مانند آکگون^۱ (۲۰۰۲) مشاهده می شود (Akgun, 2002). با بررسی های انجام گرفته توسط اوزبای اگلو و اومرلو^۲ (۲۰۰۵) و لحاظ عواملی مانند سرعت و نوع مته، میزان نرخ حفاری افزایش و هزینههای حفاری با مدلسازیهای ریاضی غیر خطی، به میزان چهار برابر کاهش یافته است. رستگار و همکاران (۲۰۰۸)، یک مدل اصلاح شده از مدل وارن^۳ (۱۹۸۴) را ارائه دادهاند که در آن پارامترهایی مانند مقاومت فشاری تک محوری، وزن روی مته، نیروی نازل، چگالی سیال حفاری و ... به منظور تعیین نرخ حفاری و افزایش راندمان حفاری در نظر گرفته شده است. بتایی و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی ارتباط بین عوامل تاثیر گذار بر بهینهسازی عملیات حفاری، مدل نرخ نفوذ حفاری را به دو صورت "تحت تاثیر وزن روی مته" و "سرعت حفاری" منتشر کردهاند. محمدی بهبود و همکاران (۲۰۱۶) تاثیر پارامترهای محیطی بر تغییرات انرژی ویژه حفاری (به عنوان پارامتر عملیاتی حفاری) را بر اساس دادههای حفاریهای عمیق مورد مطالعه قرار دادهاند. در نظر گرفتن ویژگیهای ژئومکانیکی از جمله مقاومت سنگ، تخلخل، مقاومت برشی ذاتی سنگ و زاویه اصطکاک داخلی و نیز تشخیص ارتباط با پارامترهای عملیاتی حفاری به همراه ارائه مدل نرخ نفوذ حفاری در مطالعه توسط نوروزی و همکاران (۲۰۱۷) مطرح شده است (Ozbayoglu & Omurlu, 2005; Bataee, et al., 2010; Rastegar, et al., 2008; Warren,) شده است .(1984; Behboud, et al., 2016; Norouzi, et al., 2017

۱–۳- ضرورت تحقيق

پیچیدگی عملیات حفاری سبب سوق تحقیقات مربوط به قابلیت حفاری و بهبود کیفیت آن به سوی بررسی ویژگیهای ژئومکانیکی زمین در کنار عوامل عملیاتی حفاری شده است. مطالعات بسیاری با هدف تعیین

[\] Akgun

 $^{^{}r}$ Ozbayoglu and Omurlu

[&]quot; Warren

اثرات پارامترهای عملیاتی حفاری بر روی قابلیت حفاری سنگ انجام شده است که عمدتاً بر تاثیرات پارامترهای وزن روی مته، سرعت چرخش مته حفاری، ویژگیهای گل حفاری و نوع مته متمرکز بوده است. این پارامترها نقش مهمی بر روی عملیات حفاری داشته و هریک به سهم خود آن را کنترل میکنند (Hareland and Rashidi, 2010;Rampersad, *et al.*, 1994). در حالت کلی عوامل غیرقابل کنترل محیطی و پارامترهای عملیاتی حفاری بسیار گستردهاند؛ به همین دلیل تشخیص میزان اهمیت برخی پارامترها و ارتباط متقابل آنها و نیز شناخت بهتر عوامل تاثیرگذار، از منظر کاربردی بسیار حائز اهمیت است.

در شرایط عملیاتی حفاری، انتخاب ویژگیهایی همچون سرعت مته، وزن روی مته با توجه به دید کلی نسبت به خصوصیات سازند و ویژگیهای اثرگذار بر حفاری در موارد مشابه انجام میشود. بازهی تغییرات پارامترهای عملیاتی بر سرعت کلی و کیفیت حفاری تاثیرگذار است. بنابراین گزینش مطلوب هریک از پارامترهای عملیاتی در ارتباط با ویژگیهای ژئومکانیکی به صورت یک راهکار، ضرورت دارد. در تحقیقات انجام شده در زمینه پارامترهای عملیاتی حفاری توجه ویژهای بر نرخ نفوذ حفاری و در بخش خصوصیات ژئومکانیکی، بر ویژگیهای همچون مقاومت فشاری تکمحوری⁽ (UCS)) بوده است (; 2010) مانند وزن ژئومکانیکی، بر ویژگیهایی همچون مقاومت فشاری تکمحوری⁽ (یUCS)) بوده است (; 2010) مانند وزن روی مته، سرعت، گشتاور مته و نوع مته و از سوی دیگر خصوصیات محیطی مقاومت فشاری، مدول الاستیک، روی مته، سرعت، گشتاور مته و نوع مته و از سوی دیگر خصوصیات محیطی مقاومت فشاری، مدول الاستیک، تعیین ارتباط تعدادی از ویژگیهای مکانیکی سنگ بر روند حفاری مشاهده میشود. در این تحقیق با بررسی و بهترین پارامترهای عملیاتی حفاری، از روند کلی حفاری حاصل میشود که در نهایت به انجام بهتری نسبت به تاثیر پارامترهای وی دیگر خصوصیات محیطی مقاومت فشاری، مدول الاستیک، تعیین ارتباط تعدادی از ویژگیهای مکانیکی سنگ مخزن بر مهمترین پارامترهای عملیاتی حفاری، ارزیابی تعیین ارتباط تعدادی از ویژگیهای مکانیکی سنگ مخزن بر مهمترین پارامترهای عملیاتی حفاری، ارزیابی تعمیمات مطلوب، بهینهسازی فرایند، مدیریت ریسک حفاری منجر خواهد شد.

¹ Unconfined Compressive Strength

۱-۴- اهداف و روش انجام تحقیق

در حال حاضر محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی حفاری براساس تجربه متخصص حفاری در شرایط مشابه و نیز برخی مدلهای تجربی و تحلیلی موجود مشخص می شود. نتایج این تحقیق، امکان انتخاب دقیقتر پارامترهای عملیاتی حفاری متناسب با خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بر پایه اطلاعات چاههای مورد مطالعه فراهم می نماید. بدیهی است که این امر در نهایت منجر به کاهش هزینه های عملیات حفاری و افزایش بهرهوری فرایند خواهد شد.

برای دستیابی به اهداف ذکرشده، ابتدا ویژگیهای زمینشناسی و ساختاری میدان نفتی چاههای مورد مطالعه بررسی شد. سپس بر اساس دادههای نگارهای چاهها و ویژگیهای ژئومکانیکی موجود، پارامترهای ژئومکانیکی تخمین زده شد. علاوه بر آن تغییرات فشار منفذی، تنش و شرایط پایداری چاهها با استفاده از یک مدل یکبعدی ژئومکانیکی در نرم افزار ژئولاگ^۱ ساخته شد. از سوی دیگر پارامترهای عملیاتی چاهها بر اساس دادههای نگارهای گل حفاری در اختیار قرار گرفت. دو دسته اطلاعات حفاری و ژئومکانیکی چاههای به یک مقیاس واحد تبدیل گردید. با در اختیار داشتن این دادهها، بررسیهای ارتباطات میان دسته دادههای ژئومکانیکی با هریک از دادههای حفاری طبق الگوریتم K2 صورت گرفت. همچنین میزان تاثیر هریک از پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری با استفاده از نتایج شبکههای عصبی پروسپترون چند لایه ^۲ (MLP)

در دیگر بخش تحقیق، بر اساس ناحیهبندیهای (زونبندیهای) اولیه در عمقهای مختلف چاهها و تقسیمبندی طبق خصوصیات ژئومکانیکی مشترک، واحدهای ژئومکانیکی تشکیل شده است. در این واحدهای ژئومکانیکی، پارامترهای حفاری در عمق چاهها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسیها برای

^{&#}x27; Geolog

^r Multi Layers Perceptron

دو دسته پارامتر (ژئومکانیکی و حفاری) و نگارهای چاهها، در جداولی بر اساس عمق مخزن و نقاط مشترک ساختاری واحدهای ژئومکانیکی بیان شده و سپس ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در هریک از واحدها بررسی میشود.

۱–۵– ساختار پایاننامه

در فصل اول کلیات موضوع تحقیق، سابقهی اجمالی و ضرورت آن تشریح شد. در فصل دوم به طور خلاصه، اجزاء اصلی دستگاههای حفاری به همراه پارامترهای موثر بر روند حفاری تعریف و نیز مطالعات گذشته مرتبط با تحقیق مرور میشود. در ادامه، فصل سوم شامل خصوصیات میدان مورد مطالعه و مدلسازی ژئومکانیکی چاههای مربوطه است. با مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی چاهها و تحلیل مدلها بههمراه در نظر گرفتن وزن گل حفاری و معیارهای شکست مختلف، اطمینان کافی از صحت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی فراهم خواهد شد. بررسی ارتباط میان خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن بر پارامترهای عملیاتی حفاری با استفاده از دو الگوریتم در فصل چهارم صورت می گیرد. فصل پنجم پایان نامه ارتباط و تاثیرپذیری عوامل عملیاتی حفاری در واحدهای ژئومکانیکی (GMU) مشخص شده چاهها مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در نهایت نتایج تخمینی و پیشنهادات متناسب با یافتههای تحقیق در فصل ششم ارائه خواهد شد.

فصل دوم

کلیات عملیات حفاری و پارامترهای موثر بر عملیات حفاری

۱-۲ مقدمه

صنعت نفت و گاز همواره به دنبال توسعه و به کارگیری فناوریها و روشهایی نوین در عملیات حفاری بوده است. عملیات حفاری از زمان حفر اولین چاه تاکنون، از فناوریهای مختلف روش حفاری مانند حفاری چرخشی^۱ (مرسوم)، حفاری جهتدار^۲، لولهی مغزی سیار^۳، حفاری فروتعادلی^۴ و ... بهره گرفته است (Bourgoyne, *et al.*, 1986). هریک از این روشهای حفاری با توجه به محل حفاری (دریا یا خشکی) در تعداد زیادی از تجهیزات اولیه مشترک هستند. در این فصل ابتدا مروری بر تجهیزات مختلف عملیات حفاری انجام می گیرد سپس پارامترهای تاثیر گذار بر عملیات حفاری در دو بخش ژئومکانیکی و حفاری تشریح می شوند و مروری بر مطالعات گذشته انجام می گیرد.

۲-۲- اجزاء دستگاههای حفاری

^a Casing pipes

[\] Rotary drilling technology

^v Directional drilling

^r Coiled tubing

^{*} Underbalance drilling

⁹ Hoisting equipment

^v Rotating equipment



شکل (۲-۱). اجزا تجهیزات عملیاتی حفاری در روش حفاری چرخشی، ترجمه اسامی تجهیزات از (Lyons & Plisga, 2004)

۲-۲-۱ دکل حفاری

دکل یک برج فولادی است که در مرکز سطح کف محل حفاری به طور ایستاده قرار می گیرد. این بخش را می توان یکی از مهمترین قسمتهای سیستم حفاری نامید. دکل به منظور بالا کشیدن دستگاه حفاری از داخل لولهی حفاری استفاده می شود. در عملیات حفاری برای دستیابی به نقاط عمیق تر نیاز به اتصال لولههای حفاری و تشکیل یک لولهی یک تکه^۲ است، در این حالت دستگاه حفاری به بالای دکل حمل می شود و لولههای حفاری به رشتهی حفاری^۳ متصل می گردند. یک لولهی حفاری دارای طولی معادل ۱۰

[\]Derrick

۲ Stand

^v Drill string

متر است و یک لولهی یک تکه مورد استفاده در حفاری با دکل از سه عدد لولهی حفاری تشکیل می شود، بنابراین استفاده از لوله های یک تکه (۳۰ متر) با کمک دکل حفاری می تواند به کاهش زمان اتصال لوله های جدید به مقدار یک سوم حالت اتصال یک لوله یحفاری منجر شود.

در حالت نیمه شناور و کشتی های حفاری، دکل ها به صورت ریل های عمودی به منظور هدایت دستگاه حفاری قرار می گیرند. دکل های حفاری دارای تجهیزاتی هستند که در ادامه ی این بخش معرفی می گردند (Langlo, 2014).

۲-۲-۱-۱- قرقرهی سر دکل^۱ و قرقرهی متحرک^۲

قرقرهی سر دکل ثابت است و قرقرهی متحرک به بالا کشیده یا پایین برده می شود. این حرکت به وسیلهی کشیدن یا آزاد کردن کابل حفاری انجام می گیرد. ترکیب قرقرهی سر دکل، قرقرهی متحرک و کابل اتصال حفاری قادرند تا دستگاه حفاری هدایت از بالا (فوقانی)^۳ را به پایین یا بالا انتقال دهند.

۲-۲-۱-۲- جبران کننده تموج ٔ

این ابزار در حالت حفاری در شرایط فرا ساحلی^۵ کاربرد دارد؛ یک وزنهی متعادل کننده تاثیر امواج بر مته حفاری را کاهش میدهد. دکلهای حفاری نیمه شناور و کشتیهای حفاری به وسیلهی امواج به بالا و پایین برده میشوند. بدون وجود وزنه جبران کننده مته حفاری تمایل به ضربه به سمت انتهایی را دارد و سپس به وسیلهی حرکت امواج یک نیروی رو به پایین به آن وارد میشود. دو نوع کلی وزنههای جبران کنندهی تموج وجود دارد که شامل سیستم متعادل کننده بار متحرک² و بار مرده^۷ است (Langlo, 2014).

- ^a Offshore
- ⁹ Active
- ^v Passive

[\] Crown block

^r Traveling block

[&]quot; Top drive

^{*} Heave compensator

۲-۲-۱-۳- سیستم لوله گیر

سیستمهای لوله گیر مختلفی وجود دارد که معمولا در برج حفاری نصب می شوند. هنگامی که یک قسمت از چاه حفاری می شود، کارکنان حفاری لوله های مورد نیاز را از بخش نگهداری لوله ها انتخاب می کنند. لوله های حفاری سپس به طور ایستاده در سطح حفاری قرار می گیرند و به وسیله ی سطوحی از آن ها محافظت می شود (Langlo, 2014).

۲-۲-۲ تجهیزات ایجاد فشار و چرخش گل حفاری^۲

در حفاریهای چرخشی، حدود ۶۰ درصد از نیرو به وسیلهی پمپ گل ایجاد می شود. این پمپها وظیفهی ایجاد فشار و چرخش گل حفاری در هنگام حفاری را بر عهده دارند. گل به قسمت انتهای محل حفاری رفته و ناحیهی حفاری شده را تمیز کرده و قطعات خرده شده را به سطح ارسال می کند. هنگامی که گل به سطح باز می گردد به سمت لرزانندهها^۳ هدایت شده و حجم زیادی از مواد حفر شده از گل حفاری خارج می شوند. لرزانندهها شامل یک قاب لرزش کننده است که صفحهای سیمی و مشبک، گل را تصفیه (غربال) می کند. لرزانندهها همیشه برای ثابت نگهداشتن ویژگیهای گل کافی نیستند. سیستم تمیز کننده دوم مانند یک سانتریفیوژ به منظور پاک کردن قطعات کوچک تر عمل می کند و سپس گل را به مخازن برمی گرداند. مخزن یک تانکر ذخیره سازی گل است و در اتاق مخازن^۴ چندین مخزن قرار گرفته است. پمپها گل را از مخزن می کشند تا اینکه چرخهی گل حفاری تکمیل گردد (Longlo, 2014; Langlo, 2014).

[\] Racking system

^r Mud circulation

[&]quot; Shakers

^{*} Pit room

۲-۲-۳- تجهیزات بالا برنده

سیستم بالابرنده شامل دو قسمت دستگاه کشنده^۱ و پیستون^۲ است. دستگاه کشنده اساساً یک قرقرهی بزرگ است که مسئولیت بالا و پایین بردن دستگاه حفاری را بر عهده دارد. پیستونها نوع جدید از سیستمهای بالابرنده مورد استفاده میباشند و در آن برای جابجایی دستگاههای حفاری از دو سیلندر هیدرولیکی استفاده میشود. حالت پیستونی کارایی بالایی دارد ولی حالت کشنده در کل جهان بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد (Artymiuk, 2006). دستگاههای بالا برنده کشنده به طور کلی از پنج بخش تشکیل شدهاند که شامل موتورها، چرخدنده، ترمزها و استوانههای قسمت کشنده به مور کلی از پنج بخش ترکیل کابلها میشوند و ترمزها معمولا دو نوع الکترومغناطیسی یا مکانیکی است (Skaugen, 2011).

۲-۲-۴- تجهیزات چرخشی

تجهیزات چرخشی دستگاههای حفاری شامل ترکیبی است که باعث چرخش مته می شود. دستگاه حفاری هدایت از بالا، از قرقرهی متحرک معلق می باشد و به وسیله ی تجهیزات بالا برنده قادر به حرکت بالا و پایین ارتفاعی در دکل است. دستگاه هدایت از بالا به عنوان یک موتور، نیروی لازم برای چرخش رشته ی حفاری را فراهم می کند. رشته ی حفاری از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول لولههای استاندارد و لولههای سنگین حفاری⁴ که بیشترین مقدار وزن روی مته را تشکیل می دهند و بخش دیگر تجهیزات متصل به آن در ته چاه است. دستگاه هدایت از بالا جایگزین دستگاه حفاری قدیمی تر کلی^۵ (میز دوار) محسوب می شود. در حالت کلی از یک سینی چرخشی برای چرخش رشته حفاری استفاده می گردید (Lyons & Plisga).

^a Kelly

^{&#}x27; Draw work

۲ Ram

[&]quot; Drum

^{*} Heavy drill pipes

۲-۳- پارامترهای عملیاتی حفاری

معلیات حفاری طبق بررسیها و مدلسازیهای نرخ حفاری انجام گرفته (;Irawan, et al., 2016) به پارامترهای به دلیل (Irawan, et al., 2012) به پارامترهای بسیاری وابسته است. دسته پارامترهای تاثیرگذار عملیاتی به دلیل در اختیار بودن قابلیت کنترل تغییرات پارامترها در عملیات حفاری اصطلاحاً پارامترهای کنترلپذیر گفته میشوند (Akgun, 2002). پارامترهای عملیاتی مبنای مطالعات (Eren, 2010; Ernst, et al., 2007) جهت دستیابی به نرخ حفاری مناسب و بهینهسازی عملیات حفاری بودهاند. بدیهی است که تاثیر پارامترهای عملیاتی بر کیفیت عملیات حفاری سبب اهمیت آن در بررسیهای مربوط به هزینه بخش حفاری شود. این موضوع زمانی نمود مییابد که هزینههای صنعت حفاری در حفر اولین چاه نسبت به چاههای دیگر در یک میدان بیشتر است (Irawan, et al., 2012). تعدادی از مهمترین پارامترهای عملیاتی تاثیرگذار بر روند حفاری در ادامه تشریح خواهد شد.

VOB) -۳-۲-۱- وزن روی مته (WOB)

این پارامتر میزان وزن اعمالی روی مته حفاری را نشان میدهد. بخشی از این وزن از طریق مجموعهی لولههای طوقه که از جنس آهن یا آلیاژ نیکل- مس هستند، اعمال میشود. وزن مجموعهی لولهها بر اثر گرانش زمین، فشار رو پایین به سمت سرمته ایجاد میکند. میزان انرژی وزن روی مته به همراه سرعت چرخش رشتهی حفاری جمع میشود و باعث پیشروی حفاری میگردد. مقدار پارامتر وزن روی مته با استفاده از نصب یک کرنشسنج که مقادیر فشار وارده را محاسبه و کالیبره میکند، مشخص میشود (Atajeromavwo & Akinyokun, 2018; Eren, 2010)

متخصصان حفاری به منظور کنترل وزن وارد شده بر مته حفاری، پایش لحظهای را انجام میدهند. برای ثبت مقادیر اولیه، قبل از تماس حفار به محل حفاری، لوله حفاری می چرخد و مقادیر پایه با استفاده از

[\] Drilling collars

سنسور اندازه گیری و به عنوان مقادیر صفر وزن روی مته در نظر گرفته می شود. این عمل برای از بین بردن هر گونه تغییرات تنش در سنسور قبل از اعمال وزن عملی بر روی مته انجام می گیرد. سنسور مقدار وزن کلی رشته حفاری شامل وزن قرقره و سیستم حفاری هدایت از بالا را اندازه گیری می کند. حال برای اعلام وزن روی مته از میان مجموع وزن ها، صحتسنجی هایی با دستورات از پیش تعیین شده وجود دارد که مورد استفاده قرار می گیرد (Atajeromavwo & Akinyokun, 2018).

RPM) مته (RPM) مته (RPM)

مقدار این پارامتر نشان دهندهی میزان چرخش یک مته در هر دقیقه است. همچنین سرعت کل رشتهی حفاری با خصوصیت RPM بیان می شود. با استفاده از ویژگی ارتباط لحظهای و مستقیم دستگاههای حفاری نوین، پارامتر سرعت چرخش در اختیار مهندسین حفاری قرار گرفته است. در سنگهای سخت، سرعت چرخش مته دارای یک مقدار بهینه است و پس از آن افزایش سرعت تاثیری بر افزایش نرخ نفوذ حفاری ندارد (Nguyen, 1996). یکی از مهمترین مسائل در روند حفاری برهم کنش میان چهار ویژگی شامل مته، قسمت ساق مته ⁽¹ (BHA) و پارامترهای عملیاتی و نوع سازند است که نسبت میان ABH بر مته برای متخصصین حفاری جهت تعیین RPM اهمیت دارد (2007).

۲-۳-۳- گشتاور مته حفاری

گشتاور مته به عنوان مقدار نیروی مورد نیاز جهت چرخش رشتهی حفاری تعریف میشود. این نیرو سبب غلبه بر مقاومت و اصطکاک سنگ مقابل مته حفاری می گردد. در حفاریهای کمعمق، گشتاور نتیجهی نیرویهای مقاوم در برابر برش و برهم کنش سنگ و مته است. از سوی دیگر در حفاری عمیق تر به گشتاور بیشتری برای غلبه بر فشار سیال تمیزکننده نیاز میباشد. بررسی میزان گشتاور برای به چرخش در آوردن مته را می توان در چند مورد اساسی خلاصه کرد؛ اول داشتن تحلیلی نسبت به سازندی که مته حفاری

¹ Bottom Hole Assembly
میکند و مورد دوم بررسی میزان گشتاور اعمالی به عنوان یک تجربه برای حفاریهای آتی میباشد. ذکر این نکته ضرورت دارد که در میان پارامترهای حفاری، میزان گشتاور اعمالی جزء مهمترین پارامترها در حفاری افقی است. سومین دلیل بررسی گشتاور را میتوان در پیشبینی مناسب میزان نیروی موتور گل حفاری و نیز انتخاب مته برای دستیابی به حفاری بهینه جستجو کرد (Fasheloum, 1997). تعدادی مطالعه همانند رابطهی وارن (۱۹۸۴) وجود دارد که با استفاده از آزمایش بر روی سنگ به رابطهای برای گشتاور مته دست یافتهاند و یک حد بحرانی برای افزایش گشتاور مته حفاری در نظر گرفتهاند (Warren, 1984; Fasheloum, 1997).

۲-۳-۲ نرخ نفوذ حفاری (ROP)

نرخ نفوذ حفاری به عنوان یک پارامتر کنترل پذیر به میزان پیشروی مته حفاری در سنگ تحت حفاری در واحد زمان اشاره می کند. این پارامتر به عنوان یکی از مهمترین شاخصهای تاثیر گذار در بررسیهای هزینهی حفاری شناخته می شود و در طراحیهای اولیه برای دستیابی به حفاری بهینه لحاظ می شود. واحدهای معمول آن فوت بر دقیقه یا متر بر ساعت است (Fasheloum, 1997).

در تحقیقات گذشته، نرخ نفوذ حفاری به دو شکل نرخ نفوذ آنی و نرخ نفوذ متوسط عنوان می شود. نرخ نفوذ آنی آنی به صورت لحظهای ثبت می شود و در تحلیل پارامترهای حفاری هنگام بررسی سازندهای محدود با تغییرات زیاد ویژگی های زمین، مناسب است. نرخ نفوذ متوسط دارای دقت کمتری نسبت به نرخ نفوذ آنی است (Mensa-Wilmot, 2010). مطالعات بسیاری در زمینه ی تخمین و مدل سازی نرخ نفوذ حفاری انجام گرفته است که در آنها با استفاده از آزمایشات بر روی نمونه سنگ یا شبیه سازی ها، نرخ نفوذ حفاری تحلیل گرفته است که در آنها با استفاده از آزمایشات بر روی نمونه سنگ یا شبیه سازی ها، نرخ نفوذ حفاری تحلیل گرفته است که در آنها با استفاده از آزمایشات بر روی نمونه سنگ یا شبیه سازی ها، نرخ نفوذ حفاری تحلیل شده است. در این مطالعات پارامترهایی در دو بخش حفاری و ژئومکانیکی به عنوان عوامل تاثیر گذار بر نرخ افوذ حفاری بکار گرفته شده اند (Norouzi, *et al.*, 2017; Moraveji & Naderi, 2016).

۲-۳-۵- سایر پارامترهای عملیاتی حفاری

علاوه بر موارد ذکر شده در زیرمجموعهی بخش پارامترهای عملیاتی، تعدادی دیگر از پارامترهای حفاری در مطالعات و تحقیقات مرتبط مدنظر قرار گرفتهاند. یکی از این موارد ویژگیهای سیال بکار رفته در حفاری است. ویژگیهای جریان، اختلاط با مواد دیگر و چگالی سیال حفاری از جمله پارامترهای مهم است که باید در موارد بهینهسازی حفاری مطالعه شوند. معمولا چگالی سیال حفاری با استفاده از سنسورهای کالیبره شده وزن گل اندازه گیری می شوند. ویژگیهای سیال، ترکیبی از کلیهی سیالاتی است که برای پاک کردن خردههای حفاری استفاده می گردد. هنگامی که خردههای حفاری به درستی از ته چاه یا چال تمیز شوند، روند عملیات حفاری به طور موثر ادامه می یابد. سیالات حفاری ممکن است هوا، آب، روغن، ترکیب امولوسیونی آب و روغن، گل و فوم باشند (Moore, 1958).

انتخاب سیالات حفاری بر اساس شرایط سازندی مانند میزان فشار، ویژگیهای تجهیزات حفاری و نیز مسائل مرتبط با لولههای جداری چاه است. برخی تحقیقات نشان میدهد که خنک کردن تجهیزات حفاری و تمیز کردن خردههای حفاری با سیالاتی مانند آب یا هوا نرخ حفاری را افزایش میدهد. در موقعیتهای حفاری عمیق مانند چاههای نفت و گاز از سیالاتی مانند گل، ترکیبی از رس، بنتونیت و آب برای جلوگیری از مشکلات پایداری چاه بهره گرفته میشود (Gray and Young Jr, 1973).

هیدرولیک مته حفاری یکی از پارامترهای عملیاتی است که در طراحیهای حفاری اهمیت دارد. در شرایط پایدار حفاری، نرخ پاک کردن خردههای حفاری باید برابر با نرخ ایجاد خردههای جدید حفاری باشد. با وجود این موضوع تلویحاً نرخ نفوذ میتواند با روند پیشرفت حفاری یا میزان ایجاد خردههای حفاری و یا هردو روند کنترل شود. پارامترهایی مانند نیروی فشاری جت نازل، نیروی هیدرولیکی، سرعت خروج سیال از جت نازل و عدد رینولدز جت سیال از جمله کمیتهای مورد استفاده هیدرولیک مته حفاریاند که بر روی نرخ نفوذ حفاری تاثیرگذارند. تمام این پارامترها به ویژگیهای سیال مورد استفاده بازمیگردد و اثر آنها با این فرض است که پارامترها انرژی هیدرولیکی را به طور کامل به ته چاه اعمال میکنند (Eren,) 2010; Wardlaw, 1969; Fasheloum, 1997).

۲-۴- عوامل ژئومکانیکی موثر بر عملیات حفاری

در حال حاضر استفاده از علم ژئومکانیک نقش مهمی در صنعت و گاز ایفا می *ک*ند. بکار گیری عوامل ژئومکانیکی در مسائلی مانند شکاف هیدرولیکی، بهینهسازی عملیات حفاری، بررسیهای فشار اطراف چاه، نشست و تخلیه مخازن، نشت سیال، بررسی میزان ذخیره مخزن، تحلیلهای پایداری و شکست چاه، گسترش ترک و ... مطرح است (Sare, et al., 2012; Jimenez, et al., 2007).

به طور خاص ژئومکانیک در بخش عملیات حفاری در مسائلی مانند تغییرات میدان تنش و تغییر شکل محیط سنگی اطراف چاه نمود مییابد. این تغییرات ژئومکانیکی در محیط که پارامترهای کنترلناپذیر حفاری نامیده میشوند، در میزان و جهت تنشهای اطراف چاه، حرکات جریان سیالات و پارامترهای فیزیکی منافذ سنگها مانند تخلخل و نفوذپذیری تاثیرگذار است. همچنین در کاربردهایی دیگر از تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی میتوان به انتخاب مناسب مسیر حفاری برای دسترسی به هیدروکربن با استفاده از شبیهسازی مخزن، انتخاب مته حفاری، کاهش هزینههای حفاری باوی دسترسی به میدروکربن با استفاده از شبیهسازی ژئومکانیکی اولیه و نیز بالا بردن کیفیت عملیات حفاری با شناخت از تغییرات مکانیکی سنگها اشاره کرد ژئومکانیکی اولیه و نیز بالا بردن کیفیت عملیات حفاری با شناخت از تغییرات مکانیکی سنگها اشاره کرد پارامترهای ژئومکانیکی تشریح خواهند شد.

در میان تحقیقات آزمایشگاهی و معدنی انجام شده در زمینهی نوع پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار بر حفاری، اصانلو (۱۳۷۵) نیروی چسبندگی، تخلخل، چگالی، بافت، مقاومت فشاری تکمحوری (UCS)، شاخص کیفیت سنگ (RQD)، ویژگیهای الاستیک و پلاستیک، صلبیت، سختی و ساختار تودهی سنگ

¹ Rock Quality Designation

را به عنوان عوامل موثر بر حفاری اشاره کرده است (اصانلو، ۱۳۷۵). همچنین قهرمان^۱ (۱۹۹۹) در رابطه با شاخص جدید حفاری علاوه بر موارد ذکر شده، مقاومت کششی، شاخص بارگذاری نقطهای و سرعت موج فشاری را جزء عوامل ژئومکانیکی موثر بر عملیات حفاری عنوان کرده است. به طور کلی پارامترهای تاثیرگذار بر روند حفاری در سه بخش اصلی مشخصات فیزیکی و کانیشناسی سنگ، مشخصات مکانیکی و مشخصات ساختاری توده سنگ تقسیمبندی میشوند (Kahraman, 1999; Hoseinie, *et al.*, 2008). در ادامه این قسمت تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی تشریح میشوند.

۲-۴-۲- چگالی سنگ

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب است. چگالی یک سنگ را میتوان بر اساس درصد کانیهای تشکیلدهنده و وزن مخصوص آنها به دست آورد. چگالی سنگ دارای رابطهی مستقیم با حجم فضاهای خالی سنگ و تودهی سنگ در تعدادی از سنگهای خاص است. اغلب سنگهای با مقدار چگالی بالاتر، دارای ویژگیهای مقاومت بیشتر و تخلخل کمتر است. اسموردینوف^۲ و همکاران (۱۹۷۰) روابطی میان مقاومت سنگ، چگالی و تخلخل برای تعدادی از سنگهای کربناته ارائه کردهاند (۱۹۷۰)

چگالی سنگها در حفاری با استفاده از نگار چگالی یا آزمایشات بر روی نمونههای سنگ تعیین می شود. چگالی تابعی از عمق و گرانش زمین است و در محاسبات تنش روباره به کار می رود. نگارهای چگالی در بیشتر چاههای یک میدان وجود دارد ولی تنها در ۱۰–۲۰ درصد طول حفاری شده چاهها موجود است. در این شرایط از برازش نمودارهای چگالی استفاده می شود. بیشتر سنگهای رسوبی تحکیمیافته^۳ دارای میانگین چگالی ۲/۳ گرم بر سانتی متر مکعب و تخلخل حدود ۱۵ درصد هستند (Zoback, 2007).

[\] Kahraman

^r Smordinov

[&]quot; Clastic Rocks

۲-۴-۲ تخلخل

سنگها بر اساس ساختار کانیشناسی و منشأ پیدایش دارای حفرههای کم و بیش مرتبط و یا حفرههای مجزا هستند. در این رابطه ویژگی تخلخل تعریف می شود که نسبت حجم فضای خالی به حجم کل سنگ است. تخلخل به عنوان خصوصیت فیزیکی مهم با دیگر پارامترها مانند مقاومت و خواص الاستیسیته سنگها رابطه دارد. این پارامتر منعکس کننده ی تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی در مواردی مانند شکست سنگ، جهت گسترش ترک، نرخ حفاری و سوراخکاری داخل چاه است (Parquhar, et al., 1994). اطلاعات مربوط به تخلخل از دو طریق آزمایشات بر روی نمونه و دادههای نگارهای چاه تهیه می شوند. البته به علت محبوری تخلخل از دو طریق آزمایشات بر روی نمونه و دادههای نگارهای چاه تهیه می شوند. البته به علت محدودیت تخلخل از دو طریق آزمایشات بر روی نمونه و دادههای نگارهای چاه تهیه می شوند. البته به علت محدودیت

دسترسی به نمونههای سنگ، روش استفاده از دادههای نگارها معمول تر است (Zoback, 2007). به طور کلی با توجه به ویژگیهای سنگ دو نوع تخلخل در سنگها تعریف میشود که شامل تخلخل به صورت حفرههای مرتبط یا غیر مرتبط است. پارامتر تخلخل در سنگهای کربناته و نیز ماسهسنگها در ارزیابیهای ژئومکانیکی اهمیت دارد. در این نوع سنگها تخلخل، مدول الاستیک و مقاومت سنگ هنگامی که تخلخل بالای ۳۵ درصد باشد، دارای یک رابطهی توانی مشخص هستند. نخستین رابطهی تخلخل آزمایشگاهی مورد استفاده در صنعت نفت توسط وایلی^۱ و همکاران (۱۹۵۶و ۱۹۵۸) ارائه شد که در آن به ارتباط تخلخل و سرعت موج صوتی اشاره شده بود. همچنین تحقیقاتی در زمینهی نرخ نفوذ حفاری ماسهسنگ توسط هوارث^۲ (۱۹۸۷) انجام گرفته است که نتایج آن رابطهای میان افزایش نرخ نفوذ، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری را نشان میدهد (1994, 1987; Farquhar, *et al.*, 1994).

^vWyllie

^r Howarth

۲-۴-۳ مقاومت سنگ

مقاومت سنگ میزان پایداری سنگ در برابر شکست تحت تنشها و فشارهای وارد بر آن است. این فشارها و نیروها ممکن است به صورتهای فشاری، برشی و کششی باشد. مقاومت سنگ به صورتهای مختلف بیان می شود که یک نمونه مقاومت فشاری تک محوری است. این پارامتر مقدار مقاومت در برابر نیروی محوری است که به وسیلهی آزمایش، نگارهای چاه و روابط تعیین می شود (2015, Omdal, 2015). است که به وسیلهی آزمایش، نگارهای چاه و روابط تعیین می شود (2015, Omdal, 2015) معوری است که به وسیلهی آزمایش، نگارهای چاه و روابط تعیین می شود (2015, Omdal, 2015). برطبق مقاومت فشاری تک محوری است. این پارامتر مقدار مقاومت در برابر نیروی محوری است که به وسیلهی آزمایش، نگارهای چاه و روابط تعیین می شود (2015, Omdal, 2015). بروچ و فرانکلین[†] بر طبق مقاومت سنگ طبقهبندیهای مختلفی برای سنگها ارائه شده است که شکل (۲–۲) طبقهبندی UCS بر طبق مقاومت سنگ (۱۹۷۳)، دیر و میلر[†] (۱۹۶۶)، انجمن زمین شناسی[†] (۱۹۷۰)، بروچ و فرانکلین[†] می در ۱۹۷۲)، جنینگس⁶ (۱۹۷۳)، بنیاوسکی[†] (۱۹۷۳) و انجمن بین المللی مکانیکسنگ[†] (ISRM). را نشان

مقاومت فشاری به عنوان مهمترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ همواره در تحقیقات مورد توجه بوده است. وارن (۱۹۸۱) یک مدل نرخ نفوذ حفاری به صورت دو بخشی ارائه کرده است که در آن، میان ویژگیهای ژئومکانیکی مقاومت سنگ را در نظر گرفته است. همچنین در ارتباط با دادههای حفاری، یک الگوریتم خوشهبندی توسط مستوفی و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است که در نتایج حاصل مقاومت سنگ بر اساس اطلاعات حفاری و نگارهای گل حفاری تخمین زده می شود. عواملی که بر مقاومت فشاری تک محوره تاثیرگذارند عبارتند از نوع سنگ، موقعیت فضایی اجزا تشکیل دهنده، نرخ هوازدگی یا دگرسانی، ریزتر کها

[\]Coates

^r Deere and Miller

[&]quot; Geological Society

⁺ Broch and Franklin

^a Jennings

⁹ Bieniawski

^v International Society of Rock Mechanics

و شکستگیهای درونی، کشسانی و خمیرسانی سنگ، چگالی و تخلخل (اصانلو، ۱۳۷۵; ۱۹96). Mostofi, *et al.*, 2011).



شکل (۲- ۲). طبقهبندی مقاومت سنگها بر اساس محدودهی UCS در تحقیقات گوناگون (Bieniawski, 1984) دیگر حالت بیان مقاومت سنگ به صورت مقاومت فشاری محصور ⁽(CCS) است. این پارامتر نشاندهندهی مقدار مقاومت سنگ در حالت محصور از اطراف ته چاه است. CCS یک پارامتر مهم در مسائلی مانند بهینهسازی حفاری، انتخاب مته و پیشبینی نرخ نفوذ حفاری به شمار میرود. مدلهای زیادی در این زمینه مطرح شده است که میتوان به مدل CCS، رمپرسد^۲ و همکاران (۱۹۹۴) (رابطه ۲-۱) اشاره کرد. در این مدل یک تابع توانی ارتباط میان مقاومت سنگ و فشار محصور کننده اطراف را نشان میدهد. همچنین شی^۳ و همکاران (۲۰۱۵) (رابطه ۲-۲) با استفاده از ویژگیهای تخلخل سنگ و در نظر گرفتن پارامترهای Shi, *et al.*, 2015; Terzaghi, ارائه کردهاند (را ارائه کردهاند (را بوt al., 2015; Terzaghi).

۳ Shi

¹ Confined Compressive Strength

^r Rampersad

$$S = S_0 (1 + a_s P_e^{b_s})$$
 (۱-۲)
 $\sigma_1 - \sigma_3 = CCS \times \exp(-\varphi \times m)$
 c_1 (۲-۲)
 $c_1 - \sigma_3 = CCS \times \exp(-\varphi \times m)$
 $c_2 \sigma_1 \sigma_2 \sigma_1 \sigma_2$
 $c_3 \sigma_1$ (۲-۲)، S همان CCS و CCS یعنی UCS و $a_s \sigma_1 \sigma_2$ های سنگ و مته است. در رابطه (۲-۲)،
 m پارامتر وابسته به نوع سنگ، $\sigma_1 \sigma_2$ و σ_1 به ترتیب تنشهای اصلی حداکثر و حداقل و φ تخلخل است.
 m -۴-۴-۲ تنشهای برجا

تنش در هر نقطهای از زمین وجود دارد و مقدار آن وابسته به عمق، فشار منفذی و ویژگیهای زمینشناسی ساختاری متغیر است. به طور ساده، تنش مقدار نیروی فشاری وارد بر سطح میباشد. در محاسبات مهندسی مکانیکسنگ با واحدهای مگاپاسکال و PSI معمولاً بکار میرود. تنش به صورت تانسور چگالی مقادیر نیروها در سطحهای مختلف تعریف می شود (Zoback, 2007).

با شناسایی انواع گسلها (شکستکیها) نرمال، امتداد لغز و معکوس و استفاده از تنشهای اصلی به همراه نمایش آنها در دایره ی موهر ^۱ به صورت سه بعدی تحلیلهای تنش انجام می شود. این تحلیلها در جدول (۲-۲) نمایش داده شده است که در آن S_{v} ، S_{h} و S_{h} به ترتیب تنشهای قائم، افقی حداقل و حداکثر و همچنین $E_{c,2,1}S$ تنشهای اصلی هستند. در حالت دو بعدی دایره ی موهر به منظور تشریح تنشهای نرمال و برشی در صفحه، از جهت افق برای مقدار تنش و جهت حرکت عقربههای ساعت نسبت به افق برای مقدار زاویه استفاده می شود (Donoso, 2016; Jaeger, *et al.*, 2007; O'Connell, 1994; Zoback, 2007).

S ₃	S_2	S_1	نوع گسل (مولفههای تنش)
S_h	$S_{\rm H}$	S_v	نرمال
S _h	Sv	S _H	امتداد لغز
Sv	S_{h}	S _H	معكوس

جدول (۲- ۱). تشریح حالات مختلف قرار گیری گسلها طبق تنشهای برجا (Zoback, 2007)

' Mohr

تنشهای برجا نوعی از بیان تنشها است که در اثر تغییرات در زمین در طول سالها ایجاد و ذخیره شدهاند. تنشهای برجا در حفاری و بررسیهای مخزن به عنوان یک پارامتر ژئومکانیکی مورد توجه است. تنشهای قائم، افقی حداکثر و حداقل در محاسبات پایداری چاه و مدل سازیهای ژئومکانیکی مورد استفاده هستند که در شکل (۲-۲) نمایش داده شدهاند. دلیل اهمیت تنش در حفاری بحث تغییرشکل است که کرنش مینامند. کرنش متناظر از هر تنش را میتوان مانند تنش به صورت تانسوری نمایش داد. همچنین کلیهی حالتهای بیان تنش مانند تنش موثر، تنشهای اصلی و ... برای کرنش هم مطرح است (Jaeger, *et al., 2007*).



شکل (۲-۳). نمایش تنشهای برجا شامل تنشهای افقی حداقل، حداکثر و تنش قائم (O'Connell, 1994)

۲-۴-۲ سختی سنگ

سنگ (کانیهای تشکیلدهنده) در مقابل ابزار خراشدهنده و ایجاد خراش از خود مقاومت نشان میدهد که به این ویژگی سختی گفته میشود. ابزارهای خراشدهنده (انواع سرمتههای حفاری) در تماس با سنگ بوده و با توجه به نیروی اعمالی موجب خردایش آن میشوند. در مطالعات انجام شده مشخص شده است که شاخص سختی با یک تابعی به نرخ حفاری سنگ وابسته است (Kahraman, 1999). پارامتر سختی در عملیات حفاری به دلیل تاثیرگذاری بر نفوذ اولیه سرمته مورد توجه است. به طوری که سختی به عنوان اولین مقاومت سنگ در برابر عمل حفر مطرح است. عواملی که میزان سختی در سنگ را شکل میدهند عبارتند از میزان سختی کانیهای تشکیل دهنده، نیروهای چسبندگی، شکل و اندازه دانهها، همگنی سنگ و میزان محتوی آب سنگ (اصانلو، ۱۳۷۵; Jimeno, 1995).

استالدر و راینال ^۱ (۱۹۶۶) با آزمایشهایی رابطهی میان نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته و سختی (تعیین سختی با روش شرینر^۲ و همکاران (۱۹۵۸)) را بررسی کردهاند. آزمایش مذکور توسط دو نوع مته سازند نرم-متوسط و سازند متوسط-سخت با دو بار متفاوت ۲ و ۴ تن روی مته انجام شده است. طبق شکل (۲-۴) نرخ نفوذ همراه با افزایش سختی در سنگهای نرم و متوسط، کاهش مییابد اما این سیر نزولی در سنگهای سخت و با وزن روی مته مییابد اما این سیر نزولی در منگهای سختهای سختی مشخص است که در حالت وزن روی مته است. کم وارد بر سنگهای سخت در است. همچنین مشخص است که در حالت وزن روی مته کم وارد بر سنگهای سخت از تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ است (& Gstalder گروان (۲۰۱۴) می رابطهی میاند از تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ است (همکاران (۲۰۱۴) را تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ است (هموس⁷ کم وارد بر سنگهای سخت، نرخ نفوذ مستقل از تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ است (موس⁷ کم وارد بر سنگهای سختی و همکاران (۲۰۱۴) مبق آزمایشهایی رابطهی بین نرخ حفاری و سختی موهس⁷ کم وارد بر سنگهای سختی در شکل (۲۰۱۴) میتر است. می میابند، با افزایش سختی در در که روندی موهس⁷ کم وارد بر سنگهای سخت، نرخ نوز روی مته کم مالیم تر است. همچنین مشخص است که در حالت وزن روی مته کم مالیم تر است. همچنین مشخص است که در حالت وزن روی مته را تون روی مته کم مالیم تر است. همچنین مشخص است که در حالت وزن روی مته کم وارد بر سنگهای سخت، نرخ نوز می مانیم پارامترهای می است (تاثیر پارامترهای میانیکی سنگ است (گرهس⁷ را تعیین کردهاند. همانطور که در شکل (۲–۵) مشخص می باشد، با افزایش سختی نرخ حفاری روندی را که می باشد، با افزایش سختی نرخ حفاری روندی داشته است (Hoseinie, *et al.*, 2014).



شکل (۲- ۴). تاثیر سختی و شرایط مختلف وزن روی مته در دو حالت ۲ و ۴ تن بر روی نرخ حفاری (,Gstalder & Raynal 1966)

^{&#}x27; Gstalder and Raynal

^r Schreiner

[&]quot; Mohs



شکل (۲- ۵). رابطهی میان نرخ حفاری و سختی موهس بر اساس آزمایشات (Hoseinie, et al., 2014) ۲-۴-۴- زاویهی اصطکاک داخلی

رابطهی میان زاویه یا صطکاک داخلی سنگ به عنوان یک پارامتر ژئومکانیکی و روش های تعیین آن مانند استفاده از اندازه گیری های ژئوفیزیکی کمتر بررسی شده است. این ویژگی به مقدار استحکام سنگ وابسته نیست و در مواردی سنگ های ضعیف دارای اصطکاک بالایی هستند. همچنین یک رابطهی پیچیده ای میان زاویه ی اصطکاک داخلی و ویژگی های میکرومکانیکی سنگ همانند سختی سنگ (وابسته به تخلخل و میزان سیمان شدگی میان اجزای سنگ) وجود دارد. با این حال، تعدادی از آزمایش های مربوط به شیل به ارتباط مستقیم میان مدول الاستیک سنگ و زاویه ی اصطکاک اشاره می کنند که به نوعی ارتباط مستقیم با مقاومت سنگ است. در مجموع مطالب مطرح شده به پیچیدگی بررسی زاویه ی اصطکاک داخلی سنگ و ارتباط آن با دیگر پارامترهای مکانیک سنگی تاکید می کنند (1978) با دیگر پارامترهای مکانیک سنگی تاکید می کنند (1978) مقدار زاویه ی اصطکاک در مسائل حفاری و بحث پایداری چاه تاثیر گذار است. البته این پارامتر در پایداری چاه به اندازهی مقاومت موثر نیست و از سوی دیگر با وجود استفاده گسترده از پارامترهای مقاومتی در پیش بینی نرخ نفوذ، لزوماً نمی توان به تنهایی از این پارامترها در فرایند حفاری است. این مالا دازای مثال دازای نوعی از ماسه سنگ دارای مقاومت فشاری تک محوره پایین، به دلیل زاویه ی اصطکاک داخلی نسبتاً بالا دارای

۲-۴-۲ خواص الاستيسيته و پلاستيسيته

نرخ تغییر شکل ناشی از نیروی وارد بر ماده (سنگ) تابعی از خواص الاستیسیته آن است. در مکانیک سنگ این خاصیت از رابطهی میان تنش و کرنش بررسی و عنوان می شود. هنگامی که کرنش به صورت خطی با تنش افزایش یابد، رفتار الاستیک خطی است. این رفتار به عنوان یکی از تعاریف پایهای بحث الاستیسیته می باشد. به رابطهی تنش و کرنش نشان دهنده ی حالت الاستیک، قانون هوک^۱ گفته می شود و برای بیان این پارامتر اصطلاحاً مدول یانگ^۲ یا مدول الاستیک به کار می رود (Fjaer, *et al.*, 2008). قابلیت تغییر شکل، نحوهی شکست و نوع شکست سنگها به خاصیت الاستیسیته و پالستیسیته سنگها بستگی دارد. سنگها با توجه به نحوهی تغییر شکل و بر اساس تنشهای تولید شده در اثر بارهای استاتیکی به سه دسته الاستیک ترد، پلاستیک ترد و فوق العاده پلاستیک یا بسیار متخلخل قابل تفکیک می باشند. حالت پلاستیک برخلاف الاستیک، ماده (سنگ) به حالت اولیه خود باز نمی گردد. در این حالت با افزایش تنش، به همان نسبت کرنش تغییر نمی کند و تغییر شکل بیشتر از اعمال تنش وارد شده می باشد (بارهای ا

۲-۵- تحقیقات پیشین در زمینه ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری

با تعریف مهمترین پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی حفاری در بخشهای ۲-۳ و ۲-۴، در این قسمت مروری بر تحقیقات گذشته با موضوع ارتباط میان پارامترهای مذکور انجام میشود. تمرکز اصلی اکثر تحقیقات بر تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل عملیاتی حفاری بوده است. به طور کلی در دهههای اخیر مطالعات به سوی استفاده از روشهای هوشمند سوق یافته است. در ادامه به مرور تحقیقات آزمایشگاهی و تحقیقات آماری و هوشمند پرداخته خواهد شد.

^{&#}x27; Hooke's law

^r Young's modulus

۲–۵–۱– تحقیقات آزمایشگاهی

یکی از اولین تحقیقات آزمایشگاهی مربوط به بیل استین و کنون^۱ (۱۹۵۰) میباشد. در تحقیقات با انجام یک سری آزمایشهای محدود بر روی نمونه سنگهای تحت عنوان سازند نیمهسخت و نرم و همچنین تغییرات پارامترهای وزن روی مته، سرعت چرخش مته و اضافه کردن دستگاههای نازل هیدرولیکی بر مته، روند حفاری را بررسی کرده است. شکل (۲–۶) نمونهای از نمودارهای آزمایشات است که در قسمت چپ نمودار مقادیر نرخ نفوذ حفاری نسبت به وزن روی مته رسم شده است. در این حالت مقادیر وزن روی مته افزایش یافته و سرعت چرخش مته ثابت است و همچنین آزمایش در دو حالت مته با جت آب و بدون جت آب در دو سازند نیمهسخت و نرم انجام شده است. مقادیر نرخ نفوذ حفاری در سازند نیمهسخت بالاتر است اما در یک مقدار با وجود افزایش وزن روی مته به روند صعودی خود ادامه نداده است. این موضوع اهمیت تغییرات وزن روی مته در محیطهای با سنگهای سخت را نشان میدهد. در قست راست نمودار تاثیر هیدرولیک مته در انتخاب مته با جت آب در محیط نرم ارائه میشود. در این حالت شیب نمودار محیط نرم در حالت متغیر وزن روی مته با جت آب در محیط نرم ارائه میشود. در این حالت شیب نمودار محیط نرم



شکل (۲- ۶). نمودارهای نسبت نرخ نفوذ حفاری به وزن روی مته در دو محیط نیمه سخت و نرم (Bielstein & Cannon, 1950)

¹ Bielstein and Cannon

وارن (۱۹۸۴) بر اساس آزمایشاتی به معادلات کاربردی جهت تخمین مقادیر گشتاور مته حفاری دست یافته است. این معادلات بر اساس تغییرات عوامل وزن روی مته، سرعت چرخش مته، سیالات حفاری، هیدرولیک مته، نرخ نفوذ حفاری و سازندهای گوناگون حاصل شده است. در مطالب منتشر شده به نوع ویژگی سنگ مورد استفاده (مقاومت، الاستیک و ...) اشاره نشده است اما ضریبی جهت تعیین معادلات اولیه از ویژگی ژئومکانیکی سازند در نظر گرفته شده است. معادلات گشتاور برای دو نوع سنگ دولومیت و شیل بیان شده است که در شکل (۲-۷) معادله گشتاور و نمودار تطبیق گشتاور تخمینی و واقعی برای سنگ دولومیت با فشارهای مختلف داخل چاه (چال) نمایش داده شد. در معادله گشتاور (M)، R نرخ نفوذ حفاری ((if h)، R) سرعت چرخش مته (rev/min) و b ابعاد مته (in) می باشند (Warren, 1984).



شکل (۲– ۷). معادله گشتاور و نمودار تطبیق گشتاور تخمینی و واقعی سنگ دولومیت با فشارهای مختلف (Warren, 1984) میان مطالعات آزمایشگاهی در دهههای اخیر، جودزیس و همکاران (۲۰۰۷) با انجام آزمایشات بر روی نمونه سنگهای ماسهسنگ، شیل و مرمر و ایجاد شرایط فشار در حالت ته چاهی (فشار بالای ۱۰۰۰ (۱۰۰۰۰) و همچنین تغییرات وزن روی مته و سرعت چرخش مته به دنبال تخمین نرخ نفوذ حفاری و انرژی ویژه حفاری بودهاند. در بین نتایج منتشر شده به نقش بکارگیری سیال حفاری (بر پایه آبی یا روغنی)، میزان

^{&#}x27; Judzis

مقاومت سنگ و نیز شرایط فشار گوناگون در تغییرات نرخ نفوذ حفاری در شرایط مقدار یکسان وزن روی مته اشاره شده است. در شکل (۲–۸) نمودارهای این آزمایشات به تصویر کشیده شده است. نمودار سمت چپ مربوط به ماسه سنگ و سمت راست مرمر است. هردو نمودار نسبت نرخ نفوذ به وزن روی مته با مته های گوناگون و سیال پایه آبی را نمایش میدهند که مقادیر نرخ نفوذ حفاری در ماسه سنگ با مته های مشابه بالاتر می باشد که این ویژگی را میتوان در شرایط ثابت بودن متغیرهای دیگر به مقاومت سنگ نسبت داد (Judzis, *et al.*, 2007).



شکل (۲- ۸). نمودارهای نسبت نرخ نفوذ به وزن روی مته؛ ماسه سنگ (چپ) و مرمر (راست) (Judzis, et al., 2007) پر پایه ویژگی های مکانیکی و میکروساختاری سنگ ها قابلیت حفاری را بررسی و آزمایش پراساد ^۲ (۲۰۰۹) بر پایه ویژگی های مکانیکی و میکروساختاری سنگ ها قابلیت حفاری را بررسی و آزمایش کرده است. این ویژگی ها به یک مقیاس معین آورده شده و برای سنگ های گوناگون آزمایش و تعیین شده است. ویژگی های مذکور شامل مقاومت تک محوری سنگ، زاویه ی اصطکاک موهر، اندازه کانی های تشکیل دهنده و دانه بندی سنگ، چگالی، کیفیت سنگ بر اساس طبقه بندی Q، موج صوتی فشاری و تخلخل است. به طور مثال برای سنگ آهک، پارامترهای دانه بندی سنگ و ابعاد، تخلخل، موج صوتی فشاری، زاویه ی اصطکاک موهر و مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب در اولویت بیشترین به کمترین مقدار تاثیر گذاری بر قابلیت حفاری بیان شده اند (۲۰۰۹).

^{&#}x27; Prasad

وان هونگ^۱ و همکاران (۲۰۱۵) نمونه سنگهای آهک، گرانیت، ماسهسنگ، انیدریت، بازالت و گابرو را در شرایط استفاده از متههای ضربهای چرخشی و کاجی با مقادیر وزن روی مته متغیر مورد آزمایش قرار دادند. در نتایج این تحقیق به تاثیر مقاومت فشاری تکمحوری، مقاومت کششی، مقاومت فشاری سه محوری بر نرخ نفوذ حفاری تاکید و برای هریک از متغیرهای ژئومکانیکی مذکور نسبت به ROP معادلهای مطرح شده است. شکل (۲–۹) نتایج آزمایشات انجام شده بر روی سنگها را نشان می دهد که در آن تاثیر نوع مته و مقدار وزن روی مته مشخص است. در سنگهای با مقاومت بالا تاثیر افزایش وزن روی مته کمتر شده است و به طور کلی در این سنگها مقدار ROP در حفاری با متههای چرخشی ضربهای بیشتر از حالت متههای کاجی است (کی در این سنگها مقدار Van Hung, *et al.*, 2015).



شکل (۲- ۹). نسبت نرخ نفوذ به وزن روی مته؛ سنگهای آهک، گرانیت، ماسهسنگ، انیدریت، بازالت و گابرو (,Van Hung) et al., 2015

۲-۵-۲ تحقیقات آماری و هوشمند

در میان تحقیقات بخش آماری و هوشمند، یکی از مطالعات پیشگام و پرکاربرد مربوط به بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) است. این تحقیق بر اساس روش رگرسیون چندگانه، معادلاتی برای بهینهسازی حفاری ارائه می کند. هشت تابع ورودی جهت تعیین معادله نرخ بهینه حفاری به کار گرفته شد که یکی از آنها مربوط به ویژگی مقاومت سازند است. در میان دیگر توابع تاثیر پارامترهای حفاری مانند وزن روی مته، هیدرولیک، سرعت

[\] Van Hung

چرخش، سایش و ابعاد مته حفاری لحاظ شده است (Bourgoyne & Young, 1974). مطالعه مذکور مبنای تحقیقاتی (Bourgoyne & Young, 1974) در دهههای اخیر بوده است. در تحقیق ارن^۱ (۲۰۱۰) از روش بورگوین و یانگ جهت تخمین و بهینهسازی نرخ نفوذ حفاری به صورت آنی^۲ بهره گرفته شد. پارامترهای مورد استفاده مشابه روش پایه بوده اما در تعیین پارامترها از دستگاههای نوین نگارگیری حین حفاری^۳ (LWD) استفاده مشابه روش پایه بوده اما در تعیین پارامترها از دستگاههای نوین نگارگیری حین حفاری^۳ (۱۹۰۲) استفاده مشابه روش پایه بوده اما در تعیین پارامترها از دستگاههای نوین نگارگیری حین حفاری^۳ (LWD) استفاده مشابه روش پایه بوده اما در تعیین پارامترها از دستگاههای نوین نگارگیری حین حفاری^۳ (داستر) استفاده شده است. شکل (۲–۱۰) نتیجه استفاده ترکیبی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری با روشهای آماری جهت تخمین ROP، مقدار بهینه ROP و مقایسه با مقدار واقعی ثبت شده این تحقیق است. مقادیر تخمینی و واقعی بسیار نزدیک بهم میباشند و از مقادیر بهینه میتوان برای افزایش رادمان حفاری استفاده کرد (2010).



شکل (۲- ۱۰). نتیجهی روشهای آماری در سه حالت تخمین ، مقدار بهینه و مقایسه با مقدار واقعی ROP (Eren, 2010)

^{&#}x27; Eren

^r Real time

^{*} Logging While Drilling

دیگر تحقیق ذکر شده بر پایه یرابطه ی بور گوین و یانگ (۱۹۷۴) یعنی ایروان ^۱ و همکاران (۲۰۱۰)، از توابع مشابه شامل پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری بر اساس مدل نرخ نفوذ حفاری، مقدار بهینه یوزن روی مته را تخمین زدهاند. رابطه ی (۲–۲) تابع بهینه یوزن روی مته این مطالعه را نشان می دهد. در آن w وزن روی مته با واحد (b)، d ابعاد مته (in)، H مقدار ثابت مربوط به نوع مته و همچنین a5 و a6 ثابت های توابع هستند که با روش های آماری بر روی داده ها تعیین می شوند. در نتایج به استفاده از تابع مورد نظر در چاه های مجاور و کاهش هزینه های حفاری اشاره شده است.

$$\left(\frac{w}{d_b}\right)opt = \frac{a_5 H_1\left(\frac{w}{d_b}\right) \max + a_6\left(\frac{w}{d_b}\right)t}{a_5 H_1 + a_6} \tag{(7-7)}$$

دیگر رابطهی مطرح و پایهای در بخش آماری و هوشمند، مدل ارائه شده به وسیلهی وارن (۱۹۸۷) است که در رابطه (۲-۴) مشخص میباشد. در این رابطه از پارامترهای حفاری در کنار پارامتر ژئومکانیکی به منظور تخمین مدل نرخ نفوذ حفاری استفاده شده است. پارامتر ژئومکانیکی مورد استفاده در این رابطه با S نشان داده شده و نشان دهندهی مقدار مقاومت محصور است. دیگر پارامترها؛ N سرعت چرخش مته، W وزن روی مته، a، d و c ثابتهای وابسته به ابعاد مته، D قطر مته، μ و γ مربوط به ویژگیهای سیال هستند (Warren, 1987).

$$ROP = \left[\frac{aS^2D^3}{NW^2} + \frac{b}{ND} + \frac{c\gamma D}{F_{jm}}\right]^{-1}$$
(۴-۲) رابطه (۴-۲) (۱۹۸۷) رابطه مقاومت مورد استفاده در مدل اشاره نشده است اما در رابطه هارلند و
در رابطه وارن (۱۹۸۷) به نوع مقاومت مورد استفاده در مدل اشاره نشده است اما در رابطه مهارلند و

۱ Irawan

^r Hareland & Hoberock

(CCS) استفاده شده است. این رابطه تاثیر یکی از پارامترهای ژئومکانیکی یعنی CCS در کنار پارامترهای مهم حفاری (WOB و WOB) در مدل نرخ حفاری را حائز اهمیت می شمارد. ذکر این نکته ضروری است که در تعیین مدلهای مذکور تعدادی از پارامترها با انجام آزمایش حاصل شدهاند. پارامترهای رابطه (۲–۵)؛ α و θ زاویهی قرارگیری مته و سایر پارامترها همانند رابطه (۲–۴) است (Hareland and Hoberock, 1993).

$$ROP = \frac{14.14WOB.RPM.Cos\alpha}{CCS.d_b.\tan\theta} \cdot \frac{a}{RPM^b.WOB^c}$$
 (۵-۲) رابطه (۵-۲)

$$ROP = K \frac{80.n_t .m.RPM^{0.64}}{d_b^2 .\tan^2 \psi} \left(\frac{1}{C_2} \left(\frac{WOB}{100.n_t .l.\sigma_p} - C_1 .w \right) \right)^{0.89} \cdot \left(1 - d \left(\frac{DG}{8} \right)^c \right)$$
(۶-۲) (۶-۲)

محمدی بهبود و همکاران (۲۰۱۶) در تعیین پارامترهای موثر بر انرژی ویژه حفاری از روشهای آماری و هوشمند استفاده کردهاند. در ورودی دادههای مدل از دو بخش پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری بهره گرفته شده است. در نتایج از میان پارامترهای ژئومکانیکی، مدول یانگ و مقاومت فشاری تکمحوری را دارای بیشترین تاثیر بر پارامتر انرژی ویژه حفاری با ضرایب همبستگی بالای ۸۰ درصد عنوان کردهاند (*et al.*, 2016).

با بهره گیری از روش هوش مصنوعی تحقیقات متعددی جهت تخمین پارامتر حفاری انجام گرفته است. در تحقیقات نوروزی و همکاران (۲۰۱۷) و عباس و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش های هوش مصنوعی، به عنوان ورودی به ترتیب تحقیقات ذکر شده از پارامترهای نگارهای چاه (به عنوان ورودی تعیین پارامترهای ژئومکانیکی) و پارامترهای مقاومت تک محوری، تنش ها (قائم و افقی) و فشارمنفذی برای تخمین نرخ نفوذ استفاده شده است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی تعیین پارامترهای استفاده شده است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بکار رفته است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بکار رفته است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بکار رفته است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بکار رفته است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بکار رفته است. همچنین عوامل حفاری مانند نرخ جریان سیال، وزن روی مته و ... به عنوان ورودی مدل بخار رفته است. در نتایج پارامتر نرخ نفوذ نسبت به مقدار واقعی با ضریب همبستگی بالای ۸۷ درصد در هر دو تحقیق تخمین زده شده و به تاثیر استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی در تخمین پارامتر حفاری ارخ نفوذ و افزایش ضریب همبستگی تاکید شده است (۲۰۱۷) با بیان رابطهی (۲–۷) با استفاده از تحقیقات گذشته بینگهام^۱ (۱۹۶۵) و استفاده از روشهای هوشمند، شاخص جدیدی برای نرخ حفاری ارائه کردهاند. این شاخص جدید نقش استفاده از روشهای هوشمند، شاخص جدیدی برای نرخ حفاری ارائه کردهاند. این شاخص جدید نقش استفاده از روشهای مقاومت فشاری محصور (CCS) را در نظر گرفته است. در نتایج به افزایش دقت تخمین استفاده از مروشای گرومکانیکی و حفاری را در روند خان خرمین پارامتر ژئومکانیکی مقاومت فشاری محصور (CCS) را در نظر گرفته است. در نتایج به افزایش دقت تخمین نرخ حفاری تاکید شده است. این موضوع ارتباط متقابل میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری را در روند خان محموی را در را در روند گرومکانیکی و حفاری دا (۸۰ کار در ار در روبی).

$$ROP = W_f \left(\frac{G.RPM^{\gamma}.WOB^{\alpha}}{d_b.CCS} \right)$$
 (۲-۲) رابطه (۲-۲)

۲-۶- جمعبندی

عملیات حفاری و بخشهای مرتبط با آن گسترهی وسیعی از تجهیزات عملیاتی را شامل میشوند. در بخشهای ابتدایی فصل دوم، به طور خلاصه تجهیزات عملیات حفاری (بخش زیادی مربوط به تجهیزات

[\] Bingham

سیستم حفاری چرخشی) تشریح شد. تجهیزات حفاری در بخشهای مختلف بر پارامترهای عملیاتی حفاری تاثیر می گذارند. به طور مثال نحوهی گردش گل حفاری و فشار پمپ گل بر کیفیت اعمال وزن روی مته و نرخ حفاری اثر گذار است. بنابراین مروری کلی بر تجهیزات حفاری و زیرمجموعههای آن انجام گرفت. بخشهای کلی مطرح شده شامل دکل حفاری، تجهیزات ایجاد فشار و چرخش گل حفاری، تجهیزات بالا برنده و چرخشی است.

در ادامه فصل، همسو با موضوع تحقیق و با توجه به تقسیم بندی اولیه، پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری تعریف شد. در هریک از بخشهای تشریح پارامترها، آزمایش یا نمونهای کاربردی از پارامتر مورد نظر در عملیات حفاری ذکر شد. دلیل اصلی ذکر جزئیات مهم ترین پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری این موضوع است که با توجه به اهداف مطرح شده این تحقیق ارتباط میان پارامترها (ژئومکانیکی و عملیاتی)، مورد بررسی قرار خواهد گرفت، بنابراین شناخت پارامترها در وهلهی اول اهمیت مییابد.

در بخش نهائی، مروری بر تحقیقات گذشته در رابطه با ارتباط میان ویژگیهای ژئومکانیکی و عوامل حفاری انجام گرفته است. تحقیقات آزمایشگاهی و تحقیقات آماری و هوشمند دو قسمت این مرور را در برگرفته اند. در تحقیقات آزمایشگاهی تلاشها در جهت تعیین ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی مانند مقاومت و عوامل حفاری مانند وزن روی مته، سرعت چرخش و نرخ نفوذ بوده است. در بررسیهای آماری و هوشمند ویژگیهایی همچون مدول الاستیک و زاویهی اصطکاک علاوه بر پارامترهای ذکر شده، مورد استفاده قرار گرفته است. هدف نهایی همهی تحقیقات روشن شدن نحوهی تاثیرگذاری پارامترها بر یکدیگر و چگونگی دستیابی به عملیات حفاری موثرتر میباشد.

فصل سوم

مدلسازی ژئومکانیکی چاههای مورد مطالعه

۳-۱-۳ مقدمه

علم ژئومکانیک پیشنهادهایی در خصوص نظر گرفتن شرایط زمین و استفاده از شیوههای نوین به شرکتهای طراحی و اجرای عملیات حفاری چاهها عنوان کرده است. جزئیات طراحیها و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در مدلسازیهای ژئومکانیکی مشخص میشوند. این مدلها باعث دستیابی به موفقیت در زمینهی کاهش زمانهای غیرحفاری میشوند. همچنین برای اجتناب از مسائل حفاری مانند گیرکردن لولهی حفاری، از دست رفتن جریان گل در حال گردش و تصمیم گیری سریع در هنگام عملیات حفاری، استفاده از مدلهای ژئومکانیکی ارزشمند است.

بهره گیری از مدلهای ژئومکانیکی و اطلاعات آنها باعث فهم بهتر از شرایط تنش منطقه، فشار منفذی و ویژ گیهای مکانیکی سنگها میشود. از سوی دیگر پیش بینی مخاطرات حفاری مانند شکست بر اثر تغییرات فشار و فوران چاه، با کمک مدلهای از پیش تعیین شده تا حدودی امکان پذیر است. یکی از انواع این مدلها، مدل یک بعدی ژئومکانیکی یا مدل مکانیکی زمین ^۱ (MEM) است. این مدل شامل بخشهای بررسیهای سنگ شناسی، جمع آوری اطلاعات سازندی، دادههای ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی چاه، مقاومت سنگ و فشار منفذی سازندها در اعماق مختلف چاه، ویژ گیهای مکانیک سنگی مانند مدول الاستیک، ویژ گیهای تنشهای ناحیه مورد بررسی، امکان پیش بینی شرایط شکست سنگهای اطراف چاه با معیارهای شکست مختلف و در نهایت تعیین پنجره ایمن گل حفاری می باشد. اطلاعات پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از اطلاعات پتروفیزیکی یا ژئوفیزیکی و یا از طریق آزمایشات مکانیک سنگی مستقیم مشخص می شوند.

دادههای حاصل از آزمایشهای مکانیکسنگ جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی مدل، دارای قطعیت بالاتری هستند اما با توجه به هزینههای این آزمایشها و مشکلات دسترسی مستقیم در چاه، معمولاً از

^{&#}x27; Mechanical Earth Model

دادههای نگارهای چاه استفاده میشود. نگارهای چاه شامل بخشهای نگارهای گاما، چگالی، تخلخل (نوترون) و صوتی است. در این فصل پس از معرفی میدان و چاههای مورد مطالعه، توضیحاتی مختصر در رابطه با نگارهای پتروفیزیکی داده میشود و سپس نحوهی ساخت مدل ژئومکانیکی یکبعدی چاهها تشریح می گردد.

۲-۲- معرفی میدان مورد مطالعه

میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین میادین نفتی حوضه دزفول شمالی میباشد که از شمال غرب به میدان کوپال و از غرب به میدان رامین و از شمال شرقی به میدان آغاجاری محدود می گردد. این میدان در فاصله ی ۶۰ کیلومتری شرق شهرستان اهواز و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان رامهرمز واقع است. میدان مارون (شکل ۳–۱) در فرو افتادگی دزفول از کمربند چینخورده زاگرس واقع شده است. رخنمون سطحی ایس میدان سازند آغاجاری بوده و سازندهای آسماری، گروههای بنگستان و خامی، مخازن نفتی موجود در ایس میدان میباشند (گزارش شرکت م. ن. جنوب، ۱۳۸۷).

کمربند چین خوردگی-روراندگی زاگرس که به طول ۲۰۰۰ کیلومتر از جنوب شرق ترکیه به طرف شمال عراق و سوریه، تا غرب و جنوب ایران گسترش یافته و با میادین هیدروکربوری بسیار عظیم خود پربارترین کمربند چینخوردگی- راندگی جهان میباشد. فروافتادگی دزفول قسمتی از کمربند چینخورده زاگرس است که در قسمت جنوب خوزستان واقع شده است. این ناحیه وسعتی در حدود شصت هزار کیلومتر را شامل میشود. ۴۵ میدان نفتی در این ناحیه قرار دارد که میزان ذخیره نفتی این میادین حربند میلیارد بشکه یعنی در حدود ۸ درصد کل ذخیره نفتی جهان میباشد. از کرتاسه تا میوسن در کمربند چینخورده زاگرس سیستمهای نفتی را بخصوص در قسمت فروافتادگی دزفول میتوان تشخیص داد. این سیستمها شامل مخازن آسماری، بنگستان و خامی میباشند. در ادامه این قسمت به معرفی سازندهای میدان و خصوصیات چاههای مورد مطالعه پرداخته خواهد شد (گزارش شرکت م. ن. جنوب، ۱۳۸۷).



شکل (۳- ۱). موقیعت میدان نفتی مارون در حوضه نفتی جنوب (شرکت ملی نفت ایران)(گزارش مارون، ۱۳۸۷) ۳-۲-۲ – سازندهای میدان مارون

طبق گزارشها و منابع موجود خصوصیات چینهشناسی و رسوبشناسی سازندهای تشکیلدهندهی ستون چینهشناسی تاقدیس مارون گردآوری شده است. مهمترین سازندهای بخشهای مختلف این میدان شامل گروه خامی، گروه بنگستان و سازند آسماری است که هرکدام دارای زیرمجموعههای سازندی هستند. در ادامه ویژگیهای سازندهای میدان به اختصار تشریح میشود.

۳-۲-۱-۱- گروه خامی

گروه خامی میدان مارون شامل سازندهای داریان، گدوان، بخش آهکی خلیج و فهلیان است. زون بندی انجام شده توسط پاکدامن (۱۳۸۰) بر اساس اطلاعات چاهها، مخزن خامی را به ۶ زون تقسیم کرده است. این زونها شامل زون ۱ سازند داریان، زون ۲ بخش بالایی گدوان، زون ۳ بخش خلیج، زون ۴ بخش پائینی گدوان و زون ۵ و ۶ سازند فهلیان می اشند (پاکدامن، ۱۳۸۰؛ گزارش شرکت م. ن. جنوب، ۱۳۸۷).

یک چرخه یرسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام را میتوان در زاگرس شناسایی کرد که مجموعه ی سازندهای یادشده، گروه بنگستان نامیده شده است. در گزارشات جدیدتر سازند کژدمی در این گروه حذف شده است. در این صورت گروه بنگستان شامل دو سازند سروک (در پائین) و سازند ایلام (در بالا) خواهد بود. طبق مطالعات انجام شده توسط اسپیر^۱ و قنوانی مخزن بنگستان به ۹ زون تقسیم شده است (مطیعی،۱۳۷۲؛ قنواتی، ۱۳۷۹؛ Speer, 1978؛ گزارش شرکت م. ن. جنوب، ۱۳۸۷).

۳-۲-۱-۳- سازند آسماری

این سازند در برش نمونه یعنی کوه آسماری دارای ۳۱۴ متر ضخامت بوده و از سنگ آهکهای مقاوم قهوهای رنگ با میان لایههای شیلی تشکیل شده است. حد بالایی آن سازند گچساران و حد پائینی به سازند پابده محدود می شود. این سازند دارای دو بخش ماسه سنگی اهواز و تبخیری کلهر است (مطیعی، ۱۳۷۲). طبق مطالعات قلی پور (۱۳۶۸)، شرکت اینترا^۲ و شرکت استات اویل^۳ (۲۰۰۳) به ترتیب ذکر شده، مخزن آسماری را به ۵ لایهی اصلی و ۵ زیرلایه، ۱۵ لایهی مخزنی و ۱۹ لایه مخزنی تقسیم کردهاند. جزئیات زون بندی های قلی پور (۱۳۶۸) جهت تشکیل واحدهای ژئومکانیکی در فصل پنجم تشریح خواهد شد.

^{&#}x27; Speer

۲ Intra

^r State oil

۳-۲-۲- خصوصیات چاههای مورد مطالعه

در این تحقیق از دو چاه میدان مارون ابتدا برای مدلسازی و سپس جهت بررسی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری استفاده میشود. این دو چاه قائم در این مطالعه به نامهای چاه شماره ۱ و ۲ نامگذاری شدهاند. چاه شماره ۱ ناحیهی مخزنی آن در سازند آسماری قرار گرفته است و خصوصیات سنگشناسی آن ترکیبی از سنگهای آهک و ماسهسنگ به همراه لایههای شیلی مارنی نازک میباشد. با توجه به قرار گرفتن این چاه در فروافتادگی دزفول میدان مارون، یکی از عمیق ترین نواحی قرارگیری مخزن آسماری یعنی عمقهای بیشتر از ۳۵۰۰ متر است. عمق مورد بررسی در چاه شمارهی ۱ از ۲۵۵۷ تا ۳۹۲۴ متر میباشد که فواصل اطلاعات پتروفیزیکی در هر ۱۵/۱۵۲۴ متر جهت مدل سازی به کار گرفته شده است.

چاه سماره ۲ تاخیه ی مورد بررسی سامل محرن سروک از ریز مجموعه ی سارند بندستان است. از تخط سنگ شناسی، بخش غالب سنگ های آهک به همراه لایه های نازک ماسه سنگ و شیلی مارنی می باشد. در مقایسه با دیگر مخازن سروک، این چاه جزء نواحی نه چندان عمیق متقاطع با سازند سروک است. عمق بررسی چاه شماره ی ۲ اعماق ۳۵۰۱ تا ۳۹۸۴ متر را در برمی گیرد و همانند چاه شماره ۱ در هر عمق ۲۰۱۵۲۴ متر مدل سازی انجام گرفته است.

۳-۳- نگارهای چاهپیمایی

در چاهپیمایی با اندازه گیری ویژگیهای فیزیکی سنگهای پیرامون چاهها و گمانههای حفرشده، به بررسی کمی و کیفی آنها پرداخته میشود. در این روشها به وسیلهی گیرندههایی (در مواردی فرستنده و گیرنده) ویژگیهای مورد نظر در سنگها را اندازه گیری و به وسیلهی سیمهای رابط به سطح زمین گسیل میکنند (رمضی، ۱۳۸۵; Schlumberger, 2015).

دادههای فرستاده شده به سطح زمین، توسط ابزار لازم مورد پردازش قرار گرفته و نتیجه معمولاً به صورت نگار یا نگارهایی ثبت میشود. در حال حاضر یکی از مباحث مهم در صنعت نفت و گاز، زمان صرف شدن فعالیتها است، بنابراین انتقال دادههای حاصل از نگارگیری برای گرفتن تصمیمات حیاتی در زمان سریع و به صورت موثر اهمیت دارد (رمضی، ۱۳۸۵; Schlumberger, 2015). در ادامه این قسمت انواع نگارهای متدوال به اختصار تعریف می شوند.

۳-۳-۱ نگار مقاومت

تلاش برای اندازه گیری مقاومت ساختار برای متخصصین پتروفیزیک در طول دههها به عنوان یک چالش بود. ابزارهای آرایههای مقاومتی در چند عمق مختلف بدون تاثیر گذاری موضوعات دیگر قادر است که درک و تجسم بهتری از روند هجوم سیال به چاه ایجاد کند. محاسبه مقاومت سازند روش متداولی است که به ارزیابی مخزن و شناخت خواص سیالات و سنگ مخزن کمک میکند (رمضی، ۱۳۸۵; weatherford).

۳–۳–۲– نگار پرتو گاما^۲

نگار گاما معمولاً نمایانگر رس یا در مخازن نفتی، شیل در سازندها است. دلیل این موضوع وجود فراوان پتاسیم ۴۰ به عنوان سرچشمه پرتو گاما در رس میباشد. نگارهای پرتو گاما به سه صورت نگارهای پرتو گامای طبیعی (GR)، نگار طیفی پرتو گاما^۳ (SGL) و نگار گامای تصحیح شده (CGR) متداول هستند (Schlumberger, 2015).

۳-۳-۳ نگار صوتی^۴

این نگار سرعت انتشار امواج در درون سازند را اندازه گیری می کند و زمان عبور موج از داخل ضخامت معینی از آن را نشان میدهد. براساس اطلاعات سرعت موج صوتی ویژگیهای ساخت، بافت، تخلخل و ترکیب

^{&#}x27; Resistivity log

^r Gamma ray

^r Spectrometry Gamma log

[†] Sonic log

کانیشناسی سنگها بدست میآید. دو حالت امواج فشاری و برشی در روشهای نگارگیری صوتی متداول هستند (رمضی، Schlumberger website, ۱۳۸۵).

۳-۳-۴ نگار نوترون

در این حالت نگارگیری، یک چشمهی نترونزا و یک گیرنده در سوند جاسازی می شوند و از چشمه نترون ها با انرژی زیاد به طرف سازند گسیل می شوند. این بر خورد نترون ها باعث جذب مقدار زیادی از انرژی نترون ها می شود و در ادامه توسط گیرنده دریافت می گردد. این نوع نگارگیری عمدتاً برای تعیین تخلخل سازند استفاده می شود (Weatherford website ; رمضی، ۱۳۸۵).

۳-۳-۵- نگار چگالی

ابزار اندازه گیری چگالی دارای چشمه تولیدکننده اشعهی گاما و آشکارهای اشعهی گاما میباشد که در هنگام نگارگیری در مقابل سازند قرار می گیرد. به طور مثال ابزار چگالی سه حسگره^۲ (TLD) شرکت شلومبرژه ضریب فوتوالکتریک و چگالی سازند را اندازه گیری می کند (Schlumberger, 2015). ۳-۳-۶- نگار قطر سنجی

قطر گمانه در طول چاه یکسان نیست و در نقاط مختلف تغییر می کند. علت تغییرات قطر چاه وجود زونهای خرد شده و سست است که باعث ریزش دیوارهی چاه می شود. در میان ابزارهای متداول قطرسنج می توان ابزار قطرسنج چندحسگره شرکت ودرفورد را نام برد که برای پایش آنی وضعیت درون لوله جداری و شناسایی عوارض غیر عادی مورد استفاده قرار می گیرد (Weatherford website ; رمضی، ۱۳۸۵).

[\]Neutron log

^r Three-detector lithology density

^{*} Caliper log

۳-۴- تعیین پارامترهای مدلسازیهای ژئومکانیکی

مدل ژئومکانیکی با اجزای پارامترهای ژئومکانیکی مانند مقاومت سنگ، تنش، خصوصیات الاستیسیته، زاویه اصطکاک و ... در مسائل مرتبط با حفاری همچون گیرکردن لوله یحفاری، تعیین پنجره ی ایمن گل حفاری، شکست لوله یجداری موثر است. همچنین ارزیابی خصوصیات مخزن، میزان تولید ماسه و بررسیهای عملیات شکاف هیدرولیکی با وجود مدل، بهتر انجام می گیرد (Zoback, 2010). بر طبق مطالعات (Jaeger, et al., 2007) در اثر حفاری تغییرات در تنشهای اطراف سازند رخ می دهد. این تغییرات تنش القایی و شعاعی در میزان افزایش تنش برشی نمود می یابند. در نقاطی ممکن است میزان تنشها از مقاومت فشاری سنگ بیشتر باشد و باعث شکست گردد. این مطلب لزوم بررسی چاه از لحاظ ویژگیهای مکانیکی سنگ را بیان می کند، بدین صورت که بررسیهای پایداری چاه در بخشی به ویژگیهای مکانیکی سنگها مرتبط است (Jimenez, 2007).

در این بخش مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی چاهها بر اساس دادههای صوتی و روابط موجود تعیین می شود. دقت محاسبه خواص ژئومکانیکی با استفاده از دادههای صوتی، وابسته به دقت اندازه گیری زمان سیر امواج صوتی (فشاری و برشی) می باشد. زمان سیر موج برشی در چاههای مورد مطالعه در دسترس نبود. بنابراین به ترتیب در ادامه، ابتدا تخمین سرعت موج برشی انجام گرفته است و سپس پارامترهای ژئومکانیکی تخمین زده می شوند.

۳-۴-۲ تخمین سرعت موج برشی

هنگامی که امواج فشاری توسط چشمهها ایجاد شود، در اثر برخورد امواج فشاری با دیواره، گروه جدیدی از امواج ایجاد میشوند که مهترین آنها امواج برشی هستند. در مهندسی سنگ روشهای استفاده از امواج جهت تعیین پارامترهایی مانند ویژگیهای الاستیک سنگ در حال افزایش است. در صنعت نفت به دلیل اینکه دادههای مکانیکسنگی در بیشتر مواقع نسبت به طول حفاری محدود است، این اطلاعات برای مواردی همچون توسعهی مخازن، پایداری چاه، بحثهای مدیریتی و ارزیابی مناطق اکتشافی اهمیت دارد (,Ameen

تعیین سرعت موج برشی با استفاده از سرعت فشاری متداول است. پیکت^۱ (۱۹۶۳) در تحقیقات خود اشاره کرده است که برای طیف وسیعی از دادهها، هنگامی که سازند اشباع از گاز باشد، نسبت زمان طی شده توسط موج فشاری به موج برشی ثابت است (Castagna, et al., 1985).

روابط بسیاری جهت تبدیل سرعت موج فشاری به برشی در سنگهای مختلف ارائه شده است. کارول^۲ (۱۹۶۹) روابطی تجربی را بر اساس آزمایشات ارائه کرده است. روابط کارول مناسب همهی سنگها در محدودهی ضریب پواسون ۰/۲۲ تا ۰/۲۸ است (Maleki, *et al.*, 2014).

روابط کاستانگا^۳ و همکاران (۱۹۹۳) که در محدودهی وسیعی شامل سنگهای ماسهسنگ، آهک، شیل و دولومیت ارائه شده، جزء بهترین روابط در زمینهی تخمین موج برشی است. در محیط کربناته، امین و همکاران (۲۰۰۹) بر اساس نمونه مغزهها و نگارهای مخازن کربناته، سرعت موج برشی را در ارتباط با مقاومت فشاری تکمحوری و تخلخل سنگ تخمین زدند. در یکی از جدیدترین بررسیهای آزمایشگاهی مقاومت فشاری تکمحوری و تخلخل سنگ تخمین زدند. در یکی از جدیدترین بررسیهای آزمایشگاهی مالکی و همکاران (۲۰۱۴) طبق اطلاعات حاصل از مخزن کربناته جنوب ایران رابطهای میان سرعت موج برشی را در ارتباط با مقاومت فشاری تکمحوری و تخلخل سنگ تخمین زدند. در یکی از جدیدترین بررسیهای آزمایشگاهی مالکی و همکاران (۲۰۱۴) طبق اطلاعات حاصل از مخزن کربناته جنوب ایران رابطهای میان سرعت موج برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۰۱۹) طبق اطلاعات حاصل از مخزن کربناته جنوب ایران رابطهای میان سرعت موج برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۵۹۹) طبق از محزن کربناته جنوب ایران رابطهای میان سرعت موج برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۰۱۹) از مینگاه در محدودهی سنگهای آهک، ماسهسنگ و شیل و نیز برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۰۹۹) از مخزن کربناته جنوب ایران رابطهای میان سرعت موج برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۰۹۹) از میان محدودهی سنگهای آهک، ماسهسنگ و شیل و نیز برشی و فشاری مطرح کردهاند (۲۹۹۳)، از این روابط طبق جدول (۳–۱)، برای تبدیل موج فشاری به برشی استفاده شد و نتایج تبدیل در شکلهای (۲۰–۲) آمده است. در آنها سرعت موج بر حسب برشی استفاده شد و نتایج تبدیل در شکلهای (۳–۲) آمده است. در آنها سرعت موج بر حسب برشی استفاده شد و نتایج تبدیل در شکلهای (۳–۲) و (۳–۳) آمده است. در آنها سرعت موج بر حسب برشی استفاده شد و نتایج تبدیل در شکلهای (۳–۲) و (۳–۳) آمده است. در آنها سرعت موج بر حسب (۲۰۰۳) میباشد و طبق اعماق مشخص شده به وسیلهی خطرچین، نقاط شیلی و ماسه سنگی همانند سرعت

[\] Pickett

۲ Carroll

[&]quot; Castagna

فشاری، در سرعت برشی کاهش نشان میدهند. نگارهای پتروفیزیکی چاههای شماره ۱ و ۲ در شکلهای (۳-۳) و (۳-۳) ارائه شده است. در ادامه طبق اطلاعات این نگارها و روابط تبدیلی جدول (۳-۱)، پارامترهای الاستیک تخمین زده می شوند. در کلیه ی شکلهای این فصل که در آن نگار سنگ شناسی (Lith) بکار رفته، رنگ سیاه نماد ماسه سنگ، خاکستری نشان دهنده ی سنگ آهک و سفید لایه ی شیلی مارنی است.



شکل (۳- ۲). نگارهای سنگشناسی، مدت زمان عبور موج، سرعت موج برشی و فشاری صوتی، تخلخل، پرتو گاما و چگالی چاه شماره ۱



شکل (۳- ۳). نگارهای سنگشناسی، مدت زمان عبور موج، سرعت موج برشی و فشاری صوتی، تخلخل، پرتو گاما و چگالی چاه شماره ۲

رابطهی تخمین سرعت موج برشی	نوع سنگ	شماره رابطه
$V_s = -0.05509V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$	سنگ آهک	(1-٣)
$V_s = 0.583 V_P - 0.07776$	دولوميت	(۲-۳)
$V_s = 0.77 V_P - 0.8674$	شيل	(٣-٣)
$V_s = 0.8042V_P - 0.8559$	ماسەسنگ	(4-4)

جدول (۳- ۱). روابط تخمین سرعت موج صوتی برشی کاستانگا و همکاران (Castagna, et al., 1993)

۳-۴-۲ تخمین پارامترهای الاستیک سنگ مخزن

پارامترهای الاستیک میزان صلبیت و قابلیت ارتجاعی سنگ را در مقابل تنشهای فشاری مشخص می کنند و شامل مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی، نسبت پواسون و ثابت لامه (ضریبی جهت تعیین تردی سنگ) هستند که بر اساس نگارهای چگالی و صوتی تخمین زده می شوند (Fjaer, *et al.*, 2008). البته آزمایشهای مکانیک سنگ متداول مانند مقاومت فشاری تک محوری، سه محوری و آزمایش بار نقطهای قابلیت تعیین ویژگیهای الاستیک را دارند. بنابر دلایل محدودیت دسترسی به نمونه سنگهای مورد نیاز دستگاههای آزمایش و هزینه بالای تجهیزات، نتایج آزمایشات مذکور برای کل عمق چاه در دسترس نیست (Ameen, *et al.*, 2009).

در این تحقیق با توجه به محدودیت دسترسی به نتایج آزمایشهای مکانیکسنگی چاهها، از نگارهای چاهها جهت تخمین خصوصیات مکانیکی کمک گرفته شده است. در این بخش پارامترهای الاستیک تخمین زده میشوند. جدول (۳–۲) نشاندهندهی روابط تجربی تعیین پارامترهای الاستیک به صورت دینامیکی بر اساس نگارهای چاهها است. در روابط واحد چگالی بر حسب (kg/m³) و سرعت موج بر حسب (m/s) است.

رابطهی تجربی	تعريف	واحد	پارامتر الاستيک	شماره رابطه
$E_{dyn} = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$	تنش محوری اعمالی کرنش نرمال	پاسکال	مدول یانگ	(۵-۳)
$K_{dyn} = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$	فشار هیدرواستاتیک کرنش حجمی	پاسکال	مدول حجمی	(8-1)
$G_{dyn} = \rho V_S^2$	تنش اعمالی کرنش برشی	پاسکال	مدول برشی	(Y-T)
$\lambda_{dyn} = \rho \left(V_p^2 - 2V_S^2 \right)$	میزان شکنندگی سنگ	پاسکال	ثابت لامه	(۸–۳)
$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	کرنش جانبی کرنش طولی	_	نسبت پواسون	(٩-٣)

جدول (۳- ۲). روابط پارامترهای الاستیک در حالت دینامیک

خواص مکانیکی سنگ در حالت دینامیک و استاتیک تفاوت دارند. در حالت استاتیک نمونهی سنگ تحت تاثیر نیرو (محوری یا سه محوری) قرار دارد. در حین آزمایش مقدار تنش و تغییر شکلها ثبت و ویژگیهایی مانند مدول الاستیک استاتیک محاسبه میشود. در حالت دینامیک، سنگها تحت بارهای دینامیک در شرایط انتشار موج برشی و فشاری قرار میگیرند و خواص مکانیکی ثبت میشوند (Asef and Najibi, شرایط انتشار موج برشی و دشاری قرار میگیرند و خواص مکانیکی ثبت میشوند (روابطی 2013). این دو مقدار استاتیکی و دینامیکی بر اساس بافت سنگها و ساختار فیزیکی تفاوت دارند. روابطی برای تبدیل خصوصیات دینامیک به استاتیک برای مناطق مختلف مطرح شده است که در ادامه بیان میشوند.

عیسی و کزی^۱ (۱۹۸۸) و کیدامبی و کومار^۲ (۲۰۱۵) بر اساس اطلاعات چاههایی روابط تبدیل خصوصیات الاستیک به دینامیک (به ترتیب روابط ۳–۱۰ و ۳–۱۱) را مطرح کردهاند. واحد مدول الاستیک در روابط (GPa) است.

$$E_{Sta} = 0.02 + 0.77 E_{dyn}$$
 (۱۰-۳) رابطه (۱۰-۳)

$$E_{Sta} = 0.6722 \times (E_{dvn})^{1.0573}$$
 (۱۱-۳) رابطه (۱۱-۳)

از روابط مطرح در زمینهی تبدیل پارامترهای الاستیک حالت دینامیک به استاتیک در سالهای اخیر می توان به روابط فیائر^۳ و همکاران (۲۰۰۸)، افسری و همکاران (۲۰۱۰) و غلامی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. این روابط به ترتیب در سنگهای آهکی، سنگهای کربناته مخازن ایران و مخازن ناحیه خلیج فارس حاصل شدهاند (روابط ۳–۱۲ تا ۳–۱۴).

^{&#}x27; Eissa and Kazi

^r Kidambi and Kumar

[&]quot; Fjaer
$$E_{Sta} = 0.18E_{dyn}^2 + 0.422E_{dyn}$$
(۱۲-۳) $E_{Sta} = 0.4145E_{dyn} - 1.0593$ (۱۳-۳) $C_{Sta} = 0.5726E_{dyn} - 4.6429$ (۱۴-۳) $E_{Sta} = 0.5726E_{dyn} - 4.6429$ (۱۴-۳) μ (۱۴-۳) μ (۱۴-۳) μ (سنگهای کربناته آهک و آهک دولومیتی، μ (سنگهای کربناته آهک و آهک دولومیتی، μ (سنگهای کربناته جنوب کشور) با سنگهای مخزن نفتی μ (سنگهای کربناته جنوب کشور) با سنگهای مخزن نفتی μ (سنگهای مارنی و ماسه سنگ) و ناحیه ی مطالعاتی (مخازن کربناته جنوب کشور) با سنگهای مخزن نفتی μ (سابطهی افسری و همکاران (۲۰۱۰) وجود داشت، از رابطهی (۳-۱۳) استفاده شد. با در اختیار داشتن مدولالاستیک استاتیکی و تبدیل ضریب پواسون به حالت استاتیکی (رابطهی ۳-۱۵)، دیگر پارامترهای الاستیکتخمین زده شده است (2010).

$$K_{Sta} = \frac{E_{sta}}{3(1 - 2\nu_{sta})} \tag{19-7}$$

$$G_{Sta} = \frac{E_{sta}}{2(1 + v_{sta})} \tag{14-7}$$

$$\lambda_{Sta} = \frac{E_{sta} v_{sta}}{(1 + v_{sta})(1 - 2v_{sta})} \tag{1A-T}$$

در شکل (۳–۴) در دو ناحیهی ۳۶۱۰–۳۶۲۷ و ۳۸۵۵–۳۸۷۵ متر به ترتیب لایههای ماسهسنگ و شیلی مشخص است. این لایهها در تخمین خصوصیات الاستیک به طور مشخص وجود دارند و باعث کاهش ضریب پواسون در ناحیهی ماسهسنگی و کاهش مدول یانگ در ناحیهی شیلی شدهاند. شکل (۳–۵) در چاه ۲، ناحیههای ۳۵۶۰–۳۵۷۳ و ۳۶۴۵–۳۶۶۶ متر لایههای آهک و شیلی باعث افزایش و کاهش مدول برشی شدهاند.



شکل (۳- ۴). نگارهای تخمین پواسون، مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و ثابت لامه چاه ۱



شکل (۳- ۵). نگارهای تخمین پواسون، مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی و ثابت لامه چاه ۲

۳-۴-۳- پارامتر مقاومت سنگ

پارامترهای مقاومت تکمحوری و کششی سنگ جزء خصوصیات تاثیرگذار در بررسیهای پایداری چاه، طراحیهای شیوهی حفاری و انتخاب تجهیزات حفاری مانند نوع مته حفاری است (,Dosunmu, et al. است (,200 consected ا 2014). روشهای تخمین پارامتر مقاومت فشاری تک محوری بر اساس سه دستهی دادههای نگارهای صوتی، تخلخل سنگ و دادههای مدول الاستیسیته تخمینزده میشوند (,2006 chandong, et al 2006) رومود, 2007). در ادامه این روشها تشریح خواهند شد.

۳-۴-۳-۱ مقاومت فشاری حاصل از نگار صوتی

امواج صوتی در هنگام عبور از سازندها بر اثر ویژگیهای سنگها تغییر سرعت دارند. یکی از دلایل این خاصیت، تغییرات مقاومت سنگها در عمق است. از میان روابط موجود در این دسته (شامل سرعت عبور موج و مدت زمان عبور موج)، روابطی که دارای کاربرد بیشتر و مشابهت با سنگ مخزن مورد مطالعه (سنگهای کربناته) هستند، در جدول (۳–۳) ارائه شده است. واحدهای سرعت موج فشاری (km/s)، تغییرات زمان موج فشاری (μs/ft) و مقاومت فشاری تک محوری (MPa) است.

مرجع یا نام محقق	سنگھا	تخمین مقاومت فشاری تک محوری	شماره رابطه
Chandong, <i>et al.</i> , (2006)	سنگھای کربناته	$UCS = \frac{\left(10^{\left(2.44 + \left(\frac{109.14}{\Delta t}\right)\right)}\right)}{145}$	(19-٣)
Christaras, et al., (1997)	سنگ های آهک و مارن	$UCS = 9.95 V_P^{1.21}$	(77)
Yasar & Erdogan, (2004)	سنگهای کربناته	$UCS = 31.54V_P - 63.7$	(71-8)
Amani & Shahbazi, (2013)	سنگهای کربناته	$UCS = 570.808e^{-0.031\Delta t}$	(77-8)
Najibi, <i>et al.</i> , (2015)	سنگ آهک سازندهای آسماری و سروک	$UCS = 3.67 V_P^{2.14}$	(۲۳-۳)

جدول (۳- ۳). روابط تخمین مقاومت فشاری تکمحوری بر اساس سرعت و مدت زمان عبور موج صوتی

نتایج بکار گیری روابط جدول (۳–۳) در شکلهای (۳–۶) و (۳–۷) برای چاههای مورد مطالعه ارائه شده است. در شکل (۳–۶)، دو ناحیهی ۳۶۹۵–۳۷۲۰ و ۳۸۴۰–۳۸۵۵ را در نظر گرفته، این نواحی دارای سنگهای شیل و آهک است. تخمینها به طور صحیح UCS را به ترتیب کاهشی و افزایشی نشان میدهند. همچنین در شکل (۳–۷)، عمق ۳۵۸۰–۳۶۰۰ لایهی آهک با مقاومت بالاتر و لایهی زیرین شیلی با مقاومت کمتر در تخمینها حاصل شده است.

DEPTH METRES 1:2500	LITH	UCS19	UCS20	UCS21	UCS22	UCS23	
		0 MPA 4	400 0 MPA	150 0 MPA	200 0 MPA 200	0 MPA 220	
• 3575 •	-	Jwl	Res and a second	- M	- Maria	Jw4	
• 3600 •			3		3	-	
• 3625 •			- A	- A			
• 3650 •			1			ANA ANA	
• 3675 •			Ę	- Z	Ę	- Z	
3700-	-						
3725		5	1 ¥		T T		
• 3750 •		Z	Z	2	Z		
• 3775 •		5	5	Ş	Ş	5	
• 3800 •			2				
3825		<u></u>	_ _ <u>k</u>	<u> </u>	<u>_</u>	<u> </u>	
3850				. <u>.</u>		<u>, š</u>	
• 3875 •		121 1	4				
• 3900 •		The second secon	The second secon	- T	Ŧ	- T	
· 3925 ·		-	<u> </u>		*		

شکل (۳- ۶). نگارهای تخمین مقاومت سنگ بر اساس روابط ۳-۱۹ تا ۳-۲۳ چاه ۱



شکل (۳- ۷). نگارهای تخمین مقاومت سنگ بر اساس روابط ۳-۱۹ تا ۳-۲۳ چاه ۲

۳-۴-۳-۲- تخمین مقاومت فشاری با استفاده از تخلخل

در نگارگیری چاهها، ابزارهای مختلفی جهت تعیین تخلخل سنگ مورد استفاده قرار می گیرند. مقاومت سنگ در شرایط تخلخل بالای سنگ مستقل از سرعت موج صوتی، قابل تعیین است. استفاده از نگارهای تخلخل برای تخمین مقاومت در شرایطی که در گذشته نگارهای موج صوتی دارای کیفیت مناسبی نبودند، رواج بیشتری داشت و به نوعی یک راهحل جایگزین محسوب می گردید (Santarelli, et al., 1991). روابط چاندونگ و همکاران (۲۰۰۶) برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری حاصل از دو نوع مختلف سازند

' Chandong

کربناته (روابط ۳–۲۴ و ۳–۲۵) ارائه شده است. این روابط به ترتیب ذکرشده در محدودههای مقدار تخلخل ۰/۲> Ø > ۰/۲ و ۰/۲> Ø > ۰ کاربرد دارند. همچنین واحد UCS بر حسب (MPa) است.

$$UCS = 143e^{(-6.95\varphi)}$$
 (۲۴-۳) رابطه (۲۴-۳)

$$UCS = 135e^{(-4.8\varphi)}$$
 (۲۵-۳) رابطه (۲۵-۳)

نتایج بکارگیری روابط (۳–۲۴) و (۳–۲۵) چاهها در شکل (۳–۸) میباشد. عمقهای ۳۶۰۵–۳۶۳۰ چاه ۱ و ۳۵۷۵–۳۶۰۵ چاه ۲ که با خطچین مشخص است، تخمین UCS به طور متناسب در کاهش مقاومت فشاری لایههای نازک شیلی میان آهک و ماسهسنگ قابل مشاهده است.

DEPTH	LITH							DEPTH	LITH						
1:2500			UCS24	I		UCS25	5	1:2500		0	MPA	200	0	MPA	150
		0	MPA	200	0	MPA	150				3				3
		-	ž			ž		3525 -				_			5
• 3575 •	-		5			\leq						ţ			3
	-	3	<u>}</u>			7		3550	in the second second						1
3600				· -	• • •	-	2.1	- 5575			· – · 🎍	·			. <u>]</u>
2625			5					. 2000 -			5				3
3023		r h b	5 TIT	i i t	· + +-	÷.		3600			· - · 7	·			1
3650			Z				5	• 3625 •			- 2				₹
			3			3	•	3650			2				Z
· 3675 ·		<	<u>></u>			2					5			-	5
			\leq			\leq		- 3675 -							3
• 3700 •	and the owner where the owner w					3		3700 -			27			2	-
0705							-				- €				E
3125			2			2		• 3725 •			į				1
3750		-						3750				_	_		-{
		- 2	<					3775				_			1
3775			5			5					Ξ				Ξ
		5	5			5		- 3800 -			2				3
• 3800 •	and the second s					5	-	3825			7			₹	
0005	Contraction of the local division of the loc		<u> </u>			7					2			2	-
3825			Ł			±		3850			1				-
3850							- X	- 3875 -			77				3
		Ę				2		2000			Ś	_			Ś.
· 3875 ·		2				-		5000							2
			5			5		3925			Ŧ				2
· 3900 ·			\$		++-	Ś		3950			2			12	
0005			2			2					F			F	TH
3925				\square			+	3975			<u> </u>			2	

شکل (۳- ۸). نگارهای تخمین مقاومت تکمحوری روابط ۳-۲۴ و ۳-۲۵ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)

مقایسهای میان تخمینهای UCS بر اساس نگار صوتی و تخلخل در چاهها (شکلهای ۳-۶ تا ۳-۸) نشان میدهد که محدودهی تخمینهای حاصل از نگار صوتی بالا است، بطوریکه اکثر UCS تخمینی بیش از ۱۵۰MPa میباشد. در مقابل تخمین UCS با روش تخلخل، در محدودههایی بسیار پائین و کمتر از ۵۰MPa است.

۳-۴-۳ تخمین مقاومت فشاری با مدول الاستیک

مدول الاستیک دینامیکی و استاتیکی هرکدام با استفاده از آزمایشها اندازه گیری می شوند. مدول الاستیک حاصل از نگارهای پتروفیزیکی همانند مقاومت فشاری سنگ تغییر می کند و باهم رابطهای مستقیم دارند. روابط ۳–۲۶ و ۳–۲۷ به ترتیب توسط افسری و همکاران (۲۰۱۰) و انه منگلی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از سنگ مخزن کربناته جنوب کشور ارائه شدهاند. نتایج بکار گیری آنها برای چاهها در شکل (۳–۹) مشخص است. واحد مدول الاستیک در روابط (GPa) و CSS بر حسب (MPa) هستند.

$$UCS = 2.28 + 4.1089 E_{sta}$$
 (۲۶-۳) رابطه (۲۶-۳)

 $UCS = 2.27 E_{sta} + 4.74$ (۲۷-۳) با بررسی نتایج تخمین UCS به سه روش ذکرشده، محدودهی تغییرات تخمینها در روش حاصل از مدول الاستیک به نتایج آزمایش UCS یکی از چاههای مجاور مورد مطالعه نزدیک تر است. از طرفی در تحقیقات صورت گرفته (Gholami, *et al.*, 2014; Afsari, *et al.*, 2010; Kidambi, *et al.*, 2015; Anemangely, مورت گرفته (*et al.*, 2018 مورت گرفته (*et al.*, 2018) به دقت بالای تخمین حاصل از مدول الاستیک استاتیکی برای UCS اشاره شده است. همچنین برای استفاده از پارامتر UCS در تخمین چسبندگی و معیارهای شکست از رابطهی ۳–۲۷ استفاده

نتایج این رابطه به محدودهی UCS سنگهای کربناته میدان مارون یعنی MPa–۸۰ است.

شد. دلیل این موضوع تعیین نتایج متناسب با ناحیهی مورد مطالعه در نتایج معیارهای شکست و نزدیکی



شکل (۳- ۹). نگارهای تخمین مقاومت تکمحوری روابط ۳-۲۶ و ۳-۲۷ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)

۳-۴-۳-۴- تخمین مقاومت کششی

مقاومت کششی جزء پارامترهای مکانیکسنگی است که کمتر در مدلسازیهای ژئومکانیکی مهندسی نفت مطرح است و به مقدار یک دهم مقاومت فشاری تکمحوری در نظر گرفته میشود. رابطه (۳–۲۸) تخمین مقاومت کششی (MPa) بر اساس تخلخل و چگالی (kg/m³) که توسط حقنژاد و همکاران (۲۰۱۳) (سازند آسماری) ارائه شده است. شکل (۳–۱۰) نشاندهنده اعمال رابطه ۳–۲۸ در چاهها میباشد.

 $T_s = 3.846
ho - 0.528
ho$ (۲۸–۳) رابطه (۳–۲۰) دو ناحیهی ۳۵۸۵–۳۶۲۳ چاه ۲ و ۳۵۹۲–۳۵۹۲ چاه ۲ در نظر گرفته، میزان کاهش تخمین مقاومت کششی در لایههای شیلی و ماسهسنگ نسبت به آهک مشخص است.



شکل (۳- ۱۰). نگارهای تخمین مقاومت کششی رابطهی ۳-۲۸ چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست) ۳-۴-۵- پارامترهای زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور چسبندگی و زاویهی اصطکاک داخلی به عنوان پارامترهای مکانیکی سنگ هستند که به طور کلی برای بررسیهای پایداری چاه و تعیین پنجرهی ایمن گل حفاری استفاده میشوند. این پارامترها طبق آزمایشهایی مانند آزمایش سهمحوری تعیین میشوند. در این بخش از روابطی (۳- ۲۹ زاویهی اصطکاک و ۳-۳-۳ چسبندگی) که در مخازن کربناته کشور هم مثبت ارزیابی شده استفاده میشود (; Hourb, 1994).

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2$$
 (19-7)

$$C = \frac{UCS}{2\tan\theta} \tag{(T'-T)}$$

NPHI تخلخل، V_{shale} حجم شیل طبق رابطه (۳۱–۳) (GR_{max}) بیشینه و GR_{min} کمینه گاما در شیل و ماسه تمیز) است و θ زاویهی شکستگی نسبت به خط X در دایره موهر میباشد (Jaeger, *et al.*, 2007).

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$
 (٣١-٣) رابطه (٣١-٣)

پارامتر مقاومت فشاری محصور (CCS) نشاندهندهی شرایط واقعی تر مقاومت سنگ در انتهای چاه است و جهت تعیین آن پارامترهای فشار، گل و مقاومت تاثیر گذار هستند. روابط ۳-۳۲، ۳–۳۳، ۳–۳۴ و ۳–۳۵ برای تخمین Calhoun & Ewy, 2005).

این روابط در سه حالت طبق تخلخل موثر (Phie) بدست آمده است: حالت اول: اگر ۲/۰ =< Phie

$$CCS_{DP} = UCS + DP + 2DP(rac{Sin \varphi}{1 - Sin \varphi})$$
 (۳۲-۳)
در آن، DP اختلاف فشار که برابر تفاضل ECD فشار سیال در گردش و فشار منفذی، φ زاویه اصطکاک
داخلی است. حالت دوم: اگر ۵۰/۰۰>= Phie

$$CCS_{SK} = UCS + DP_{SK} + 2DP_{SK} \left(\frac{Sin\varphi}{1 - Sin\varphi}\right) \tag{77-7}$$
رابطه (۲۳-۳)

در این رابطه، DP_{SK} اختلاف ECD فشار سیال در گردش و فشار اسکمپتون (نشاندهندهی تغییرات فشار منفذی در اثر اعمال تنش) است که در رابطهی فرعی (۳–۳۱) محاسبه می شود.

$$SkemptonPP = PP - \frac{OBG - ECD}{3}$$
رابطه (۳۴-۳)
PP و OBG به ترتیب فشارمنفذی و فشار روباره است. حالت سوم: اگر ۹/۰ > ۰/۰۵ - ۷/۰۵

$$CCS = \frac{CCS_{DP}(Phie - 0.05)}{0.15} + \frac{CCS_{SK}(0.2 - Phie)}{0.15}$$
(70-7) (71)
itilizes land (10-7) و (71-11) و (71-11) مشخص است.



شکل (۳– ۱۱). نگارهای تخمین حجم شیل، زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور چاه ۱ در شکل (۳– ۱۱)، عمق ۳۸۵۲–۳۸۹۵ با خطچین مشخص است. نتایج مقدار تخمین حجم شیل و زاویهی اصطکاک داخلی به طور صحیح در ناحیهی شیلی همراه با آهک به ترتیب افزایش و کاهش یافته و در قسمت آهکی برعکس این رویه تخمین زده شد. همچنین شکل (۳– ۱۲)، عمق ۳۵۸۵–۳۶۳۰ شامل سنگهای شیلی و سپس آهک است که این مسئله در حجم شیل بالاتر، چسبندگی بیشتر و CCS کمتر در شیل نسبت به سنگ آهک مشخص میباشد.



شکل (۳- ۱۲). نگارهای تخمین حجم شیل، زاویهی اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محصور چاه ۲ ۳-۴-۴- تخمین فشار منفذی

فشار منفذی یکی از مهمترین پارامترها جهت طراحی عملیات حفاری و بررسیهای ژئومکانیکی است. فشارهای منفذی به فشار سیال در فضاهای خالی سازند متخلخل گفته میشود. مقادیر آن در محدودهی فشار هیدرواستاتیک تا فشار روباره (۴۸٪ تا ۹۵٪ تنش روباره) متغیر است (Zhang, 2011). میزان صحت پیشبینیهای فشار منفذی به کاهش خطرپذیری عملیات حفاری کمک میکند که در مجموع به عنوان تضمینی برای عملیات ایمن و موثر حفاری است (Zoback, 2007). روشهای پیشبینی فشار منفذی بسیار متعدد هستند. در این تحقیق بر اساس بررسیهای انجام شده (دلاور و همکاران، ۱۳۹۷)، از روشهای تخمین فشارمنفذی عمق معادل^۱، ایتون^۲، ایتون اصلاحشده (ژانگ^۳)، روش بورز^۴، تراکمپذیری^۵ (مخازن کربناته) (به ترتیب روابط ۳–۳۶، ۳–۳۷، ۳–۳۸، ۳–۴۹، ۳–۴۱) برای چاه ۱ بهره گرفته شده است Emanda, *et al.*,2018; Eaton, 1975; Zhang, 2011; Bowers, 1995; Atashbari & Tingay, 2012;) (Azadpour, *et al.*, 2015).

$$P_Z = P_a + (S_z - S_a)$$
 (۳۶-۳)
در آن P_z فشار منفذی در نقطه معادل واقع بر روی خط نرمال؛ S_z
تنش موثر در عمق مشخص؛ S_a تنش موثر در نقطه معادل روی خط نرمال.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng})(\frac{\Delta t_{normal}}{\Delta t})^{X}$$
 (۳۷–۳) رابطه (۳۷–۳) موج زمان عبور OBG و P_{ng} به ترتیب گرادیان فشارهای منفذی، روباره و هیدرواستاتیک؛ Δt_{normal} مدت زمان عبور OBG ، P_{pg} موج نرمال (NCT)؛ Δt مدت زمان عبور موج نگار چاه؛ X توان ثابت ایتون طبق رابطهی اولیه برابر ۳ است.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng})(\frac{\Delta t_m + (\Delta t_{ml} - \Delta t_m)e^{-cZ}}{\Delta t})^X$$
 (۳۸-۳) رابطهی (۳۸-۳) مدت زمان موج خط گل Δt_m مدت زمان موج خط گل Δt_m مدت زمان موج خط گل حفاری؛ c مقدار ثابت است.

$$P_{p} = \sigma_{V} - \left(\frac{V_{P} - V_{ml}}{A}\right)^{\frac{1}{B}}$$
(٣٩-٣) رابطه (٣٩-٣)

 V_p سرعت فشاری عمق مشخص؛ V_{ml} سرعت فشاری در خط گل حفاری (در سطح دریا یا زمین معمولاً V_p سرعت فشاری عمق مشخص؛ A و B و ابسته به نسبت سرعت-تنش موثر است.

" Zhang

[\] Equivalent depth method

۲ Eaton

^{*} Bowers

^a Compressibility method

$$P_{P} = \left(\frac{(1-\phi)C_{b}\sigma_{eff}}{(1-\phi)C_{b}-\phi C_{P}}\right)^{\gamma}$$
(۴۰-۳) رابطه (۴۰-۳)

$$P_{P} = \left(\frac{(1-\phi)C_{P}\sigma_{eff}}{(1-\phi)C_{P}-\phi C_{P}}\right)^{\gamma'}$$
(۴۱-۳)

 ϕ تخلخل سنگ؛ $c_{_b}$ حجم تراکمپذیری؛ $\sigma_{_{eff}}$ فشار موثر روباره (اختلاف فشار روباره و فشار هیدرواستاتیک)؛ $\sigma_{_p}$ تراکمپذیری منافذ (محیط متخلخل)؛ γ مقدار ثابت تجربی (محدودهی ۰/۹ تا ۱) است. با بررسی فشارمنفذی چاه شماره ۱ و بیشترین تطابق نتایج روش تراکمپذیری با آزمایشات MDT، در چاه شماره ۲ تنها از روابط تراکمپذیری مخازن کربناته استفاده شد (شکلهای ۳–۱۲ و ۳–۱۴).



شکل (۳- ۱۳). نگارهای NCT ترسیمشده بر مدت زمان عبور موج، تخمینهای روش ژانگ، ایتون، بورز، روش تراکمپذیری و مجموعهی تخمینها در مقایسه با آزمایش MDT چاه ۱

¹ Modular formation Dynamics tester



شکل (۳- ۱۴). نگارهای حجم شیل و تخمین فشارمنفذی چاه ۲

۳-۴-۳ تخمین میزان تنشهای برجا

تنشها به واسطهی تاثیر در تغییر شکلها و ویژگیهای مکانیکی سنگ جزء مهمترین بخش بررسیهای ژئومکانیکی محسوب میشوند. تحلیلهای تنش برجا در بخشهای مختلف پایداری چاه، سرشتنمایی مخزن، روشهای حفاری انجام میگیرند. اطلاع از مقدار و جهت تنشهای برجا جهت ساخت مدلهای ژئومکانیکی ضروری است. معمولاً مولفههای تنش شامل تنش قائم (σ_v)، حداقل تنش افقی (σ_h) و حداکثر تنش افقی (σ_h) هستند (Δfsari, *et al.*, 2010). در ادامه تخمین تنشهای برجا تشریح میشود.

۳-۴-۷-۱- تنش قائم

برای تعیین تنش قائم معمولاً از چگالی سازند روباره استفاده می شود و این ویژگی با استفاده از نگار چگالی بدست می آید (رابطه ۳–۴۲). در نقاطی که نگار چگالی در اختیار نبود از رابطهی (۳–۴۳) استفاده شد. در این روابط ρ(z) چگالی در عمق Z و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط است (Fjaer, *et al.*, 2007; Peng & Zhang, 2007).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z)gdz \approx \overline{\rho}gz$$
 (۴۲-۳) رابطه (۴۲-۳) (۴۲-۳) (۴۲-۳) رابطه $\sigma_v = 0.027 z$ (۴۳-۳) رابطه (۴۳-۳) رابطه (۴۳-۳) رابطه (۴۳-۳) (۴7-۳) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7) (۴7-7)

تنشهای افقی شامل تنشهای افقی حداقل و حداکثر است. با توجه به اهمیت تنشهای افقی، تحقیقات و مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفته است (Zoback, 2010). در شرایط آرامش نسبی لایهها از لحاظ تکتونیکی، ناهمسانگردی و تغییرات کم از جهت تاثیر گسل، تنشهای افقی حداقل و حداکثر بسیار بهم نزدیک هستند. برای اندازه گیری مستقیم تنش افقی یا کالیبره کردن محاسبات تنش افقی از نتایج آزمایشهای نشت و نشت گسترده چاه (XLOT, LOT)، آزمایش شکافت هیدرولیکی ابعاد کوچک و بزرگ^۲ و حتی دادههای گردی مستقیم آزمایش شکافت هیدرولیکی الماد کوچک و بزرگ^۲ رو حتی دادههای گردی است (Zoback, 2010; Yamamoto, 2003).

روابط (۳–۴۴) و (۳–۴۵)، معادله پروالاستیک میباشند که بر اساس ویژگیهای در دسترس تنش افقی حداقل و حداکثر و نیز صرف نظر از ویژگیهای ناهمگنی تعیین میشوند. مقادیر کرنشهای پروالاستیک از روابط (۳–۴۶) و (۳–۴۷) مشخص میشوند (Fjaer, et al., 2007).

$$\sigma_{h} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{\nu} + \frac{1-2\nu}{1-\nu} PP.\alpha + \frac{E}{1-\nu^{2}} \varepsilon_{x} + \frac{\nu E}{1-\nu^{2}} \varepsilon_{y}$$
(ff-T) (jet equation of the second second

$$\sigma_{H} = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_{\nu} + \frac{1-2\nu}{1-\nu}PP.\alpha + \frac{E}{1-\nu^{2}}\varepsilon_{\nu} + \frac{\nu E}{1-\nu^{2}}\varepsilon_{x} \qquad (\text{fa-r})$$

که در آنها α (ضریب بایوت) برابر ۱ میباشد؛ به این دلیل که این پارامتر به تخلخل مرتبط است و با محاسبه روابط برای چاهها ضریب بایوت نزدیک به ۱ حاصل شد. همچنین در مطالعات (Atashbari, 2012; Zhang, 2014 et al., 2011) بر در نظر گرفتن 1=α در محاسبات فشار زمین اشاره شده است.

¹ Leak off Test and Extended Leak off Test

^r Mini and Macro frac

$$\varepsilon_x = \frac{S_v \times v}{E} \times \left(\frac{1}{1-v} - 1\right)$$
 (۴۶-۳) رابطه (۴۶-۳)

$$\varepsilon_{y} = \frac{S_{v} \times v}{E} \times \left(1 - \frac{v^{2}}{1 - v}\right)$$
 (۴۷-۳) رابطه (۴۷-۳)

همچنین روابط هیگینس^۱ و همکاران (۲۰۰۸) در صورت دسترسی به دادههای مدول یانگ و ضریب پواسون در جهتهای مختلف (نگارهای سرعت برشی جهتهای مختلف)، کاربردی است (Higgins, *et al.*, 2008).

$$\sigma_{h} = \frac{E'}{E} \frac{\nu}{1 - \nu'} \cdot (S_{\nu} - \alpha . PP) + \alpha . PP + \frac{E'}{(1 - {\nu'}^{2})} \cdot \varepsilon_{h} + \frac{E'\nu'}{(1 - {\nu'}^{2})} \cdot \varepsilon_{H} \qquad (\text{fA-T})$$

$$\sigma_{H} = \frac{E'}{E} \frac{\nu}{1 - \nu'} \cdot (S_{\nu} - \alpha.PP) + \alpha.PP + \frac{E'}{(1 - {\nu'}^{2})} \cdot \varepsilon_{H} + \frac{E'\nu'}{(1 - {\nu'}^{2})} \cdot \varepsilon_{h} \qquad (\text{fq-T}) \text{ for all } \mu \in \mathcal{S}_{h}$$

در روابط، E و v نشاندهندهی مدول یانگ و ضریب پواسون افقی است. به دلیل جامعیت رابطهی پروالاستیک و در اختیار بودن پارامترهای روابط آن، تنشهای افقی و کرنشهای چاهها بر اساس آنها تخمین زده شد. طبق نتایج شکل ۳–۱۵ در نقاط لایههای ماسهسنگی و شیلی کاهش تنش افقی حاصل شده است.



شکل (۳- ۱۵). نگارهای کرنش جهت X و Y و تخمین تنش برجا قائم، افقی حداقل و حداکثر چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)

' Higgins

۳-۴-۲-۳ تنشهای القایی اطراف چاه و معیارهای شکست

عملیات حفاری باعث تغییر در تنشهای اصلی اطراف چاه می شود، بنابراین تنشهای القایی در محیط (سازند) ایجاد می گردند. این تنشها و تغییر شکلهای حاصل از آن ممکن است باعث ایجاد ناپایداری در چاه گردد. در این تحقیق، با فرض سنگهای الاستیک همسانگرد و همگن، تنشهای القایی اطراف چاه با استفاده از رابطهی کرش⁽ محاسبه می شود (Kirsch, 1898).

$$\begin{split} \sigma_{r} &= \frac{1}{2} (\sigma_{H} + \sigma_{h}) \bigg(1 - \frac{a^{2}}{r^{2}} \bigg) + \frac{1}{2} (\sigma_{H} - \sigma_{h}) \bigg(1 - 4 \frac{a^{2}}{r^{2}} + 3 \frac{a^{4}}{r^{4}} \bigg) Cos2\theta + \frac{a^{2}}{r^{2}} P_{w} \quad (\Delta \cdot - \Psi) \quad (\Delta \cdot - \Psi) \\ \sigma_{\theta} &= \frac{1}{2} (\sigma_{H} + \sigma_{h}) \bigg(1 + \frac{a^{2}}{r^{2}} \bigg) - \frac{1}{2} (\sigma_{H} - \sigma_{h}) \bigg(1 + 3 \frac{a^{4}}{r^{4}} \bigg) Cos2\theta - \frac{a^{2}}{r^{2}} P_{w} \quad (\Delta \cdot - \Psi) \quad (\Delta \cdot - \Psi) \\ \zeta_{\mu} &= \frac{1}{2} (\sigma_{\mu} + \sigma_{h}) \bigg(1 + \frac{a^{2}}{r^{2}} \bigg) - \frac{1}{2} (\sigma_{\mu} - \sigma_{h}) \bigg(1 + 3 \frac{a^{4}}{r^{4}} \bigg) Cos2\theta - \frac{a^{2}}{r^{2}} P_{w} \quad (\Delta \cdot - \Psi) \quad (\Delta \cdot - \Psi) \\ \zeta_{\mu} &= \frac{1}{2} (\sigma_{\mu} + \sigma_{h}) \bigg(1 + \frac{a^{2}}{r^{2}} \bigg) - \frac{1}{2} (\sigma_{\mu} - \sigma_{h}) \bigg(1 + 3 \frac{a^{4}}{r^{4}} \bigg) Cos2\theta - \frac{a^{2}}{r^{2}} P_{w} \quad (\Delta \cdot - \Psi)$$

$$\sigma_{z} = \sigma_{v} - 2\nu(\sigma_{H} - \sigma_{h})\frac{a^{2}}{r^{2}}Cos2\theta \qquad (\Delta T - T)$$
رابطه ($\Delta T - T$)

در روابط σ_r ، $\sigma_ heta$ و σ_r ، $\sigma_ heta$ به ترتیب تنشهای مماسی، معاعی و محوری؛ تنشهای القایی در فاصله r با شعاع σ_r ، $\sigma_ heta$ وابط P_w ، a فشار درون چاه (وزن گلحفاری) و heta زاویهی ساعت گرد از جهت σ_H است.

به دلیل مشخص نبودن زاویهی تنش القایی کلی اطراف چاه در نگارهای تصویری چاهها، یک سادهسازی متداول انجام شد. اگر r = R در دیوارهی چاه، تنش شعاعی و مماسی تابعی از فشار درون چاه خواهند بود و از طرفی، تنش مماسی و محوری تابعی از زاویه θ خواهند بود. با ارزیابی این دو تنش در دیواره چاه، بیشترین مقدار آن در $\frac{\pi}{2} \pm = \theta$ و کمترین مقادیر آن در $\pi, 0 = \theta$ حاصل میگردد. شکست برشی یا فشاری که موجب ریزش چاه میشود، انتظار میرود در نقطهی تنش مماسی بیشینه و تراکم بیشینه سنگ رخ دهد. شکست برشی یا فشاری دهد. شکست کششی (منجر به ایجاد شکاف القایی یا هیدرولیکی) انتظار میرود در نقطهی که موجب ریزش چاه میشود، انتظار میرود در نقطهی تنش مماسی بیشینه و تراکم بیشینه سنگ رخ دهد. شکست کششی (منجر به ایجاد شکاف القایی یا هیدرولیکی) انتظار میرود در نقطهی که تنش مماسی حماسی در خواه که تنش مماسی در حیوت عمود بر تنش اصلی دهد. شکست کششی در جهت عمود بر تنش اصلی حداقل و شکاف کششی در جهت عمود بر تنش اصلی حداقل رخ میدهد. کاهش فشار گل، پتانسیل شکست برشی را افزایش میدهد و از سوی دیگر، افزایش

[\] Kirsch

فشار گل از یک حد مشخص موجب ایجاد شکست کششی می شود. این مسائل وجود یک پنجره ایمن برای وزن گل حفاری به منظور پایداری را نشان می دهد. حد پایین این مسئله مرتبط با شکست برشی یا فشاری Gholami, et al., 2014; Kidambi, et al., 2015; Al-و حد بالا با فشار شروع شکاف در ارتباط است (-Ajmi and Zimmerman, 2005) و ابط تنشهای مماسی، القایی و محوری در حالت شکست برشی یا Break out به صورت روابط زیر در می آیند:

- $\sigma_{\theta}^{\max} = D P_{w}$ (۵۳-۳) رابطه (۵۳-۳)
- $\sigma_r = P_w$ (۵۴–۳) رابطه (۵۴–۳)
- $\sigma_z = E$ (۵۵–۳) رابطه (

$$D = 3\sigma_H - \sigma_h$$
 (۵۶-۳) رابطه (۵۶-۳)

$$E = \sigma_V + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \tag{(24-7)}$$

معیارهای شکست به منظور بررسیهای شرایط شکست سازههای سنگی در مکانیکسنگ و سایر مهندسیها مورد استفاده قرار می گیرند. در این تحقیق از دو معیار شکست پر کاربرد در محاسبات پایداری چاهها یعنی معیارهای موهر – کلمب ^۱ و هو ک – براون ^۲ استفاده شده است.

- معیار موهر کلمب با فرض شکست برشی در یک صفحه مطرح شد. مقدار خطی معیار موهر کلمب بر اساس تنشهای اصلی به صورت روابط (۳–۵۸) و (σ_3 ، σ_1) و (σ_3 -۵) و (σ_3 ، σ_1) (σ_3 ، σ_1) (σ_3 ، σ_1) و (σ_3 -۵) و (σ_3 ، σ_1) (σ_3 ، σ_1) معیار موهر کلمب و بر اساس تنشهای اصلی به صورت روابط (σ_3 ، σ_1) (σ_3 ، σ_3 ، σ_1) (σ_3 ، σ_3) (σ_1) (σ_3 ، σ_3) (σ_3 ، σ_3) (σ_4) (σ_5) (
- $\sigma_1 = \sigma_c + N\sigma_3$ (۵۸-۳) رابطه $N = \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$ (۵۹-۳) رابطه $N = \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$ رابطه (۲۹-۳) رابطه برای استفاده از معیار شکست موهر-کلمب و محاسبه حداقل فشار گل ((Pw(BO)) از جدول (۴-۳) با توجه

به روابط ۳-۵۳ تا ۳-۵۷ استفاده می گردد.

^{&#}x27; Mohr-Coulomb

^r Hoek-Brown

مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز	حالتهای مختلف تنشهای القایی
$P_{W(BO)} = \frac{E - \sigma_c}{N}$	$\sigma_r \leq \sigma_{ heta} \leq \sigma_z$
$P_{W(BO)} = \frac{D - \sigma_c}{1 + N}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_{\theta}$
$P_{W(BO)} = D - \sigma_c - NE$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_{\theta}$
(۳–۹۹۵)، (۳–۵۶) و (۳–۵۷)	روابط فرعى مورد نياز

جدول (۳- ۴). روابط تعیین حداقل فشار گل ((P_{w(BO}) معیار شکست موهر-کلمب

معیار هوک-براون برای پیش بینی مقاومت نهایی سنگ بکر و ماده سنگ توسعه داده شده است.
 این معیار تجربی از مقاومت فشاری تک محوری به عنوان پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر بین معیار تجربی از مقاومت فشاری تک محوری به عنوان پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر می این معیار تجربی از مقاومت فشاری تک محوری به عنوان پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر این معیار می نام می کند و دو پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر این معیار تجربی از مقاومت فشاری تک محوری به عنوان پارامتر مقیاس استفاده می کند و دو پارامتر نقطه شکست به صورت رابطه (۳ - ۶۰) بیان می کند (۱۹۹۳, ۱۹۹۳).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^{\frac{1}{2}}$$
 (۶۰-۳) رابطه (۲-۹) (۶۰-۳) رابطه مذکور، σ_c مقاومت فشاری تک محوری است و برای استفاده از پارامتر m، میانگین مقدار پیشنهادی سنگهای کربناته (محدودهی ۵ تا ۸) در نظر گرفته شد. بر اساس روابط ۳–۵۳ تا ۳–۵۷ و انتخاب روابط از جدول (۳–۵)، مقادیر حداقل فشار گل با استفاده از معیار هوک-براون تعیین می شود.
نتایج بکارگیری معیارهای شکست (موهر-کلمب و هوک-براون) در چاههای شماره ۱ و ۲ در مقایسه با

مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز	حالتهای مختلف تنشهای القایی
$P_{W(BO)} = \frac{(2D+P) - \sqrt{(2E+P)^2 - 4E^2 + q}}{2}$	$\sigma_r \leq \sigma_{ heta} \leq \sigma_z$
$P_{W(BO)} = \frac{(4D+P) - \sqrt{(4D+P)^2 + 16q - 16D^2}}{8}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_{\theta}$
$P_{W(BO)} = \frac{2(D-E) - \sqrt{4(D-E)^2 - 4(D-E-PE-q)}}{2}$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_{\theta}$
$(\Delta F-T) \cdot P = m\sigma_c \cdot q = \sigma_c^2$	روابط فرعى مورد نياز

جدول (۳- ۵). روابط تعیین حداقل فشار گل ((P_{w(BO}) معیار شکست موهر-کلمب

در شکلهای (۳–۱۶) و (۳–۱۷)، نتایج معیارهای شکست جهت پیش بینی پتانسیل ایجاد شکست برشی ارائه شده است. پیش بینی های مربوط به هریک از معیارها با مقادیر فشار منفذی، وزن گل، اندازه مته و نگار قطر سنجی مقایسه شدهاند. معیار هوک و براون به طور متناسب تر شرایط ایجاد شکست برشی را در مقایسه با وزن گل، فشار منفذی و نقاط واکنش نگار قطر سنج (افزایش قطر در اثر ریزش) نشان می دهد. در سوی دیگر (محدودهی سمت راست وزن گل) تنش های القایی حاصل از جداول (۳–۴) و (۳–۵) مشاهده می شوند. در صورتی که پتانسیل شکست برشی به نقاط تنش تخمین زده شده (۲۵) بر سند، احتمال هرزروی گل وجود دارد که در اکثر نقاط چاهها مشاهده نمی شود. میان مقادیر (Og) (۳–۳) و (۳–۵) مشاهده می شوند. مقادیری که هرزروی گل را نشان می دهند، یک ناحیهی سفید رنگ وجود دارد که پنجرهی ایمن گل حفاری مقادیری که هرزروی گل را نشان می دهند، یک ناحیهی سفید رنگ وجود دارد که پنجرهی ایمن گل حفاری را نشان می دهند. در سمت چپ پتانسیل وارد شدن سیال به داخل چاه و سمت راست پتانسیل هرزروی مشخص است. برای مطابقت مدل با واقعیت دادههای حاصل از چاهها، محدودههای ۲۸۸۰–۳۹۲۴ چاه ۱ و مشخص است. برای مطابقت مدل با واقعیت دادههای حاصل از چاهها، محدودههای ۲۸۸۰–۳۹۲۴ چاه ۱ و مشخص است. برای مطابقی مدل با واقعیت داده های حاصل از چاهها، محدودهای ۲۸۸۰–۳۹۲۴ چاه ۱ و وطر در اثر ریزش (در عمقهای مذکور)، واکنش متناسب معیارهای شکست مدل یک بعدی به صورت عبور قطر در اثر ریزش (در عمقهای مذکور)، واکنش متناسب معیارهای شکست مدل یک بعدی به صورت عبور از وزن گل و محدود شدن پنجره ایمن گل حفاری مشاهده می شود.



شکل (۳- ۱۶). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر-کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۱



شکل (۳- ۱۷). نگارهای تخمین روابط (۳-۵۰) تا (۳-۵۲) و به ترتیب از چپ مقادیر تخمین شکست برشی رابطه موهر-کلمب و هوک-براون در مقایسه با فشارمنفذی و وزن گل و همچنین نگاره قطرسنجی و اندازه مته چاه ۲

۳-۵- جمعبندی

مدلسازی ژئومکانیکی یکبعدی جهت تخمین مقادیر خصوصیات ژئومکانیکی در اعماق مختلف چاهها انجام می شود. در این فصل مراحل مختلف ساخت یک مدل ژئومکانیکی یک بعدی شامل تخمین سرعت موج برشی، ویژگیهای الاستیک، مقاومت سنگ، فشارمنفذی، زاویهی اصطکاک، تنشهای برجا، تنشهای القایی چاهها و اعمال معیارهای شکست تشریح و ارائه شد. در تخمین ویژگیها از میان روابط متعدد مطرح شده، رابطهی مورد نظر متناسب با چاههای مورد مطالعه انتخاب شده است. انتخابهای مذکور بر این اساس انجام شد که در تعدادی از بخشهای مدل از آزمایشهای مستقیم انجام شده در چاههای مورد مطالعه برای کالیبره کردن تخمینها بهره گرفته شد، به طور مثال روش تخمین فشار منفذی و استفاده از آزمایش MDT که نتایج تخمینی را به شرایط واقعی نزدیکتر کرد. در بخشهای دیگر مانند ویژگیهای الاستیک، مقاومت سنگ، ضریب اصطکاک و حجم شیل از نتایج آزمایش بر روی چاههای مجاور میدان مارون به همراه مقایسه تخمینها با تحقیقات صورت گرفته در مخازن کربناته جنوب کشور بهره گرفته شد. در انتها با استفاده از معیارهای شکست (موهر-کلمب و هوک-براون) پیشبینی شرایط ناپایداری چاهها انجام شد. شرایط ناپایداری چاهها وابسته به محدودهی پنجره ایمن گل حفاری است. مقایسه میان محدودههای پنجره ایمن گل حفاری و پیشبینی شکست با نقاط ریزش چاه (نقاط تغییر نگار قطرسنج نسبت به اندازه مته) نشان میدهد که تخمینهای صورت گرفته تا حدودی زیادی شرایط ژئومکانیکی چاهها را مشخص کرده است.

فصل چهارم

بررسی ارتباط میان خصوصیات ژئومکانیکی و پارامترهای حفاری با استفاده از الگوریتم K2 و شبکههای عصبی مصنوعی MLP

۴–۱– مقدمه

ویژگیهای عملیات حفاری و فرایندهای وابسته، سبب تاثیر تعداد زیادی پارامتر در دو بخش ژئومکانیکی و عملیاتی بر روند لحظهای تغییر آنها شده است. برای بررسی پارامترهای ذکر شده، نیاز به ایجاد یک مجموعه داده ها در اعماق یکسان است که این موضوع با همگام سازی (هم مقیاس سازی) مقادیر انجام می گیرد. تغییرات هریک از پارامترها و پیچیدگی ارتباط میان آنها بررسی های مربوطه را مشکل کرده است. این پیچیدگی ارتباط میان پارامترها و پیچیدگی ارتباط میان آنها بررسی های مربوطه را مشکل کرده است. ترغیب کرده است. در حال حاضر استفاده از روش های احتمالاتی و هوش مصنوعی در بحث های مهندسی رو به افزایش است. در حال حاضر استفاده از روش های احتمالاتی و هوش مصنوعی در بحث های مهندسی تاثیرگذار بر روند فرایند، نتایج مطلوبی را ارائه می دهد. نمونه ای از این روش ها، شبکه های بیزین ⁽(RN) است. در فصل حاضر یکی از حالتهای مطرح آن بررسی و با داده های چاه ا تحلیل می شود. علاوه بر مورد ذکر شده، دلیل دیگر استفاده از RN به عملکرد مناسب این روش در مسائل پیچیده (تاثیر پارامترهای ورودی

شبکههای عصبی مصنوعی^۲ با پردازش اطلاعات ورودی، یک شبیهسازی کلی از روند فرایندها ارائه میکند. با در اختیار داشتن نحوهی عملکرد سیستم در ارتباط با پارامترهای ورودی، میتوان تاثیر پارامترها را بررسی کرد. البته تشخیص تاثیر پارامترها در صورتی ممکن است که میزان خطا کم بوده و شبیهسازی بسیار نزدیک به روند اصلی فرایند باشد. در این فصل به ترتیب به موضوعات همگامسازی دادهها، بکارگیری روشهای احتمالاتی BN و در نهایت یکی از روشهای هوش مصنوعی بر روی دادهها پرداخته خواهد شد.

¹ Bayesian Networks

^r Artificial Neural Networks

۴-۲- دادههای حفاری چاهها

دادههای حفاری چاه به طور کلی شامل ویژگیهای گلحفاری در گردش، ویژگیهای متههای حفاری بکار رفته، میزان اعمال نیرو دستگاههای حفاری، گزارشهای روزانه حفاری و زمانهای انجام کار یا زمانهای تعمیر تجهیزات حفاری است. در جزئیات میتوان به نرخ نفوذ حفاری (m/h)، وزن روی مته (klbf)، وزن روی قلاب نگهداری دستگاه حفاری ⁽ (klbf)، سرعت چرخش مته حفاری (m/n)، سرعت چرخش رشتهی حفاری (rpm)، گشتاور مته حفاری (lbf.ft)، فشار پمپ (psi)، نرخ جریان سیال ورودی^۲ (gal/min)، وزن گل ورودی و خروجی (pcf)، مقدار دما (^{CO})، سیال در گردش^۳ (pcf) و مدت زمان عملکرد سرمته اشاره کرد. از میان دادههای حفاری سه نسخه کیفیت بالا (هر ۲۰۲۳ داده حفاری)، کیفیت شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب (اطلاعات ۲۰cm در عمق) و کیفیت استاندارد (فواصل ۱۳۱) در این تحقیق در اختیار بود. از میان دادههای حفاری در عمق، کیفیت استاندارد ۱ متر برای اطلاعات حفاری مد نظر وجود داشت و جدول (۲-۱) و (۲-۲) نمونهای از اطلاعات حفاری به صورت نمونهی تصادفی در اعماقها چاهها میباشند.

ROP (m/h)	WOB (klbf)	RPM (rpm)	Torque (lbf.ft)	عمق تصادفی
٣/٣۵٢۵٩	۵/۰۸۹۸	86/4682	Y 191/XY	400A
8/1044	۱۴/۰۹۷	١٨١/٩٢	3042/11	888.
۵/۱・۹・	14/8499	177/98	477./44	۳۷۹۰
١/٨٢٠٨٣	۱۰/۷۰۳۸	१४९/४८	8184/18	۳۸۶۰
21/8081	۱۸/۵۰۸	1 Y 1/+ Y	8122/11	٣٩١٠
٣/٨٢۴۴	18/268	180/26	TTAT/TV	8978

جدول (۴- ۱). خلاصه اطلاعات حفاری تعدادی از نقاط عمقی چاه ۱

^{&#}x27; Hook load

۲ Flow in

۳ ECD

ROP (m/h)	WOB (klbf)	RPM (rpm)	Torque (lbf.ft)	عمق تصادفی
•/4147	14/141	۷۷/۸۵	1771/82	30.1
١/۵٠٩٨	۱ • /۵۸۸	۱ • ۷/۶۲	980/14	۳۶۲۰
7/• 184	۷/۶۳۷	157/29	۱•٨•/٨	۳۷۳۰
4/889	٧/٢١٩۶	149/4	1187/89	۳۸۵۰
7/2918	٨/•٩١	۱۴۵/۸۶	1181/88	*97*
٣/٢۶٧	٨/١۴۴٣	۱۴۷/۹۳	۱۱۵۵/۰۷	8976

جدول (۴- ۲). خلاصه اطلاعات حفاری تعدادی از نقاط عمقی چاه ۲

۴-۳- همگامسازی دادههای حفاری و ژئومکانیکی

مقیاس اطلاعات حاصل از نگارهای پتروفیزیکی و کلیهی مدلسازیهای ژئومکانیکی یک بعدی فصل ۳، در فواصل عمقی ۲/۱۵۲۴ متر می باشند. هریک از دادهها با توجه به فرمتهای مختلف (LAS ،Assci و ...) از میان اطلاعات اولیه بدست آمدهاند. از طرفی دیگر دادههای حفاری در فواصل عمقی هر متر ثبت شدهاند. دلیل اختلاف فواصل این دو بخش از پارامترها را می توان به فناوری ثبت دادههای پتروفیزیکی در فواصل کوتاه مربوط دانست. همچنین به عنوان نمونهای از تفاوتها، دادههای سرعت چرخش مته حفاری (RPM) در طول چند متر تفاوت چندانی ندارد ولی دادههای تخلخل (INPH یا PHIE) در فواصل کوتاه چند سانتی متر تغییرات بالایی دارند. برای تحلیل دادههای تخلخل (INPH یا PHIE) در فواصل کوتاه چند ۸ متر تبدیل شده است. این همگامسازی با استفاده از میانگین گیری میان اطلاعات در طول ۱ متر انجام گرفت. نتایج در تعدادی از عمقها به صورت نمونهی تصادفی در بخش دادههای ژئومکانیکی چاهها، در جداول (۴–۳) و (۴–۴) به نمایش درآمده است.

E (GPa)	UCS (MPa)	F.angle (degree)	Stress (MPa)	CCS (MPa)	عمق تصادفی
۲۶/۳۰	84/44	۲۸/۳۹	V1/T9	٨۵/٢٢	۳۵۵۷
24/08	۶۰/۵۱	۲ <i>۶</i> /۹	۷۳/۸۳	۷۵/۱۴	866.
26/20	۶۵/۴۸	۲۷/۱۷	۲۳/۶۵	۸۴/۷۶	۳۷۰۸
18/88	47/49	۲۷/۷۳	VF/TV	۵۹/۷۴	۳۸۰۱
१९/९٣	49/98	۲٩/۰λ	۷۶/۸۵	۷١/۵٣	۳۸۹۰
۲١/٢٣	۵۲/۹۵	22/22	۷۷/۹۴	٧۴/٧۶	٣٩٢۴

جدول (۴- ۳). خلاصه اطلاعات ژئومکانیکی تعدادی از نقاط عمقی چاه ۱

جدول (۴- ۲). خلاصه اطلاعات ژئومکانیکی تعدادی از نقاط عمقی چاه ۲

E (GPa)	UCS (MPa)	F.angle (degree)	Stress (MPa)	CCS (MPa)	عمق تصادفی
78/77	۶۵/۴۲	۳۵/۶۸	٧٠/٩٠	۸۲/۴۸	۳۵۰۱
۲۸/۱۱	۶۸/۵۵	۴۵/۷	VT/8T	۹۴/۱۸	۳۵۷۰
۲۹/۸۴	४४/४१	٣٧/٩٧	VF/FF	٩٢/٧٣	8804
۲۷/۰۶	88/1V	۲۸/۱۸	۷۵/۴۶	۸۱ <i>/</i> ۶۸	۳۷۲۰
۲۰/۶۸	۵۱/۶۸	۲۵/۸۹	४४/४१	V۶/۴۸	۳۸۳۸
۲۳/۶	۵۸/۳	۳۴/۷۷	٨٠/١۴	۸۵/۰۴	۳۹۸۴

۴-۴- شبکههای بیزین

شبکههای بیزین به عنوان یک ساختار، مدلهای گرافیکی چرخهای مستقیم^۱ احتمالاتی هستند. این مدلها رابطهی علت و معلولی میان متغیرها را تعیین میکنند. این فرایند شامل یادگیری ساختاری و یادگیری

[\] Directed acyclic graphs

پارامتری میباشند. شبکهی بیزین روشی طبیعی برای مدلسازی دنیای غنی و پیچیدهی اطراف ما است. با استفاده از آن میتوان ساختار ذاتی یک فرایند را تفسیر و طبق آن عملهای متفاوتی مانند احتمالات و یادگیری را امکانپذیر نمود. شبکههای بیزین، روشی را برای تشخیص ارتباط میان متغیرهای تصادفی به صورت ترسیمی فراهم میکنند (2013 , 2013 , 2013 ; عامیزاده، ۱۳۸۶; رضایی تبار و سلیمی، ۱۳۹۵). مدلهای ارائهشده الگوها در شبکهی بیزین بر مبنای احتمالات است. این شبکه توسط جود^{۱۲} (۱۹۸۷) مطرح شده است. ساختار آن شامل ساختار یادگیری است که برای نمایش احتمال وابستگی میان متغیرها استفاده میشود. در مواردی به عنوان یک ابزار جهت مشخص کردن عدم قطعیتها در هوش مصنوعی استفاده شده است. کاربردهای آن در بخشهای مختلف مانند بررسیهای سیستم (موضوعات برنامهنویسی و کامپیوتر)، شناسایی الگوها، مدیریت، مسائل پزشکی و همچنین مهندسی است (, 2013 Xhou & Lio).

در مهندسی نفت کاربرد شبکههای بیزین در مواردی مشاهده شده است. مسعودی و همکاران (۲۰۱۲)، از شبکههای بیزین جهت تشخیص زونهای تولیدی مخزن در چاههای نفت بهره گرفتهاند. همچنین در نتایج به مناسب بودن این شبکهها در تشخیص ویژگیهای تاثیرگذار در انتخاب نقاط غنی مخزن از میان ویژگیهای مختلف اشاره شده است. ژنکای لیو و یونگونگ لیو^۲ (۲۰۱۹) بر اساس شبکههای بیزین روشی را ارائه کردهاند که میزان خطر ناشی از انفجار در حفاری زیردریایی و دستگاه جلوگیری کننده در مقابل انفجار^۳ (BOP) را کاهش میدهد. همچنین در مطالعهای دیگر رنجبر و همکاران (۱۳۹۳) از میان تعداد زیادی پارامترهای موثر در تخمین تخلخل سنگ در چاههای نفتی مورد مطالعه، پارامترهای دارای تاثیر

[`] Juda

^r Zengkai Liu and Yonghong Liu

^{*} blowout preventer

بیشتر را معرفی و ارتباط ساختاری میان آنها را مشخص کردهاند (Lio, 2019 ; رنجبر و همکاران (۱۳۹۳). در ادامه ویژگیهای شبکههای بیزین و روشی جهت آموزش شبکه آن تشریح می شود. ۴-۴-۴ - ویژگیهای شبکههای بیزین

شبکه بیزین به عنوان پیوندی از هوش مصنوعی و آمار محسوب می شود. این شبکه مدلی از وابستگی ها میان مجموعهای از متغیرها را نشان می دهد که به وسیلهی ساختاری شبکهای با هم در ارتباط هستند. یک شبکهی بیزین، گرافی متشکل از راس ها (گرهها) و یال های جهت دار میان آنها است که راس ها نشان دهنده ی متغیرهای تصادفی اند. در دو نوع یادگیری این شبکه ها (ساختاری و پارامتری)؛ در حالت ساختاری، گراف حاصل از روابط علت و معلولی بین متغیرها و در دیگری توزیع های شرطی بین متغیرها بر آورد می شوند (رنجبر و همکاران (۱۳۹۳); رضایی تبار و سلیمی، ۱۳۹۵).

شبکههای بیزین مناسب برای حالتی از مدیریت متغیرها است که در آن احتمال رخداد یک متغیر وابسته به احتمال رخداد متغیر دیگر است (Nierdermayer, 2008). این موضوع میتواند به تحلیل ارتباط متغیرهای بسیار تاثیرگذار بر عملیات حفاری کمک کند. ساختار BN یک گراف (G) با مجموعهی رئوس (V) و مجموعه یالهای (E) که زیر مجموعهای از V×V است، به صورت (C,E) = G تعریف میشود. هر گره، گراف مربوط به یک متغیر تصادفی در دامنه است و این گراف، یک خانواده از توزیعهای احتمال را بر روی متغیرهای V نشان میدهد. یالهای جهتدار E نشاندهنده یوابستگی بین راسهای مربوط به یال روی متغیرهای V نشان میدهد. یالهای جهتدار E نشاندهنده یوابستگی بین راسهای مربوط به یال روی متغیرهای J نشان میدهد. الهای جهتدار E نشاندهنده یوابستگی بین راسهای مربوط به یال روی متغیرهای J نشان میدهد. الهای جهتدار J نشاندهنده یوابستگی بین راسهای مربوط به یال روی متغیرهای J نشان میدهد. الهای جهتدار J نشاندهنده یوابستگی بین راسهای مربوط به یال روی متغیرهای J نشان میدهد. الهای محافی در این تواند X را مشخص می کند. اگر یک گره (متغیر) والدی نداشته باشد، احتمالهای شرطی همان احتمالهای حاشیه ای آن گره خواهند بود (IP88). این ارتباط میان متغیرها در شبکههای بیزین در این تحقیق بر اساس آموزش الگوریتم K2 انجام شده است که به آن پرداخته خواهد شد. $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ در تعریف اولیه BN بدین صورت بیان میشود که اگر مجموعه متغیرها به صورت BN بدین BN در تعریف که باشد، برای هر متغیر $X_i \in V$ یک خانواده از توزیعهای شرطی $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $Y_i \in V$ یک خانواده از توزیعهای شرطی $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر متغیر $P(X_i | Pa(X_i))$ موسوم به پارامتر داریم که باشد، برای هر مورت رابطه دار (1) باشد، بازی می کردد.

$$P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i))$$
(1-4)

روابطی که وابسته یا عدم وابستگی این توزیع را ممکن میکند، به شکل گرافیکی در شبکه بیزین کد می شوند (رضایی تبار و سلیمی، ۱۳۹۵).

 X_1 شکل (۴–۱) مثالی از نمایش گرافیکی شبکههای بیزین در حالت شرطی است. در این شکل (X_1) مثالی از نمای، X_2 متغیر آبپاشی در آن فصل، نشاندهنده یک فصل از سال، X_3 متغیر آبپاشی در آن فصل، نشاندهنده یک فصل ای منابر متغیر آبپاشی در کنار X_4 متغیر خیس بودن سطوح و X_5 متغیر احتمال سرخوردن در سطوح است. احتمالات هر متغیر در کنار آن در شکل مشخص شده است. در آن (T) نشاندهنده احتمال رخداد و (F) مشخص کننده احتمال عدم رخداد است. بر اساس احتمالات، فرزندان هریک از والدها تعیین می شوند (Pearl, 2009).

فصل سال (X₁): والدی ندارد و احتمال اینکه فصل بارانی باشد یا نباشد برابر و این مقدار ۸/۰ است. این موضوع باعث می شود که هردو حالت آبپاشی و باران به عنوان فرزند باشند.

بارش باران (X2): احتمال اینکه فصل بارانی باشد (X1=T) و باران ببارد ۰/۸ است و احتمال اینکه فصل بارانی نباشد (X1=F) و احتمال بارانی بودن ۰/۲ میباشد.

آبپاشی (X3): احتمال اینکه آبپاشی در زمان فصل بارانی انجام شود برابر مقدار کم ۰/۱ و در فصل خشک (غیربارانی) ۰/۵ است.

خیس بودن سطوح (X4): برای این احتمال دو رخداد وجود دارد. این دو رخداد، یا اینکه بارانی باشد یا آبپاشی شود که احتمالات آنها در شکل مشخص است.



شکل (۴- ۱). مثالی از نمایش گرافیکی شبکههای بیزین در حالت شرطی (Pearl, 2009)

K2 الگوريتم K2-۴-۴

در حالت یادگیری ساختاری شبکههای بیزین، روشها و ساختارهای مورد استفاده در BN به دو دستهی کلی تقسیم میشوند (رضاییتبار و سلیمی، ۱۳۹۵):

الف: رویکرد مبتنی بر قید^۱ (محدودیت) که بر اساس تحلیل وابستگی موجود در دادهها، ساختار بهینه را می یابد.

ب: رویکرد مبتنی بر امتیازدهی^۲ (رتبهبندی) که از یک تابع امتیاز برای رتبهبندی ساختارهای ممکن استفاده میکند و سپس با بهره گیری از یک الگوریتم جستجو، به دنبال کشف ساختاری با بیشترین امتیاز است. این

روش نسبت به روش مبتنی بر قید، دقیق تر و خروجی آن ساختاری منحصر به فرد خواهد بود. الگوریتم K2 بر مبنای حالت دوم (ب) ذکر شده عمل میکند و به صورت یک جستجوی حریصانه^۳ ساختار یک شبکهی بیزی را براساس میزان تطابق آن با دادهها بدست میآورد. این الگوریتم فضای جستجو را با

^{&#}x27; Constrain based

^r Score based

[&]quot; Greedy search

دریافت ترتیب اولیه ^۱ از پیش تعیین شده متغیرها و محدود کردن تعداد والدهای هر متغیر، کاهش می دهد. این موضوعات باعث شده است که روش K2 به عنوان یکی از شناخته شده ترین و پر کاربردترین الگوریتم های آموزش BN مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم توسط کوپر و هر سکویتس^۲ (۱۹۹۲) ارائه شده است و دلیل این نام گذاری بر گرفته شدن آن از سیستم Kutato (ساختاری شبکه ای امتیازدهی) ارائه شده توسط کوپر و هر سکویتس (۱۹۹۱) می باشد (۲۵۹۹, Sogue & R-Marquez) (ساختاری شبکه ای امتیازدهی) ارائه شده توسط در الگوریتم K2 ساختاری را که تطابق بیشتری با داده ها دارد یعنی امتیاز بیشتری کسب کرده، به عنوان بهترین ساختار توصیف کننده داده ها انتخاب می شود. البته این موضوع در رابطه با K2 مطرح است که به ترتیب قرار گیری اولیه متغیرها وابسته است. الگوریتم K2 به صورت زیر قابل بیان است (Herskovits, 1992):

- ورودی: مجموعهای از n گره یا متغیر تصادفی گسسته؛ یک ترتیب روی گرهها، یک حد بالای u روی
 تعداد والدین هر گره و یک پایگاه داده شامل n نمونهی مستقل.
 - •خروجی: مجموعه والدین مربوط به هر گره.
 - •شروع الگوريتم K2
 - برای i از یک تا n انجام شود.

مجموعه والدین متغیر را صفر در نظر بگیر، یعنی:

$$Pa(X_i) = 0$$
$$P_{old} = g(X_i, Pa(X_i))$$

تا زمانی که متغیری برای ادامه دادن وجود دارد و تعداد والدین گره (X_i) از u کمتر است، ادامه بده. ◊شروع

[\]Order

^r Cooper and Herskovits

تا زمان وجود گره z از مجموعه متغیرهایی که X_i میتواند به عنوان والدین خود انتخاب کند، آن طوری انتخاب کند، آن طوری انتخاب کنید که عبارت $g(X_i, Pa(X_i) \cup \{z\})$

 $P_{new} = g(X_i, Pa(X_i) \cup \{z\})$

 $P_{new} > P_{old}$ |Z

∎شروع Pnew := Pold $Pa(X_i) = Pa(X_i) \cup \{z\}$ ∎ پايان اگر متغیری که به عنوان والدین متغیر انتخاب می شود در ترتیب وجود نداشت. ◊پايان والدين مربوط به متغير X_i, ا چاپ کن. •يايان الگوريتم K2 در این الگوریتم تابع امتیاز به صورت رابطه (۴-۲) تعریف می شود: $g(X_i, Pa(X_i)) = \prod_{i=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ii} + r_i - 1)!} \prod_{i=1}^{r_i} N_{ijk}$ (۲-۴) , ابطه كه در آن $Pa(X_i)$: مجموعه والدين راس X_i ، X_i : تعداد حالات والد راس r_i ، X_i تعداد حالات متغير X_i و N_{ijk}: تعداد نمونههای مجموعه دادهی D است که در آن K،X_i امین حالت و والد آن j امین حالت خود را X_{i} دارد. همچنین $N_{ij} = \prod_{k=1}^{r_i} N_{ijk}$ تعداد واحدهای نمونه از مجموعه داده است که در آن والدین متغیر ، j امین حالت خود را دارند.

الگوریتم K2 به طور کلی این روند را طی می کند که فرض می کند یک گره بدون والد است، سپس به طور ترتیبی والد را وارد می کند تا اینکه مشخص شود، کدام والد وارد شده با بیشترین مقدار خود باعث افزایش احتمال نتایج ساختار میشود. اگر تعداد والدها برابر مقدار بیشنیه والد شود یا هیچ والدی نتواند افزایش احتمال دهد، الگوریتم روند اضافه کردن والدها را متوقف میکند.

K2 ضرایب همبستگی برای ارزیابی دادههای

الگوریتم K2 با توجه به نحوهی در نظر گرفتن دادههای ورودی، به ترتیب (سلسلهمراتب) ورود دادهها بر اساس کدهای اولیه وابسته است. روشهای مختلفی برای ترتیب قرار گیری گرههای K2 بکار گرفته شده است و در هریک باید رابطهی علت و معلولی میان دادههای ورودی مشخص شود (,Doguc & R-Marquez 2009; Masoudi, et al., 2012). در این تحقیق از ضرایب همبستگی جهت تعیین میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامتر هدف استفاده شده است. ضرایب همبستگی سابقهی علمی طولانی در علم ریاضیات دارند. گالتون ابتدا همبستگی و رگرسیون را برای وارسی کواریانس در دو یا تعداد بیشتری از خصوصیات مفهومسازی کرد. پیرسون^۲ (۱۸۹۶) طبق نظریه گالتون، معادلات آماری را برای ضریب همبستگی ارائه داد. ضریب همبستگی پیرسون پایهای را برای ارائه و آزمون مدلها در میان متغیرهای اندازهگیری شده مهیا می کند. همبستگی پیرسون جزء دسته ضرایب پارامتریک محسوب می شود. علاوه بر ضریب همبستگی پیرسون ضرایب دیگری هم مطرح شدهاند، همانند ضرایب اسپیرمن و کندال^۳ برای دو متغیر رتبهای، فی در شرایط دو متغیر اسمی و گاما حالت دو متغیر رتبهای و اسمی. ضریب پیرسون برای متغیرهای فاصلهای مناسب است و به طور صحیح ضرایب همبستگی پارامترهای این تحقیق را مشخص میکند. در صورتی که ضریب همبستگی ۱ و ۱- محاسبه شود، کاملاً دو متغیر مرتبط هستند و ضریب پیرسون صفر یعنی دو متغیر مستقل هستند (Lomax and Schumacker, 2004). در جداول (۵–۴) و (۴–۶) ضرایب همبستگی میان متغیرها در چاهها ارائه می شوند. دادههای دارای ضریب همبستگی صفر در میان متغیرها وجود ندارند.

^{&#}x27; Galton

^r Pearson

^{*} Spearman and Kendall
پارامترها	ROP	WOB	RPM	Torque	Е	UCS	f.angle	Stress	CCS
ROP	١	-•/٣٣٢	•/138	•/174	۰/۳۰۵	۰/۳۰۵	•/147	-•/ \ ¥۵	•/٣٣٣
WOB	-•/٣٣٢	١	•/•۴٣	•/٢•٢	-·/۱·۵	-•/ \ •۵	-•/١٧۶	•/١٣١	-•/• A)
RPM	۰/۱۳۶	•/• ۴۳	١	-•/• \V	-•/• ١٢	-•/• ١٢	-•/• % \	۰/۰۳۵	-•/• \۶
Torque	•/174	•/٢•٢	-•/• \Y	١	-•/•99	-•/•99	-•/٢١۴	•/184	•/• ١٣
E	۰/۳۰۵	-•/ \ •۵	-•/•1۲	-•/• %%	١	١	-•/•۵۶	•/٢۵•	۰ /۸۳۵
UCS	۰ /۳ ۰ ۵	-•/ \ •۵	-•/•17	-•/•99	١	١	-•/•۵۶	•/٢۵•	• /830
f.angle	•/144	-•/١٧۶	-•/• ۶ λ	-•/٢١۴	-•/•۵۶	-•/•۵۶	١	-•/٣۴۶	-•/•۶١
Stress	-•/ \ ¥۵	•/١٢١	۰/۰۳۵	•/184	•/٢۵•	•/٢۵•	-•/٣۴۶	١	• /۵۳۹
CCS	•/777	-•/•A١	-•/•\۶	•/•١٣	۰/۸۳۵	۰/۸۳۵	-•/•۶١	۰/۵۳۹	١

جدول (۴- ۵). ضرایب همبستگی پیرسون متغیرهای ژئومکانیکی و حفاری در چاه شماره ۱

جدول (۴- ۶). ضرایب همبستگی پیرسون متغیرهای ژئومکانیکی و حفاری در چاه شماره ۲

پارامترها	ROP	WOB	RPM	Torque	E	UCS	f.angle	Stress	CCS
ROP	١	-•/١٣۶	•/٣•٩	•/٣۴•	-•/٣٣۵	-•/٣٣۵	-•/•۴٧	•/777	-•/•Y
WOB	-•/١٣۶	١	-•/۴۱۶	-•/\ \	•/۴•٣	•/۴•٣	•/٢۵۴	-•/\۵۵	• / ۲ ۲ ۱
RPM	۰ /۳۰۹	-•/۴۱۶	١	•/877	-•/٢٩٢	-•/٢٩٢	-•/∆YA	• /۸۳۸	-•/۲۵۵
Torque	•/٣۴•	-•/ \ \	•/877	١	-•/۲۹V	-•/۲۹V	-•/Y&Y	۰/۵۹۷	-•/• \ ٩
Е	-•/٣٣۵	•/۴•٣	-•/٢٩٢	-•/Y9V	١	١	•/749	-•/17۶	•/۵۶•
UCS	-•/٣٣۵	•/۴•٣	-•/٢٩٢	-•/Y9V	١	١	•/749	-•/17۶	•/۵۶•
f.angle	-•/•۴٧	•/808	-•/ΔYλ	-•/YQV	•/749	•/749	١	-•/٣٨٨	•/801
Stress	•/777	-•/1۵۵	۰/۸۳۸	• /۵۹۷	-•/17۶	-•/178	-•/٣٨٨	١	-•/•V۴
CCS	-•/•Y	•/771	-•/٢۵۵	-•/• \ ٩	۰/۵۶	•/۵۶	• /801	-•/•V۴	١

K2 بررسی نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم

الگوریتم K2 جهت آموزش شبکههای بیزین یک ابزار قدرتمند بشمار میرود. برای استفاد از دادهها، ابتدا پارامترهای مورد نظر در دو بخش حفاری و ژئومکانیکی از لحاظ ضرایب پیرسون غیرصفر بررسی و به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. طبق الگوریتم مطرح شده در بخش ۴-۴-۲، کدنویسی آن در محیط برنامهنویسی متلب^۱ انجام گرفت. ترتیب اولیه ورود دادهها در این روش اهمیت دارد. این ترتیب سلسلهمراتبی باید به صورتی تعیین شود که پارامتر یا پارامترهای هدف در آن مشخص باشند و رابطهی علت و معلولی از لحاظ علم مورد بررسی (در این تحقیق مکانیکسنگ) میان متغیرها تعیین شود (2012, 2012). رنجبر و همکاران، ۱۳۹۳). ترتیب اولیه ورود دادهها به صورت زیر در نظر گرفته شد:

Stress $\rightarrow E \rightarrow UCS \rightarrow f. angle \rightarrow CCS \rightarrow drilling parameters$

دلیل این انتخاب بدین شرح است که پارامترهای حفاری در انتها ثابت شدهاند و ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و منتهی به پارامتر حفاری موضوع اصلی بررسی است. در میان پارامترهای ژئومکانیکی انتخاب شده، پارامتر تنش قائم موثر (Stress) به خصوصیاتی مانند چگالی سنگ وابسته است. همچنین تغییرشکلها و ویژگیهای تاثیرگذار مکانیکی سنگ مانند تخلخل، فشار منفذی، شکستگیها و قابلیت گسترش ترکها در سنگها ناشی از تنش وارده میباشد. در واقع این پارامتر عوامل دیگر را کنترل میکند و محاسبات مکانیکسنگی بر مبنای این پارامتر استوار است. تنش مطرح شده در این بخش تنش قائم موثر برجا میباشد که در محاسبات فصل ۳ به آن اشاره شد. پارامتر بعدی در ورودی متغیرها، مدول الاستیک سنگ (E) است

مقاومت تکمحوری سنگ همانطور که در روابط (۳–۲۶) و (۳–۲۷) مطرح شد، با استفاده از پارامتر مدول الاستیک تعیین می شود و در ترتیب اولیه ورود پس از E قرار می گیرد. دلیل قرار گرفتن زاویه اصطکاک

^{&#}x27; MATLAB

داخلی (f.angle) پس از UCS را میتوان به رابطه (۳–۳۰) نسبت داد. در این رابطه مقاومت سنگ به زاویه θ وابسته است و همینطور این زاویه طبق رابطه (۴–۳) به زاویهی اصطکاک سنگها مرتبط میباشد، بنابراین تغییر مقاومت در تعدادی از سنگها بر روی زاویه اصطکاک موثر است. در این تحقیق مبنای محاسبات سنگهای کربناته است.

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \tag{(٣-4)}$$
 (٣-4) رابطه (٣-4)

در ادامه پس از زاویهی اصطکاک، پارامتر مقاومت فشاری محصور (CCS) قرار داده شده است، زیرا همانطور که در روابط (۳–۳۳) و (۳–۳۳) مربوط به محاسبات CCS مشخص شد، زاویهی اصطکاک در تعیین این پارامتر در عمقهای مختلف موثر است و تحت تاثیر زاویهی اصطکاک قرار دارد. همینطور این پارامتر پس از متغیر UCS باید قرار می گرفت زیرا تغییر مقاومت فشاری تک محوری متغیر CCS را کنترل می کند. در روند کلی سلسله مراتب (Order) وارد شده به ترتیب از چپ به راست، متغیری که سمت چپ قرار دارد بر متغیر سمت راست کنترل دارد و به نوعی جامعیت متغیرها رو به کاهش است.

نتایج نهایی ارتباط میان دسته پارامترهای ژئومکانیکی و هریک از پارامترهای عملیاتی در شکلهای (۴–۲) و (۴–۳) مشخص است. در شکلها منظور از angle زاویهی اصطکاک داخلی میباشد. این نتایج نشان دهندهی ویژگیهای زیر میباشد:

پارامتر ROP (نرخ نفوذ حفاری) در چاههای ۱ و ۲ تحت تاثیر مستقیم پارامترهای ROP و E ،UCS و Stress روی نرخ نفوذ حفاری اثر می گذارند و تغییر پارامترهای غیرمستقیم مذکور، نرخ نفوذ حفاری را متحول نمی کند. همچنین می گذارند و تغییر پارامترهای غیرمستقیم مذکور، نرخ نفوذ حفاری را متحول نمی کند. همچنین در چاه شماره ۱ (سازند آسماری)، یک ارتباط میان CCS و UCS و UCS در نمودار گرافیکی K2 رسم شده است که این ارتباط از طریق CCS در نقاطی باعث کاهش و افزایش محسوس ROP می شود.

- متغیر WOB (وزن روی مته) مستقیماً تحتتاثیر Stress و angle با اولویت متغیر angle قرار دارد. همچنین E، UCS و CCS از طریق ارتباطات غیر مستقیم بر WOB اعمال می شوند. ذکر این نکته ضروری است که در چاه شماره ۱، CCS یک ارتباط با زاویه اصطکاک نشان می دهد که از طریق غیر مستقیم نزدیک تر به WOB است و اهمیت متغیر CCS با اولویت angle در چاه ۱ را مشخص می کند.
- پارامتر سرعت چرخش مته حفاری (RPM) در چاه شماره ۱، به طور مستقیم از UCS و Stress و Stress به angle و Stress است با اولویت UCS تاثیر می پذیرد. در چاه شماره ۲ این متغیر وابسته مستقیم به angle و Stress است و تغییرات آنها بر روی RPM تاثیر گذار می باشد. نقاط مشترک میان دو چاه در دو سازند مختلف آسماری و سروک در رابطه با نتایج گرافیکی RPM به تاثیر غیر مستقیم CCS بر RPM با استفاده از Stress و Stress است.
- در نتایج متغیر گشتاور مته حفاری (WOB) به عنوان پارامتر هدف، در دو چاه اثر گذاری angle و angle و Stress
 با اولویت angle مشاهده می شود. بنابراین متغیر angle در بررسی ها و تعیین محدوده
 WOB ارجحیت دارد. پارامترهای E و UCS با تاثیر گذاری بر Stress به عنوان والد روند ارتباط پارامترها باعث تغییر WOB شده اند.



شکل (۴- ۲). نتایج نهایی ارتباط میان دسته پارامترهای ژئومکانیکی و هریک از پارامترهای عملیاتی چاه ۱



شکل (۴- ۳). نتایج نهایی ارتباط میان دسته پارامترهای ژئومکانیکی و هریک از پارامترهای عملیاتی چاه ۲

۴-۵- شبکههای عصبی مصنوعی

هوش مصنوعی (شبکههای عصبی) در حالت کلی به دو بخش تقسیم می شود، این دو قسمت شامل شبکه برپایه یقوانین (کارشناسی) و سیستمهای تطبیق پذیر (هوش) است. شبکه عصبی یک سیستم محاسبه برنامه القایی زیستی دارای پتانسیل حل مسائل با شناسایی الگوهای مورد نیاز است. دیگر ویژگی مهم شبکههای عصبی تطبیق پذیری آنها است، بدین صورت که شبکههای عصبی از یک روند الگوریتمی استفاده نمی کند (Mohaghegh and Ameri, 1995; Yilmaz, *et al.*, 2002).

شکل (۴–۴) یک نورون^۱ را نمایش میدهد که شامل دو قسمت پردازش میباشد. نورونها یکی از ویژگیهای متمایز موجودات هستند که همان سلول عصبیاند. آکسونها^۲ برانگیزش ایجاد شده سلول و دور شونده از آن را هدایت میکنند. جابهجایی برانگیزش در نورون اول باعث شروع برانگیزش در نورون دوم میشود. در این بین تعدادی از سیگنالها از دیگری قویتر هستند و به عبارتی سیگنالهایی برانگیخته (مثبت) و تعدادی مانع (منفی) میباشند. تاثیرهای همه وزنهای^۳ ورودی با هم جمع میشوند. اگر جمع انجام گرفته برابر یا بزرگتر از حد آستانه نورون باشد، نورون خروجی ارائه میدهد (1995).



شکل (۴-۴). یک نورون دوقطبی شامل دو قسمت پردازش

^{&#}x27; Neuron

۲ Axons

[&]quot; Weights

در محاسبات شبکههای عصبی، نورونهای مصنوعی به عنوان المان پردازش^۱ دادهها (PE) نامیده می شوند. همچنین گره برای بلوکهای ساختاری ساده استفاده می شود که در شکل (۴–۵) به صورت دایره است.



شکل (۴– ۵). نورونهای مصنوعی به عنوان المان پردازش دادمها (Mohaghegh and Ameri, 1995) در شکل (۴–۵) به این موضوع اشاره می شود که همانند مباحث ریاضیاتی، ورودی ها و همچنین وزن ها به صورت برداری مانند (*I*₁, *I*₂, ..., *I*_n) و (*W*₁, *W*₂, ..., *W*_n) قرار می گیرند. نتیجه نهایی یک عدد است که اگر نقاط برداری جهت یکسانی داشته باشند، مقادیر تولیدی بیشینه مقدار را دارند. به طور کلی شبکه دارای لایه های ورودی، خروجی و پنهان است. (Nelson & Illingworth, 1991; Mohaghegh and Ameri,).

شبکههای عصبی میتوانند تعدادی از مسائل اساسی در مهندسی نفت که با استفاده از محاسبات معمول قابل حل نیست را مرتفع کنند. در صورتی ممکن است از شبکههای عصبی سود برد که دادههای مهندسی برای بیان و طراحی ویژگیها به حد کافی موجود باشند. شبکههای عصبی پتانسیل زیادی برای افزایش دقت بررسیها و نتایج در شرایط با حجم زیادی از دادههای به نظر مفید یا غیر مفید، نشان داده است. به عنوان نمونه، منظمی و همکاران (۲۰۱۲) طبق مدلسازیهای شبکههای عصبی به پیشبینی نرخ نفوذ

¹ Processing Elements

حفاری در یکی از چاههای جنوب ایران پرداخته است و در نتایج آن مطرح شده که نرخ حفاری با دقت بالایی به نتایج واقعی نزدیک است. همچنین استفاده از شبکههای عصبی در مطالعات ایلماز^۱ و همکاران (۲۰۰۲) و نوروزی و همکاران (۲۰۱۶) در موضوعات به ترتیب انتخاب مته حفاری و پارامتر نرخ حفاری مشاهده می شود (۲۱۹2, 2012).

MLP) -۱-۵-۴ شبکههای پرسپترون چندلایه^۲ (MLP)

یکی از ساختارهای کاربردی شبکههای عصبی شبکه پیشخور چندلایه یا پرسپترون چندلایه است. در این شبکه نرونهای هر لایه تماماً به نرونهای لایه قبل متصل شده است. خروجی هر لایه پس از تأثیر گذاشتن تابع محرک، ورودی لایه بعدی می گردد و این روند تا به دست آمدن خروجی شبکه ادامه مییابد. جهت آموزش شبکههای عصبی، الگوریتمهای آموزشی مختلفی مرسوم است که بر اساس ساختار پرسپترون چندلایه هستند. معروفترین این روشها عبارتند از: انتشار خطا به عقب⁷، گرادیان مزدوج⁴ و لونبرگ-چندلایه هستند. معروفترین این روشها عبارتند از: انتشار خطا به عقب⁷، گرادیان مزدوج⁴ و لونبرگ-مارکوات⁶. در این تحقیق از روش لونبرگ-مارکوات استفاده شده است که یکی از روشهای سریع و افزایش دهندهی همگرایی در شبکههای عصبی بهشمار میرود (Nawi, *et al.*, 2014).

۴–۵–۱–۱– اجزای شبکه عصبی

شبکههای عصبی دادهها را به بخشهای جدا از هم به نامهای دستههای آموزش⁵، آزمون^۷ و اعتبارسنجی^۸ تقسیم میکنند. دستهی آموزش به منظور توسعهی شبکه برای اهداف مورد نظر استفاده می شود. یک مرتبه

[\]Yimaz

^v Multilayer Perceptron

^r Back-Propagation

[†] Conjugate gradient

^a Levenberg Marquardt

^{&#}x27; Train

^v Test

[^] Validation

شبکه اطلاعات را آموزش میدهد و اطلاعات همگرا شده در دستهی آزمون به عنوان ارزیابی و تایید اطلاعات در شبکه استفاده میشود. اگرچه کاربر خروجی مطلوب را در دستهی آزمون در نظر میگیرد ولی آن به وسیلهی شبکه دیده نمیشود. همچنین بخش اعتبارسنجی برای بررسی آموزش انجام شده بکار میرود. در این تحقیق محاسبات با استفاده از تولباکس نرمافزار متلب انجام گرفت و مقادیر آموزش، آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد دادهها در نظر گرفته شد.

۴-۵-۱-۲- شاخصهای کنترلی شبکه

جهت بررسی میزان دقت شبکهها باید از معیارهایی استفاده شود. شاخصهای کنترلی شبکه میزان کارایی آن را در حین آموزش و نتایج نهایی مشخص میکنند. همچنین میزان همگرایی شبکه به این وسیله تعیین میشود. شاخصهای مجزور خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (روابط ۴–۳ و ۴–۴)، در نتایج هر مرحله استفاده از شبکههای عصبی اهمیت دارند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_s - X_o)^2}{n}}$$
 (٣-۴) رابطه (٣-۴)

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{\circ} - \overline{X}_{\circ})(X_{s} - \overline{X}_{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_{\circ} - \overline{X}_{\circ})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_{s} - \overline{X}_{s})^{2}}} \right]$$
(f-f)

در این روابط، X_{\circ} مقدار مشاهداتی (قطعی اولیه)، X_{s} مقدار تخمینی و X میانگین مقادیر مشاهداتی یا تخمینی است.

 به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد دادهها و تعداد لایههای پنهان ۱۰ (به دلیل کسب نتایج مناسب نسبت به تعداد لایههای دیگر)، آموزش شبکه طبق روش لونبرگ-مارکوات در تولباکس متلب انجام گرفت. نتایج هریک از مدلسازیها در بخشهای مختلف آموزش، آزمون، اعتبارسنجی با ضریب همبستگی R به صورت جدول (۴-۲) و مقادیر خطا نسبت به پارامتر هدف وارد شده در شکلهای (۴-۶) و (۴-۸) ارائه شده است. در مرحلهی بعد هریک از پارامترهای ژئومکانیکی ورودی به مدل را به اندازه یک واحد افزایش داده، بنابراین باعث تغییر در پارامتر هدف نهایی (از نوع حفاری) میشود. با ثبت میزان تغییر پارامتر هدف در حالت دوم و کسر آن از حالت اولیه (خروجی متلب)، میزان تاثیرگذاری به صورت ضرایبی تعیین شد. مجموعهی ضرایب این پارامترهای ژئومکانیکی در محدودهی مجموع ضرایب استانداردسازی شد (تقسیم بر مجموع ضرایب کل نمایش داده شده است.

	R		با, امت	حاه
Training	Test	All	y , , , , , , , , , , , , , , , , ,	*
• /YY	۰/۵۶	• /٧٢	ROP	
٠/٧۴	• /۵ ۱	•/۶۵	WOB	\ \
٠/٨٣	•/۵۵	• /٧٢	RPM	
• /97	• /۴٨	•/۶٣	Torque	
• / ٨ ١	• /V	• /٧۶	ROP	
•/YA	• /YY	• /VV	WOB	۲
•/٩۶	•/٩٣	•/٩۶	RPM	
٠/٨۴	• /Y)	۰/۸۲	Torque	

جدول (۴- ۷). ضریب همبستگی مدل شبکهی عصبی چاه ۱ و ۲ در حالات Test ،training و All



شکل (۴- ۶). نشان دهندهی میزان خطا اعداد نتایج مدل نسبت به دادههای اصلی چاه ۱



شکل (۴- ۷). نتایج تاثیر گذاری مستقیم هریک از پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری چاه ۱



شکل (۴– ۸). نشان دهندهی میزان خطا اعداد نتایج مدل نسبت به دادههای اصلی چاه ۲



شکل (۴- ۹). نتایج تاثیر گذاری مستقیم هریک از پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری چاه ۲

نتایج شکلهای ۴-۷ و ۴-۹ مقادیر تاثیرگذاری پارامترهای ژئومکانیکی بر عوامل حفاری را به صورت وزنی نشان میدهند. این نتایج در مدل چاه شماره ۱ (در اثر تغییر یک واحد پارامترهای ورودی) به طور مثال وزن روی مته، مقدار وزنها نشان میدهد که پارامترهای مدول الاستیک، تنش قائم موثر و زاویه اصطکاک به ترتیب بیشترین به کمترین تاثیرگذاری را داشتهاند. البته نتایج این تغییر بستگی به میزان نزدیکی پارامتر هدف مدل سازی به پارامتر حفاری واقعی در چاه دارد. پارامتر گشتاور چاه ۱، به زاویه اصطکاک و مدول الاستیک بیش از پارامترهای دیگر ژئومکانیکی واکنش نشان داده و تغییر کرده است. مقادیر مثبت و منفی وزن پارامترها، میزان تغییرات کاهش و افزایش در اثر تغییر یک واحد پارامترهای ورودی میباشد و در تعیین وزنها میزان تاثیر یک پارامتر حفاری بر پارامتر دیگر (پارامتر هدف) لحاظ شده و در نمودارهای مذکور وزن آنها قرار نگرفته است. همچنین در چاه شماره ۲، پارامتر گشتاور تحت تاثیر وزن پارامترهای مذکور وزن آنها قرار نگرفته است. همچنین در چاه شماره ۲، پارامتر گشتاور تحت تاثیر وزن پارامترهای مزکور وزن آنها قرار نگرفته است. همچنین در چاه شماره ۲، پارامتر میشاور تحت تاثیر وزن پارامترهای مذکور موزن آنها قرار نگرفته است. همچنین در چاه شماره ۲ پارامتر مدی از دارد. پارامتر سروک) بیشتر متاثر از تنیش قائم موثر، مدول الاستیک و زاویه اصطکاک به ترتیب با روندی کاهشی قرار دارد. پارامتر سرعت تریب ذکر چاه) زاویه اصطکاک و مقاومت فشاری تکمحوری هستند.

۴-۶- جمعبندی

پارامترهای موثر بر عملیات حفاری در دو دسته ژئومکانیکی و عوامل حفاری در فواصل عمقی یکسانی قرار ندارند. جهت بررسی و مدلسازی فواصل مورد نظر همگامسازی شدند. میان پارامترها در بخش ژئومکانیکی مدول الاستیک، مقاومت فشاری تکمحوری، زاویهی اصطکاک داخلی، تنش قائم و مقاومت فشاری محصور و نیز در بین عوامل حفاری نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته، گشتاور و سرعت چرخش مته انتخاب شدند. جهت بررسی در ابتدا از شبکههای بیزین با استفاده از آموزش الگوریتم K2 استفاده شده است. این شبکهها مدلی از وابستگیها میان مجموعهای از متغیرها را نشان میدهند که به وسیلهی ساختاری شبکهای با هم در ارتباط هستند. نتایج ساختار شبکهای به صورت نمودارهای گرافیکی نمایش داده شد. در میان نتایج گرافیکی ارتباط دارای اولویت هریک از پارامترهای ژئومکانیکی با هریک از پارامترهای حفاری مشخص شده است. در این میان نرخ نفوذ حفاری به عنوان نمونه، در هر دو چاه مورد مطالعه به ترتیب به مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیک و تنش با اولویت ارتباط مقاومت فشاری وابسته است. بنابراین در بررسیها و مدلسازیها جهت عملیات حفاری در سازندهای چاهها (آسماری و سروک) اولویت تخمین ROP در ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی مقاومت فشاری تک محوری است. البته پارامترهای تاثیرگذار غیرمستقیم در صورت تغییرات بالا بر پارامتر حفاری اثر زیادی میگذارند.

در بخشی دیگر، مدلسازی هریک از پارامترهای حفاری با ورودی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری انجام شد. ضرایب همبستگی کل به طور میانگین در محدودهی ۱/۷ تا ۱/۸ قرار دارد. برای تحلیل اثرگذاری مستقیم هریک از خصوصیات ژئومکانیکی، تغییرات به مقدار یک واحد در پارامترهای ورودی انجام گرفت و نتایج میزان تحول پارامتر هدف در اثر تغییر پارامترهای ورودی ثبت و استانداردسازی شد. در نتایج نموداری حاصل به طور مثال اثرگذاری زاویه اصطکاک داخلی در چاه شماره ۲ بر پارامترهای حفاری به ترتیب از بیشترین به کمترین بر گشتاور مته حفاری، نرخ نفوذ حفاری، سرعت چرخش مته و وزن روی مته است. نتایج نمودارهای مذکور با در نظر گرفتن شرایط تغییر هریک از پارمترها بدون تغییر پارامتر دیگر میتواند میزان اثرگذاری مستقیم حاصل از پارامترها را مشخص کند.

فصل پنجم

تفکیک واحدهای ژئومکانیکی چاهها و بررسی مقادیر پارامترهای عملیاتی در هریک از واحدها

۵–۱– مقدمه

پارامترهای تاثیرگذار بر روند عملیات حفاری در اعماق مختلف چاه الگوی تغییرات متفاوتی دارند. در دسته پارامترهای ژئومکانیکی محدودهای از عمق چاه که پارامترها دارای ویژگیهای نسبتاً مشتر کی هستند، به صورت یک واحد ژئومکانیکی خاص تعریف میشوند. تشکیل واحدهای ژئومکانیکی^۱، بررسیهای مربوط به خصوصیات ژئومکانیکی را ساده و قابل درک میکند. از سوی دیگر، خصوصیات پارامترهای حفاری که توسط متخصصین حفاری با استفاده از تجهیزات اعمال میشوند، در محدودههایی دارای ویژگیهای مشتر ک (وند تغییرات مشترک) هستند. در این فصل، ابتدا براساس چینهشناسی، پارامترهای ژئومکانیکی و دادههای نگارهای چاهها و استفاده از گزارشات مرتبط با چاههای مورد مطالعه، زون بندی (ناحیه بندی) هریک از چاهها مشخص (به صورت اشکال و جداول) و سپس تفکیک واحدهای ژئومکانیکی طبق اطلاعات ذکر شده انجام مواهد شد. ویژگی خاص واحدهای ژئومکانیکی نسبت به زون بندی، پرداختن به جزئیات مشترک میان پارامترها است. در ادامه تحلیلهایی در رابطه با ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در عمقهای

۵-۲- زونبندی اولیه چاهها

زونبندی چاههای شماره ۱ و ۲ به ترتیب شامل سازندهای مخزنی آسماری و سروک است. سازند مخزنی آسماری طبق مطالعات قلیپور (۱۳۶۸)، به طور کلی به ۵ لایهی اصلی و ۵ زیرلایه تقسیم شده است. محدودهی این تقسیمبندی در چاه شماره ۱ با توجه به بررسی نگارهای پتروفیزیکی و چینهشناسی تعیین گردید و در شکل (۵–۱) (سمت چپ) مشخص شده است. چاه ۱ تنها در محدوهی ۴ زون اصلی و ۳ زیرزون این تقسیمبندی واقع میباشد. دلیل دیگر استفاده از تقسیمبندی مذکور در مقایسه با تقسیمبندیهای

^{&#}x27; Geomechanical units

مطرح در بخش ۳–۲–۱–۳ فصل ۳، استفاده بخشهای مختلف ژئومکانیک و حفاری شرکت اجرایی عملیات در گزارشات خود است. زون و زیرزون ۱ در ناحیهی فوقانی آسماری شامل سنگهای آهک، آهک دولومیتی به همراه لایههای نازک شیلی و ماسهسنگ است، همچنین لایه نازکی از انیدریت مشابه سازند بالایی (گچساران) مشاهده میشود. در زون و زیرزون ۲، بیشتر محدوده شامل سنگ آهک البته از نوع دولومیتی-شده را شامل میشود. دولومیتیشدن آهک را میتوان از نگارهای PEF (تغییر تدریجی از ۵ به ۳) و چگالی (افزایش تدریجی) تشخیص داد. حالت دولومیتی میزان مقاومت فشاری تک محوری سنگ را کاهش میدهد. همچنین زیرزون ۲، بخشهای نازک ماسهسنگ و شیلی دارد.

زون و زیرزون ۳ بخش میانی آسماری را در برمیگیرد. در زون ۳ بخشهای میانی و انتهایی بیشتر از سنگهای ماسه و لایههای نازک شیلی پوشیده شده و قسمتهای بالایی دارای سنگهای آهک است. در زیرزون ۳ تنها یک بخش میانی سنگهای آهکی دارد و دیگر بخشها سنگهای شیلی با لایههای نازک ماسهسنگی است. همچنین در زون ۴ که چاه ۱ تا این قسمت حفر شده است، سنگ آهک و ماسهسنگ خالصتری نسبت به نقاط دیگر وجود دارد.

در چاه شماره ۲ سازند سروک لایهی مخزنی و مورد مطالعه است. زونبندی اولیه در گزارشهای دریافتی وجود نداشت، بنابراین در این تحقیق طبق ویژگیهای نگارهای چاه، ویژگیهای ژئومکانیکی و چینهشناسی زونبندی انجام شد (شکل ۵–۱، سمت راست). به طور کلی در این سازند (با توجه به چاه شماره ۲) ۴ زون قابل مشاهده و تفکیک است. در زون ۱ سنگهای آهک به همراه لایهی نازک ماسهسنگی وجود دارد. بخش عمدهی زون ۲ سنگهای آهک خالص با لایههای شیلی است. در این زون لایههای شیلی نسبت به زونهای دیگر ضخیم تر است. در زون ۳ سنگهای آهک دولومیتیشده به همراه لایههای نازک شیلی در کل زون وجود دارد. زون ۴ که قسمت انتهایی سازند سروک است، در بخش بالایی سنگهای آهک و بخشهای پائینی لایههای دارای ماسه بیشتر مشاهده میشوند. شکل (۵–۱) نشاندهندهی زونبندی اولیه چاهها است.



شکل (۵- ۱). زونبندی اولیه چاههای شماره ۱ (سمت چپ) و شماره ۲ (سمت راست)

۵-۳- واحدهای ژئومکانیکی چاهها

زونبندیهای اولیه چاهها که بر اساس ویژگیهای چینهشناسی و سنگشناسی و ... تشکیل شدهاند، دارای تغییرات بسیاری در جزئیات خصوصیات ژئومکانیکی هستند. در این حالت برای بررسیهای ژئومکانیکی نیاز به طبقهبندی جدیدی تحت عنوان واحدهای ژئومکانیکی (GMU) است. در هریک از واحدها تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی محدودتر و نامگذاری به عنوان واحد مستقل آسان تر است. همچنین در تحلیل روندهای مشترک پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری تحقیق حاضر، نتایج واضح و مشخص تری را نشان میدهد. این طبقهبندی در دو بخش براساس دادههای نگارهای چاهها و پارامترهای ژئومکانیکی با ارائه

۵-۳-۱ ویژگیهای واحدهای ژئومکانیکی بر اساس نگارهای چاهها

بر اساس نگارهای چگالی، مدت زمان عبور موج، تخلخل و گاما در زونها و زیرزونها تفکیک انجام گرفته است. جزئیات ویژگیها علاوه بر شرح، در قالب جدولهای (۵–۱)، (۵–۲) و (۵–۳) و شکلهای (۵–۲) و (۵– ۳) مشخص شده است. برای تفکیک شرح جزئیات در دو بخش چاههای ۱ و ۲ بیان میشوند و مبنای اصلی تقسیمبندی و تفکیک میان پارامترها و نگارها بر اساس زونبندی کلی مطرح در بخش ۵–۲ است.

۵–۳–۱–۱– چاه شماره ۱

چاه شماره ۱، در سازند مخزنی آسماری، زون ۱ به دو واحد ژئومکانیکی تقسیم شده است. تمایز GMU2 نسبت به GMU1 کمتر بودن متوسط تخلخل و چگالی میباشد که میتوان به دربرداشتن لایههای نازک شیلی در GMU2 نسبت داد. زیرزون ۱ دارای بخشهای GMU3 و GMU4 است که مدتزمان عبور موج و تخلخل در GMU3 دارای مقادیر بالاتری است. این مقادیر با توجه به لایههای ماسهسنگی این بخش میباشد. زون ۲ طبق بررسیها به چهار بخش GMU5 تا GMU8 تقسیمبندی شد و دو بخش GMU5 و GMU8 تخلخل بالا و چگالی کم است در حالیکه GMU6 با توجه به قرار گرفتن در آهک خالصتر مقادیر نگار اشعهی گاما بسیار کمی دارد.

زیرزون ۲ طبق تقسیمات به طور کلی یک واحد ژئومکانیکی (GMU9) را شامل میشود و تفکیک برای آن مطرح نیست. در زون ۳ چاه شماره ۱، سه واحد ژئومکانیکی، با ویژگیهای نقاط افزایش اشعهی گاما در GMU11 و تخلخل و مدت زمان عبور موج بالاتر نسبت به نقاط دیگر در GMU12 مشخص است. دلیل این موضوعات را در قرارگیری دو لایهی ماسهسنگی متناوب با لایههای نازک شیلی در دو واحد ژئومکانیکی مذکور میتوان دانست. در زیرزون ۳، بسیاری از نقاط از ماسهسنگ و لایههای شیلی تشکیل شده است و نواحی که دارای آهک میباشند در GMU13 و GMU15 به صورت تخلخل پائین و چگالی بالا نمود دارند. همچنین محدودههای GMU14 و ماسه به دلیل حالت ماسهای شدن در واحدهایی مقادیر مدت زمان عبور موج و نگار تخلخل بالایی را نشان میدهند.

بخش انتهایی چاه شماره ۱ یعنی زون ۴، در GMU18 و GMU20 دو واحد به ترتیب آهک کاملاً خاص و آهک نسبتاً شیلی شده را نشان میدهند و گواه این موضوع در نگارهای مدت زمان عبور موج و اشعهی گاما است. واحدهای تفکیکی دیگر این زون با توجه به مقادیر تخلخل و چگالی شامل لایههای ماسهای و شیلی-مارنی هستند.

۵–۳–۱–۲– چاه شماره ۲

سازند مخزنی سروک در این چاه مورد مطالعه قرار گرفته است و در قسمت زون ۱، به سه واحد تقسیم می شود که GMU2 در این میان با تغییرات نگار اشعه یگاما و همچنین مدت زمان عبور موج و PEF (نزدیک شدن به ۳) حالت دولومیتی شدن زیاد آهک را بیشتر از محدودههای دیگر نشان می دهد. در زون ۲، GMU4 دارای کمترین مقدار مدت زمان عبور موج و اشعه یگاما ثبت شده در زون را دارد و در واحدهای GMU5 و GMU6 لایه های نازک شیلی باعث کاهش تخلخل و افزایش اشعه یگاما شده است. تفکیک هریک از لایههای شیلی نازک با توجه به هدف این تحقیق یعنی اثر بر روی پارامترهای حفاری مد نظر نبوده است زیرا تاثیر این لایههای نازک بر حفاری در مقیاسهای کم مشخص میباشد.

بخش زیادی از زون ۳ شامل تخلخل و مدت زمان عبور موج بسیار پائین میباشد که در GMU8 به کمترین مقدار رسیده است. تنها یک واحد GMU7 دارای متوسط تخلخل بیشتر نسبت به نقاط دیگر زون میباشد. در واحدهای ژئومکانیکی GMU10 و GMU12 زون ۴ چاه شماره ۲، افت محسوس چگالی مشاهده میشود. همچنین مدت زمان عبور موج دو واحد مذکور نسبت به واحدهای دیگر زون بیشتر است. دلیل این تغییرات مربوط به حالت ماسه ای ایجاد شده و لایههای آهکی زون ۴ است. در GMU11 متوسط تخلخل بیشتر نسبت به نقاط دیگر زون میباشد. در واحدهای ژئومکانیکی مثالا و و GMU12 زون ۴ چاه شماره ۲، افت محسوس چگالی مشاهده میشود. ممچنین مدت زمان عبور موج دو واحد مذکور نسبت به واحدهای دیگر زون بیشتر است. دلیل این تغییرات مربوط به حالت ماسه ای ایجاد شده و لایههای آهکی زون ۴ است. در GMU11 متوسط تخلخل کم و چگالی مربوط به حالت ماسه ای ایجاد شده و لایه می آهکی زون ۴ است. در GMU11 متوسط تخلخل کم و چگالی مربوط به حالت ماسه ای ایجاد شده و لایه می آهکی زون ۴ است. در GMU11

CO	GR (GA	PI)	Γ	DT (μs/f	t)	N	PHI (V/	V)	RH	IOB (g/	c ³)	~ ~ ~ ~	شروع	زون و
میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	کمینه	GMU	عمق	زيرزون
٧/٩	۱۴/۵	۵/۴	۵۶/۳	87/8	۵۱/۴	•/14	٠/١٩	•/•۶	۲/۶	۲/۸	۲/۵	١	۳۵۵۷	1:0:
٧/۶	11	۵	۵۸	66	۵۲	۰/۱۵	•/٣٣	•/•۴	۲/۵۵	۲/۷	۲/۴	٢	۳۵۸۷	
۲۱/۳	۳۱/۵	١٣	۶۷/۷	۷۳/۷	۵۷/۸	٠/١٣	•/17	•/• ٩	۲/۴	۳۵۳	۲/۳	٣	۳۶۰۸	زيرزون
78/7	۶۳/۹	11	۵۹/۱	۷۰/۵	۵۲/۵	٠/٠٩	۰/۱۳	•/•۵	۲/۶	۲/۷	۲/۳	۴	8810	١
۲۰	٧٢/١	٧/١	۵۶/۲	۶۸	۵۲/۱	• / ١	•/17	•/•٣	۲/۵	۲/۷	۲/۲	۵	3627	
۱۰/۸	۳۲/۶	۵/۳	۵۳/۹	۵٩/۲	۵۰/۱	• / ١	۰/۱۹	•/•٢	۲/۶۵	۲/۷	۲/۵	۶	3840	T : :
۱۷/۳	۳۸/۷	٩	۵۹/۷	۶٩	۵۴/۱	•/14	•/۲۴	•/•۵	۲/۵۷	۲/۶۸	۲/۴	۷	8887	روں '
۱۳/۵	٣٠/٣	Y	۵۳	۶۳/۲	۴۸/۹	•/•٨	•/17	•/• ١	۲/۷	۲/۷	۲/۶	٨	36871	
44/1	٩۶/۵	١٣	۶۷/۱	۷۵/۳	۵۵	•/1۵	٠/٢	•/•٨	۲/۵۴	۲/۶۹	۲/۲	٩	۳۷۰۰	زیرزون ۲
۱۳/۷	۳۷	۶/۲	۵۹	۷۰/۵	۵۲	•/١١	•/٣	• / • ٢	۲/۶	۲/۶۹	۲/۴	١٠	۳۷۱۵	
۲۳/۹	٩٢/۶	۶	54	۷۸/۲	۵۵/۵	•/١١	• / ۲ ۱	• / • ٢	۲/۵	۲/۶۹	٣/٣	11	۳۷۵۱	زون ۳
١۴/٨	۲۰/۷	Y/Y	٨۴/١	۹١/٧	<i>۶۶</i> /۹	۰/۱۶	•/77	٠/١٣	۲/۴۶	۲/۴۹	۲/۴	١٢	۳۷۸۳	

جدول (۵- ۱). زونبندی و مقادیر نگارها در واحدهای ژئومکانیکی به صورت حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

٧٩٠	٣	١٣	۲/۲	7/87	۲/۵	•/•٣	•/74	•/17	۵۳/۶	٨۴/٩	۶۷/۹	179	٩/٩	۳٩/۴
۸۰۲ نون	۴ ۱	14	۲/۲	۲/۳	۲/۲	•/1۵	٠/١٧	•/18	۷۴/۹	۷۷/۴	٧۶	۱۹/۲	۳۱/۵	۲۴/۸
۸۱۰ ۳	۰	۱۵	۲/٣	۲/۷	۳۵۳	•/• ٢	•/17	•/•9	۵۳/۱	۷۵/۷	۶۳/۲	١.	۶۷/۶	۲۴/۸
A1Y	۶ ۲	18	۲/۲	7/81	۲/۳۳	•/17	•/٢٢	•/18	۶۷/۳	٧۶/٣	٧۴	۷/۸۴	٧۶	۳/۲۲
٨٣٣	v v	١٧	۲/۱	۲/۶	۲/۴	•/•٢	•/١٨	•/١	۴۹/۸	۷۳/۴	۵۹/۸	٩	88	۲۰/۲
٨٣٩	۰ ۸	١٨	۲/۶	۲/۷۹	۲/۷۱	•/• ١	•/•٨	•/•٣	46/6	۵۶/۳	۵۲/۶	٧	۱۲/۹	۹/۷
۸۵۲ ۴.:	٩	١٩	۲/۵	۲/۷	۲/۶	•/•٧	•/۲٨	•/77	۵۵/۵	Υ۵/λ	۷۰/۸	٧/١	۷۴/۸	۵۰/۹
٨٧٢	• •	۲.	۲/۳	۲/۶	۲/۵۵	•/•۴	٠/٢	•/١١	۵۵/۸	<i>۲۶/۶</i>	۶۳/۹	٧/٣	۶۲/۳	18/4
٨٩١	۱ ،	۲۱	۲/۳	۲/۶	۲/۴۲	•/• ٩	۰/۲	•/1۵	۵۸/۳	۷۹/۲	۷۰/۳	٩	٨٠/٩	۲۳/۹

جدول (۵- ۲). ادامهی جدول (۵-۱)؛ زونبندی و مقادیر نگارها در واحدهای ژئومکانیکی حالت بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

جدول (۵- ۳). زون بندی و مقادیر نگاره ها در واحدهای ژئومکانیکی به صورت حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲

G	GR (GAPI)		D	OT (μs/ft	t)	N	PHI (V/	V)	RF	HOB (g/	['] c ³)	CMU	شروع	اه نو:
ميانگين	بيشينه	کمینه	ميانگين	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	کمینه	میانگین	بيشينه	کمینه	GIVIU	عمق	(10)
۱۷/۳	۲۵/۱	١٢/٧	۵ • /٣	۵۲/۸	۴۸/۹	• /• ١	•/•٣	• / • ١	۲/۶	۲/۶۸	7/87	١	۳۵۰۱	
۲۶/۹	۷۸/۴	٣/٢	۵۶/۴	۷۳/۹	۴۸/۴	• • ۶	•/١٨	•	۲/۶۸	۲/۷۵	7/84	٢	8016	زون ۱
۴/۷	٧/ • ٢	٣/٢	۴٧/٨	۴۸/۲	۴۷/۵	•/•)	• / • ٢	•	۲/۶۸	۲/۷	۲/۶	٣	۳۵۳۱	
14/1	۲۳	۶/۴	46/2	۵۲/۷	۴۷/۸	•/• 1	•/•٣	•	۲/۶۵	۲/۶۹	۲/۲	۴	۳۵۵۰	
۱۸/۱	40/8	۱۰/۱	۵۲/۱	۷۱/۶	۴۷/۹	•/•٢	• • 9	•	۲/۶۵	۲/۷۱	۲/۵۸	۵	۳۵۸۸	زون ۲
14/8	۲۷/۷	۵/۹	۵۲/۶	۶۳	۴۷/۸	•/•٣	•/1	•	۲/۵	۲/۷۲	۱/۸	۶	3661	
۳۰/۷	۳۵/۳	۳/۳	۵۰/۶	۵۱/۱	۴٩/۵	• / • ٢	۰/٣	• / • ١	۲/۶۷	۲/۷	7/87	۷	۳۷۱۰	ت ان ا
۳۶/۷	۴٩/۵	۱۸/۳	۴٩/٣	۵۴	۴۸/۴	•/• 1	•/•۴	•	7/88	۲/۶۹	۲/۵۹	٨	3771	
78/8	84/1	٨/٨۶	۵۲	84/4	۴۸/۷	• / • ۲	•/•۵	•	۲/۶۳	४/४१	۲/۵	٩	۳۷۸۶	
۲۲/۸	۵۳/۸	۸/۴	۵۷/۷	۶۵/۳	49/2	• / • Y	•/١٢	• / • ١	۲/۵۶	۲/۶۸	۲/۵	١.	۳۸۱۶	نون ۴
۲۸/۷	۳۶/۸	۱۹/۹	۵۰/۵	۵۴/۷	۴۸/۸	• / • ٢	•/•۵	•	۲/۶۷	۲/۷۲	۲/۶	١١	۳۸۷۱	
۱۶/۷	۳۱/۲	٨/۵	۵۸/۴	۷۲/۵	۴۸/۶	• / • ٧	•/١٧	•	۲/۵۶	۲/۷	۲/۴	١٢	۳۸۸۸	



شکل (۵- ۲). محدوده و تشکیل واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر اساس نگارهها



شکل (۵- ۳). ادامه شکل (۵-۲)؛ محدوده و تشکیل واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر اساس نگارهها

۵-۳-۲- خصوصیات مشترک واحدهای ژئومکانیکی بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در تخمین ویژگیهای ژئومکانیکی به طور کلی بر اساس نگارهای چاه، یک رابطهی خطی مستقیم میان پارامتر ژئومکانیکی و نتایج نگارها وجود ندارد. از سوی دیگر، بسیاری از بررسیها قبل از عملیات حفاری در بخش ژئومکانیک معمولاً بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی انجام میشوند. بنابراین در این قسمت ویژگیهای ژئومکانیکی هریک از واحدهای ژئومکانیکی چاهها در زونها تشریح و در قالب جدولهای (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶) و شکل (۵-۴) بیان میشوند.

۵–۳–۲–۱– چاه شماره ۱

زون ۱ به دو واحد تقسیم شده است که واحد GUM2 دارای متوسط زاویه اصطکاک بیشتر و مقاومت فشاری محصور کمتر نسبت به GMU1 است. در زیرزون ۱ (عمق ۳۶۰۸ تا ۳۶۲۷)، GMU3 یک افت مقاومت فشاری تک محوری و تنش قائم نسبت به GMU4 دارد. در زون و زیرزون ۲، ۳۵۷7 و GMU9 و GMU7 دارای کمترین میزان مدول الاستیک نسبت به واحدهای دیگر این زون هستند. همچنین در این قسمتها از CMU5 تا GMU5 تا GMU5 و GMU7 و GMU7 و GMU7 و GMU7 تا دارای کمترین میزان مدول الاستیک نسبت به واحدهای دیگر این زون هستند. همچنین در این قسمتها دارای کمترین میزان مدول الاستیک نسبت به واحدهای دیگر این زون هستند. همچنین در این قسمتها از CMU5 تا GMU5 تا GMU5 و GMU7 و GMU7 و GMU7 و GMU7 تا GMU6 و GMU7 تا CMU7 و GMU7 و GMU7 تا GMU1 و GMU14 تا مواد ژئومکانیکی) که GMU14 و GMU17 و GMU13 تا GMU13 تا و GMU14 و GMU13 تا و GMU14 و GMU14 و GMU14 و GMU15 و GMU15 و GMU15 و GMU15 و GMU15 و GMU14 و GMU15 و GMU5 و GM

۵–۳–۲–۲– چاه شماره ۲

در تقسیم بندی واحدهای ژئومکانیکی از لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی باید به این نکات اشاره کرد که در زون ۱ (۳۵۰۱ تا ۳۵۵۰) واحد GMU2 از نظر کلیهی پارامترها تنش قائم، مقاومت فشاری تکمحوری و محصور افت داشته است. همچنین GMU3 دارای مقاومت محصور و زاویه اصطکاک بالایی است. زون ۲ چاه شماره ۲، فاصلهی عمقی زیادی را دربر گرفته است و در GMU5 و GMU6 لایههای نازک شیلی وجود دارد که باعث کاهش مقاومت فشاری محصور و تنش قائم موثر به طور محسوس شده است. تفاوت محسوس واحد GMU7 باعدی تا ۲ قاوت محسوس فراره کرفته است و در GMU5 و GMU5 و GMU5 لایه می نازک شیلی وجود دارد که باعث کاهش مقاومت فشاری محصور و تنش قائم موثر به طور محسوس شده است. تفاوت محسوس واحد GMU7 با دیگر واحدهای زون ۳ دارد که باعث کاهش مقاومت فشاری محصور و تنش قائم موثر به طور محسوس شده است. تفاوت محسوس فشاری محصور در واحد واحدهای زون ۳ در زاویه اصطکاک و تنش قائم موثر محسوس دو همچنین مقاومت فشاری محصور در واحدهای زون ۳ در زاویه اصطکاک و تنش قائم موثر میباشد و همچنین مقاومت مقاومت فشاری محصور در واحدهای زون ۳ در زاویه اصطکاک و تنش قائم موثر محسور در واحد واحدهای زون ۳ دارای افزایش میانگین مقادیر است.

		Pa)	CS (MI	CO	MPa)	tress (I	Eff.S	ee)	(degre	φ	Pa)	CS (MI	U	ı)	E (GP a]
زون	GMU	كمينه	بيشينه	میانگین	كمينه	بيشينه	میانگین	كمينه	بيشينه	میانگین	كمينه	بيشينه	میانگین	كمينه	بيشينه	میانگین
١	١	۲۱	٨٨	۵۹	9 9	۷١	۶۸	۲۸	۳۵	۳۱	44	۶۷	۵۵	۱۷	۲۷	۲۲
	٢	١٩	١٠٣	87	54	۲۲	۶۸	۲۷	۳۷	۳۲	۳٩	٨۵	۵۷	۱۵	۳۵	۲۳
ز زون	٣	۴۵	٨٢	۵۹	۶۸	۷١	٧٠	74	۲۹	۲۷	37	۶۵	40	١٣	78	۱۷
١	۴	47	٩۶	٧٠	٧٠	۷۳	۲۱	77	۲۹	۲۵	۳۵	٨۵	۵۹	١٣	۳۵	74
	۵	4.	1.4	٧٠	۶٩	۷۳	۷۱	۲۱	۳۲	۲۷	41	۸۵	۵۹	18	۳۵	74
۲	۶	٣٣	٩٠	۷۵	۶۷	۷۴	۷۲	۲۳	37	۲۸	49	۶۸	۵۹	١٩	۲۸	74
	۷	۲۰	٧۴	۵١	۶۵	۷۴	٧٠	۲۱	36	۲۹	۳۵	۶.	۵۰	١٣	74	١٩
	٨	۶۵	٨٨	٨١	٧٠	۷۵	٣٧	74	۳۱	۲۷	۵۵	Y۸	54	77	٣٢	78
ز زون ۲	٩	٨/٩	٧۴	۴۷	66	٧۴	۷۱	٢٠	٣٠	74	٣٠	۶۷	44	۲۷	١١	١٧
	١.	۲۰	۸۵	87	۶۷	۷۶	۷۲	77	۳۵	۲۸	۳۷	54	۵١	14	78	۲.
٣	11	١٨	٨۶	۵۹	۶٩	۷۶	۷۳	۲۱	۳۱	78	۲۹	۷۲	۴۷))	۲۹	١٨
1	١٢	۲۷	۵۸	۳۸	۶٩	۷۳	۷۲	۲۷	۳۵	٣٠	١٩	41	۲۵	818	18	٩/١

جدول (۵- ۴). زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

18	74	٧/٩	۴۱	۶.	77	۲۵	۲۹	۲۱	۷۳	۷۷	۶۷	49	۷۵	٣/۴	١٣	
۱۰/۹	11	١.	29	٣٠	۲۸	۲۷	۲۸	۲۵	٧٢/٩	۷٣	۲۲	47	44	41	14	tat i
۲۳	34	١٢	۵۷	٨٣	٣٢	۲۵	۲۸	71	۷۵	۷۷	۲۷	٧٠	٩٩	۳٩	۱۵	۳
١٢	١٨	١٠	٣٣	40	۲۹	۲۸	۳۲	71	۷۳	۷۵	۶٩	۴۷	54	4.	18	
١٨	۲۷	11	۴۷	9 9	٣٠	79	٣٠	74	۷۵	Y٨	۲۲	۶۱	٨۴	۶۱	۱۷	
78	٣٣	۲۳	94	٨٠	۵۷	79	۲۷	۲۵	Υ٨/١	Y٨	۷۶	٨١	٩٩	۷۳	١٨	
۱۵	۲۹	١٢	۳٩	۷۲	٣٣	74	74	77	۶٩	۷۷	54	41	٩۵	۲۳	۱۹	۴
١٩	78	11	۴۷	۶۵	٣٠	۲۷	٣٠	۲۳	۷۶	Y٨	۶۷	۶۵	٨۶	۲۹	۲.	
۱۵	71	١.	۳٩	۵۲	۲۹	۲۷	۲۹	77	۷۴	۷۷	54	۵۳	۷۴	١٧	۲۱	

جدول (۵– ۵). ادامه جدول (۵–۴)؛ زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالت بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

جدول (۵- ۶). زونبندی و پارامترهای ژئومکانیکی در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲

ŀ	E (GPa)		U	CS (MI	Pa)	φ	(degre	ee)	Eff.S	tress (I	MPa)) CCS (MPa)			6	
میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	ييشينه	كمينه	میانگین	ييشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	GMU	زون
۲۷	۲۸	74	88	۶٩	۶.	۳۸	41	۳۳	۷۱/۱	۷١	٧٠	٨۵	٨٨	٨٢	١	
۲۳	۲۸	14	۵۸	٧٠	۳۷	۳۷	49	77	٧٠	۷۱	۶۵	٨٢	1 • 1	۶.	٢	١
۲٩/۴	۲۹	۲۸	۷١	۲۲	٧٠	49	۵۰	۴۷	۷۲/۲	۷۲	۲۱	١٠١	١٠٣	٩٧	٣	
۲۹	4.	۲۵	۷۲	٩۶	87	41	۴۷	۳۳	۷۲/۵	۷۲/۸	۲۲	٩۴	١٢١	٧٩	۴	
78	۲۹	۱۵	۶۳	۷١	۳۸	۳۷	44	۲۳	۷٣	٧۴	۷۲	٨۶	٩۶	۵۲	۵	٢
۲۷	۴.	١٧	۶۷	۹۵	47	٣٩	44	۳۲	٧۴	۷۵	۲۱	٩۴	١٢١	٧٩	۶	
79	۲۷	۲۶/۴	۶۵	۶۷	54	٣٠	۳۴	۲۸	۷۵/۳	۷۵/۵	۷۵/۲	٨٢	٨٧	٨٠	۷	٣
۲۷	۲۸	۲۳	۶٨	٧٠	۵۸	۲۸	85	۲۳	۷۶	۷۷	۷۵	٨٣	٨٨	٨٠	٨	
79	74	٢٠	۶۳	٨٣	۵١	٣٣	41	۲۱	<u>۲</u> ۶/۹	٧٧	۷۶	٨۶	٩۶	54	٩	
٢٠	٣٢	18	۵۲	۷۸	41	۳۲	۳۸	۲۱	۷۶	Y٨	٧۴	٨٢	٩۴	87	١٠	۴
٣٠	٣٩	۲۳	۷٣	٩۴	۵۷	۳۱	82	۲۷	VA/Y	۷۸/۹	Y٨	۹١	11.	٨٢	11	
٢٠	۲۹	١٢	۵١	٧٠	٣٢	۳۵	47	۲۹	Y۸	٨٠	٧۴	٨۶	٩٩	۷۳	١٢	



شکل (۵- ۴). محدوده و نمایش واحدهای ژئومکانیکی چاه ۱ (سمت چپ) و چاه ۲ (سمت راست) بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی

۵-۴- بررسی مقادیر اعمالی پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی

ویژگیهای هریک از واحدهای ژئومکانیکی بر اساس مقایسه میان واحدهای هر زون در دو حالت نگارها و پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از تشریح، جداول و شکلها در اعماق مختلف چاهها بررسی گردید. در این بخش ویژگیهای مشترک میان روند تغییرات واحدهای ژئومکانیکی و اعمال پارامترهای حفاری تحلیل میشود. این قسمت در دو بخش چاه ۱ و ۲ شامل تحلیل روندها، جدولهای (۵–۷)، (۵–۸) و (۵–۹) و نیز شکلهای (۵–۱۵) و (۵–۱۶) میباشند. در هر زون مورد بررسی به نمودار تحلیلی مربوطه اشاره میشود.

چاه ۱ (سازند مخزنی آسماری)، زون ۱ شامل دو واحد GMU1 و GMU2 است. در ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری آن میتوان به تفاوت میانگین مقاومت فشاری محصور، مقاومت فشاری تکمحوری، وزن روی مته و نرخ نفوذ حفاری مطابق نمودار شکل (۵–۵) اشاره کرد. در GMU2 نسبت به GMU1 مقدار پارامترهای مقاومت فشاری تکمحوری و محصور به ترتیب ۳/۶ و ۵ درصد (حالت میانگین) بیشتر است و از طرفی وزن روی مته در GMU2 نسبت به واحد GMU1، ۱۲ درصد کمتر میباشد. این موضوع در مقادیر نرخ نفوذ حفاری به عنوان شاخصی از کیفیت عملیات حفاری نمود دارد و مقدار POP در GMU2 در محادیر درصد بیشتر ثبت شده است. مطابق شکل (۵–۱۵) و (۵–۱۶) میان پارامترهای ژئومکانیکی روند تغییرات مقاومت فشاری تکمحوری، مقاومت محصور، مدول الاستیک و تنش قائم موثر تقریباً مشابه است، البته این

وضعیت در مورد روند کلی تغییرات صدق می کند و مقادیر میزان کاهش و افزایش متفاوتی دارند. زیرزون ۱ دارای دو واحد ژئومکانیکی GMU3 و GMU4 می باشد (تقسیم بندی کلی واحدها در شکل های ۵–۱۵ و ۵–۱۶). طبق نمودار شکل (۵–۶) ویژگی GMU4 نسبت به GMU3 ثبت مقادیر ۳۱ و ۱۸ درصد بیشتر به ترتیب در مقاومت فشاری تک محوری و محصور است. این مقادیر در کنار میزان متناسب وزن روی مته و گشتاور (به ترتیب ۴۲ و ۱۱ درصد بیشتر در GMU4) سبب اندازه گیری مقدار بالاتر (۲۴/۵ درصد بیشتر نسبت به GMU3) نرخ نفوذ در واحد GMU4 شده است. این مقادیر متناسب پارامترهای حفاری ذکر شده مربوط به افزایش واضح خصوصیات مقاومتی سنگ و پارامترهای همعرض آنها است. به طور کلی روند تغییرات پارامتر گشتاور مته مشابه وزن روی مته است و مقادیر میانگین آن در هر زون تفاوتهایی دارد. در ادامه کلیهی نمودارها، مقدار عددی گشتاور تقسیم بر ۱۰۰ شده است. واحدهای پارامترهای مقاومت فشاری تکمحوری (MPa)، مقاومت محصور (MPa)، مدول الاستیک (GPa)، زاویه اصطکاک (degree)، وزن روی مته (klbf)، گشتاور (lbf.ft) و نرخ نفوذ حفاری (m/h) است.



شکل (۵-۵). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۱ چاه ۱



شکل (۵- ۴). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زیرزون ۱ چاه ۱

عمقهای ۳۶۲۷ تا ۳۷۰۰ متری چاه شماره ۱، زون ۲ را شامل می شود که در مورد ارتباط میان واحدهای ژئومکانیکی و حفاری تحلیل هایی می توان عنوان کرد. در مقادیر واحدهای GMU5 و GMU6 میانگین

مقاومت تک محوری یکسانی حاصل شده است اما پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری محصور به ترتیب افزایش ۲۸ و ۷ درصدی نسبت به GMU5 را در GMU6 دارند. در این شرایط مقادیر وزن روی مته و گشتاور در واحد GMU6 بیشتر از واحد GMU5 اعمال شده است و افزایش ۲۴ درصدی نرخ نفوذ حاصل شده است (نمودار شکل ۵–۷). به طور کلی می توان این موضوع را عنوان کرد که در صورت مقایسه شرایط زاویه اصطکاک برای واحدهای ژئومکانیکی باید مقادیر متوسط وزن روی مته و در نتیجه گشتاور در نقاط دارای زاویه اصطکاک بالاتر، بیشتر باشد تا به نتایج عملکردی مناسب حفاری (یکی از جنبههای آن ROP بالاتر) منتج شود.

در نمودار (شکل ۵–۷) و شکل (۵–۱۵ و ۵–۱۶) زون ۲، واحدهای GMU6 و GMU8 ویژگیهای خاصی از ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری را مشخص میکنند. در واحد GMU6 زاویهی اصطکاک متوسط از GMU8 بیشتر است اما مقادیر مقاومت فشاری تکمحوری و محصور نسبت به واحد دیگر در GMU8 هردو ۸ درصد برتری دارند. در سوی دیگر، پارامترهای حفاری وزن روی مته و گشتاور واحد GMU6 با توجه به مقاومت متوسط در زون ۲ و بالا بودن ضریب اصطکاک (با توجه به مقادیر بالاتر WOB و اثر آن بر گشتاور در واحدهای دارای زاویه اصطکاک بالا در مقایسه با کل زون) دارای مقادیر متناسب میباشد و به ROP متوسط ۶/۶ (جزء مجموعهی نرخ نفوذهای بالای ثبت شده در چاه ۱) منجر شده است. در GMU8 که مقاومت سنگ متوسط ۸ درصد بیشتر نسبت به GMU6 است، مقادیر وزن روی مته به میباشد و به ROP متوسط ۶/۶ (جزء مجموعهی نرخ نفوذهای بالای ثبت شده در چاه ۱) منجر شده است. در GMU8 که مقاومت سنگ متوسط ۸ درصد بیشتر نسبت به GMU6 است، مقادیر وزن روی مته به میباشد و به ROP که مقاومت سنگ متوسط ۸ درصد بیشتر نسبت به GMU6 است، مقادیر وزن روی مته به به طور متناسب در سازندهای با مقاومت بالا) میباشد و منجر به ثبت ROM میانگین ۱/۵ (یعنی ۲۹٪ کمتر نسبت به GMU6 یا GMU8 کردیده است. مقایسه میان GMU7 و GMU8 نشاندهندهی (نمودار شکل ۵–۷) میانگین مقاومت تکمحوری بیشتر و زاویهی اصطکاک کمتر در GUM8 نسبت به GMU7 است. با بررسی میانگین پارامترهای حفاری این واحدها، گشتاور در GMU8 GMU8 درصد بیشتر است. این مقادیر متناسب سبب افزایش ۲۴ درصد ROP (نسبت به GMU7) شده است. در این مقایسه اعمال متناسب وزن روی مته و گشتاور در سنگهای مقاومت بالاتر در مقایسه با سنگهای مقاومت کمتر مطرح شد. همچنین تغییرات بسیار کم سرعت چرخش مته در اعماق چاه ۱ سبب عدم دستیابی به تحلیلی جامع برای پارامتر مذکور و پارامترهای ژئومکانیکی شده است.



شکل (۵- ۷). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۲ چاه ۱ در زیرزون ۲ (واحد GUM9) در محدودهی عمق ۳۷۰۰ تا ۳۷۰۵ (شکل ۵–۱۵ و ۵–۱۶) پارامتر مقاومت تکمحوری و همعرضهای آن یعنی مدول الاستیک و تنش قائم موثر کاهش محسوسی نسبت به میانگین کل GMU9 نشان میدهند. در این حالت وزن روی مته و گشتاور بسیار بالاتر از میانگین واحد مذکور است و کاهش شدید نرخ نفوذ حفاری در این نقاط ثبت شده است.

در زون ۳ طبق نمودار شکل (۵–۸)، مقایسه میان GMU10 و GMU12 (بیشترین و کمترین مقدار مقاومت و زاویه اصطکاک کل زون مذکور)، پارامترهای مقاومت تکمحوری، مدول الاستیک و زاویه اصطکاک در GMU12 نسبت به GMU10 به ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۷ درصد کمتر است. وزن روی مته این واحدها به طور متناسب (یعنی وزن روی مته بیشتر برای واحد با مقاومت بالاتر) اعمال شده است و مقادیر گشتاور در GUM10 (مقاومت کمتر) و GMU12 تقریباً یکسان است. در دو حالت عدم تناسب وزن روی مته و گشتاور در GMU10 و همچنین تاثیر عوامل دیگر غیر از پارامترهای مذکور، افزایش ۲۱ درصدی نرخ نفوذ حفاری GMU12 نسبت به GMU10 توجیه می گردد.

در بررسیهای زون ۳ (شکل ۵–۸)، نرخ نفوذ حفاری در GMU10 از GMU11 بیشتر است. دلیل این تفاوت در ارتباط پارامترها قابل بیان میباشد. در GMU10 به میزان ۷ و ۸ درصد، زاویه اصطکاک و مقاومت تکمحوری بیشتر تعیین شده است. در این شرایط عوامل حفاری، وزن روی مته ۶۰ درصد بیشتر در GMU10 نسبت به GMU11 اعمال شده ولی این مقدار وزن روی مته سبب افزایش گشتاور نشده و ۳ درصد کمتر است. همچنین این کاهش نرخ حفاری منطقی تر میشود اگر توجه شود که زاویه اصطکاک درصد کمتر است. همچنین این کاهش نرخ حفاری منطقی تر میشود اگر توجه شود که زاویه اصطکاک در زیرزون ۳ طبق نمودار شکل ۵–۹، CMU13 و GMU16 در میانگین پارامترهای ژئومکانیکی دارای تفاوتهایی هستند. این تفاوتها شامل ۲۴ درصد مقاومت تکمحوری بیشتر در GMU16، ۱۲ درصد angle کمتر نسبت به GMU16 در شرایط تنش قائم تقریباً ثابت است. پارامترهای حفاری این دو واحد در GMU13، مقادیر وزن روی مته و گشتاور به ترتیب میانگین ۷۱ و ۴ درصد بیشتر نسبت به GMU16 میاری GMU13، مقادیر وزن روی مته و گشتاور به ترتیب میانگین دارای دارای GMU16 در میانگین پارامترهای تاوی دارای GMU13، مقادیر وزن روی مته و گشتاور به ترتیب میانگین ۱۷ و ۴ درصد بیشتر نسبت به GMU16

همچنین در زیرزون ۳، واحد GMU17 در مقایسه با GMU14 نزدیک به دو برابر کمتر نرخ نفوذ حفاری ثبت شده دارد (شکل ۵–۹). با بررسی پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری میتوان عنوان کرد که مقاومت تکمحوری سنگ به طور متوسط در GMU17 بیشتر و زاویه اصطکاک ۴ درصد کمتر نسبت به GMU14 است. در پارامتر تنش قائم موثر، ۳ درصد افزایش نسبی در GMU17 مشاهده میشود. در میان عوامل حفاری این بخشها ۳۷ درصد افزایش (به طور متناسب) وزن روی مته در واحد دارای مقاومت بیشتر (GMU17) ثبت شده است اما عدم تناسب در میزان گشتاور وجود دارد. به طوریکه برعکس مقدار ۵/۶ درصد کاهش گشتاور نسبی در این واحد ثبت شده است و این موضوع میتواند دلیل کاهش شدید نرخ نفوذ حفاری باشد.

در زیرزون ۳ واحد GMU15 دارای بالاترین مقدار نرخ نفوذ است. بیشترین مقاومت تکمحوری و کمترین زاویه اصطکاک متعلق به این واحد است. در میان پارامترهای حفاری کمترین وزن روی مته و مقادیری متوسط گشتاور (نسبت به متوسط زیرزون۳) ثبت شده است. در این حالت نرخ نفوذ بالای این واحد با استفاده از پارامترهای در نظر گرفته شده این تحقیق قابل توجیه نیست و به عوامل دیگری مربوط است.



شکل (۵- ۸). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۳ چاه ۱



شکل (۵- ۹). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زیرزون ۳ چاه ۱
در عمیقترین زون چاه ۱ (زون ۴)، طبق تغییرات پارامترها تحلیلهای مشابه با سایر زونها مشاهده میشوند. به عنوان مثال، اگر GMU18 و GMU20 در نظر گرفته شود (طبق نمودار شکل ۵–۱۰)، پارامترهای مقاومت فشاری تکمحوری و محصور مربوط به GMU18 میانگین نسبی به ترتیب ۳۶ و ۲۴ درصد بیشتر است و پارامتر زاویه اصطکاک GMU20 نسبت به GMU18، ۴ درصد بیشتر تعیین شد. در میان پارامترهای حفاری، وزن روی مته واحد GMU20 به طور نسبی ۶۱ درصد بیشتر اعمال شده است اما میزان گشتاور واحد با مقاومت کمتر و ضریب اصطکاک بیشتر (GMU20)، به همان نسبت بالاتر نمیباشد. در این حالت تناسب افزایش نسبی وزن روی مته و گشتاور در واحد GMU18)، به همان نسبت بالاتر نمیباشد. در این حالت واحد مقاومت کمتر و ضریب اصطکاک بیشتر (GMU20)، به همان نسبت بالاتر نمیباشد. در این حالت تناسب افزایش نسبی وزن روی مته و گشتاور در واحد GMU18) رعایت نشده و در نتیجه نرخ نفوذ حفاری

در مقایسه میان GMU19 و دیگر واحدهای زون ۴ یک شباهت تحلیلی با نواحی چاه قابل مشاهده است. این موضوع مربوط به اعمال پارامترهای حفاری وزن روی مته و گشتاور متناسب با مقدار افزایش ویژگیهای مقاومتی است. در واحد GMU19 پارامتر مقاومت فشاری محصور کمترین میزان را در میان سایر نواحی زون ۴ دارد و پارامتر وزن روی مته و گشتاور بسیار بالاتر از حد متوسط سایر واحدهای مقاومت بالا (حدود CCS = 65-81) در نظرگرفته شده و اثر این موضوع در کاهش نرخ حفاری این واحد مشخص است.



شکل (۵- ۱۱۰). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۴ چاه ۱

۵–۴–۲ چاه شماره ۲

چاه ۲ طبق بررسیها ۴ زون کلی را شامل شده (شکل ۵–۱۵ و ۵–۱۶) و هریک دارای تعدادی واحد ژئومکانیکی است. در زون ۱، سه واحد ژئومکانیکی وجود دارد که در قیاس میان واحدهای GMU1 و GMU3 (طبق نمودار شکل ۵–۱۱)، میانگین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت محصور و زاویه اصطکاک در GMU3 نسبت به GMU1 به ترتیب ۷، ۱۹ و ۲۹ درصد بیشتر است. طبق این خصوصیات دلیل نرخ حفاری بالاتر و روند حفاری مطلوب در GMU3، اعمال وزن روی مته و گشتاور متناسب است. به طوریکه از لحاظ عددی وزن روی مته و گشتاور متوسط به ترتیب ۱۸ و ۳ درصد در این واحد است. به وجود مقاومت و زاویه اصطکاک کمتر) از GMU3 بوده و مبنای کاهش نرخ حفاری در این واحد است. در زون ۱ واحد GMU2 دلیلی روشن برای ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری جهت دستیابی به روند حفاری مثبت و نرخ حفاری مطلوب است. در عمقهای اولیه این واحد (عمق ۳۵۱۵ تا ۳۵۲۳)، مقاومت فشاری سنگ و زاویه اصطکاک کاهش یافته و پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری جهت دستیابی



شکل (۵- ۱۱). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۱ چاه ۲

طبق بررسی زون ۲ چاه ۲ از لحاظ میانگین پارامتر نرخ نفوذ در سه واحد ژئومکانیکی تشکیل شده تفاوت فاحشی ندارد (نمودار شکل ۵–۱۲). تنها اختلاف در ویژگیهای مقاومتی و وزن روی مته است. به طور مثال اگر واحدهای GMU4 و GMU6 به صورت مقایسهای درنظر گرفته شود. GMU6 دارای میانگین پارامترهای مدول الاستیک، مقاومت تکمحوری و زاویه اصطکاک به ترتیب ۲، ۷ و ۵ درصد بیشتر نسبت به GMU4 است. اعمال متناسب پارامترهای عملیاتی وزن روی مته و گشتاور به میزان میانگین به ترتیب ۶ و ۷ درصد بیشتر نسبت به GMU4) شده است. همچنین باید به این موضوع اشاره کرد که روند متناسب کاهش پارامترهای عملیاتی نسبت به پارامترهای ژئومکانیکی در GMU6 سبب جلوگیری از افت شدید نرخ نفوذ شده است.



شکل (۵– ۱۲). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۲ چاه ۲ زون ۳ چاه شماره ۲، در دو واحد GMU7 و GMU8 ویژگیهایی مانند مقاومت تکمحوری و تنش قائم موثر (طبق نمودار ۵–۱۳)، میانگین نسبی GMU8 به ترتیب ۴ و ۱ درصد بیشتر است. در پارامتر دارای روند عکس مقاومت تکمحوری یعنی زاویه اصطکاک، GMU7 نسبت به دیگر واحد ۷ درصد بیشتر میباشد. از طرفی در واحد MU8 پارامترهای وزن روی مته و گشتاور دارای مقادیری متناسب هستند. اما میزان افزایش وزن روی مته و گشتاور سبب کاهش نرخ نفوذ حفاری شده است. این تحلیل لزوم اعمال متناسب وزن روی مته و گشتاور بیشتر در واحدهای دارای مقاومت و زاویه اصطکاک بالا را نشان میدهد. از واحد GMU8 تا انتهای عمق چاه (۳۹۸۴ متر) سرعت چرخش مته افزایش یافته و یک روند متفاوت میان GMU1 تا GMU8 را طی میکند. در بررسیها مشخص است که سرعت چرخش مته در نقاط دارای مقاومت کمتر و زاویه اصطکاک بالاتر، افزایش داشته است. روندهای مقطعی مشخص میکند که اگر افزایش RPM در نقاط مقاومت کمتر همراه با کاهش وزن روی مته باشد، موجب بهبود نرخ حفاری میشود. همچنین در نقاطی که پارامترهای مقاومت فشاری و روندهای مشابه آنها (مدول یانگ و تنش قائم موثر) افزایش و زاویه اصطکاک کاهش یابد، افزایش متناسب سرعت چرخش مته و وزن روی مته سیب افزایش



شکل (۵– ۱۳). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۳ چاه ۲ در زون ۴، واحدهای ژئومکانیکی GMU10 و GMU12 از لحاظ تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری شباهت بالایی در مجموع دارند و اگر به حالت مقایسهای دو واحد دارای بیشترین و کمترین مقاومت و نرخ نفوذ یعنی GMU9 و GMU11 در نظر گرفته شود. طبق تحلیل (نمودار شکل ۵–۱۴) پارامترهای مکانیکی سنگها مدول یانگ و مقاومت تکمحوری در واحد GMU11 به میزان میانگین ۱۵ و ۳۲ درصد و زاویه اصطکاک ۶ درصد بیشتر از مقادیر GMU9 است. پارامترهای حفاری وزن روی مته و گشتاور به طور متناسب در واحد دارای مقاومت بالاتر به اندازه میانگین نسبی ۴۵ و ۴ درصد بیشتر میباشد. این مسائل باعث ثبت نرخ نفوذ ۳۱ درصد بیشتر از OMU9 در GMU11 شده است. همچنین عدم توجه به نیاز گشتاور به طور متناسب بالاتر (ناشی از وزن روی مته) در واحد دارای زاویهی اصطکاک بیشتر (GMU9)، میتواند سبب کاهش نرخ نفوذ این واحد شده باشد.



شکل (۵- ۱۴). نمودار مقایسهای میانگین تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری زون ۴ چاه ۲

ROP (m/h)		WOB (kblf)			RI	PM (rpm)	То	rque (lb	f.ft)		شروع	زون و	
میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	میانگین	بيشينه	كمينه	GMU	عمق	زيرزون
۶/۲	١.	١/٩	۱۰/۲	۱۵	۵	180	١٨١	٨۴	۳۲۶۹	4797	7117	١	300Y	زەن.
۵/۲	۳/۸	۲/۴	٩	14/1	۲/۲	١٧٩	۱۸۰	١٧٧	2978	۳۲۵۰	7871	٢	۳۵۸۷	
۶/۱	٨/١	۲/۸	٩/١	14	۶/۷	١٧٩	۱۷۹/۵	١٧٩	۳۳۴۵	۳۹۸۹	۲۸۱۳	٣	36.7	ا نوز ز
۷/۶	١٣	۴/۲	١٣	۲.	۶	١٧٨	١٧٩	١٧٧	3773	4799	8080	۴	8810	. , ((), ()
۵/٣	۹/۷	٣	۱۳/۹	۲۲	٨/١	١٧٨	١٨١	180	3880	۴۸۰۵	7599	۵	3877	
۶/۶	١٢	٣/٨	14/7	۲۱	۸/۴	۱۷۹	١٨٢	184	۳۸۶۵	4094	81.5	۶	3844	تەن ۲
۴/۱	Υ/٨	۱/۶	١٩	۲۵	۱۵	۱۷۹/۴	۱۸۰	١٧٨	۳۴۹۵	4221	۲۸۳۲	Y	3687	
۵/۱	٩/٩	۲/۴	١٩	۲۳	١٣	۱۸۰	١٨١	١٧٧	۳۶۹۷	4789	۲۵۲۳	٨	3681	
۴/۳	۶/۶	۲/۸	١٩	۲۳	14	١٧٨	١٨١	١٧٧	3787	4497	۲۸۸۷	٩	۳۷۰۰	ز زون ۲
۴/۲	٧/٩	۱/۶	۱۷/۷	74	10/8	171	١٨١	184	3674	4490	۲۳۲۰	١٠	۳۷۱۵	
۴/۵	۹/۲	۲/۲	۱۱	۲.	۵	١٧٩	١٨١	١٧٨	۳۸۰۳	4881	۳۰۸۶	١١	۳۷۵۱	زون ۳
۵/۱	۷/۴	٣/۴	١٢	۱۴/۸	۳/۰/	١٧٧	١٧٩	۱۷۳	8741	477.	8788	١٢	۳۷۸۳	

جدول (۵- ۷). زونبندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

۴/۳	۶/۵	۲/۴	14	74	۹/۵	١٧٩	١٧٩	١٧٧	۳۸۱۳	4.89	۳۸۱۳	١٣	۳۷۹۰	
۴/۳	٩/۴	۲/۲	18	٣٣	١.	۱۷۸/۵	١٧٩	۱۷۸	۳۷۸۱	4808	۳۲۵۸	14	۳۸۰۲	ن ده د
٨/۶	۲۰/۳	۵/۲	۹/۷	١٣	٨	١٧٧	۱۷۸	۱۷۳	۳۷۰۲	41.9	۳۱۸۰	۱۵	۳۸۱۰	۳
٣	۵/۹	١/٩	۱۱/۹	18	٩/۴	۱۷۳	١٧٩	۱۵۲	8880	۴۳۸۳	7788	18	۳۸۱۷	
۲/۲	۲/۵	٢	77	74	١٩	۱۷۹/۶	۱۷۹/۸	۱۷۹	۳۵۸۰	3792	۳۱۹۲	١٧	۳۸۳۳	
۲/۳	٣/۴	١/٧	18	۲۰	٧/٩	١٧٨	۱۸۰	174	۳۴۸۰	8981	8018	١٨	۳۸۳۹	
۲/۵	۶/۴	١/٧	١٢	١٧	۸/۴	١٧٧	۱۷۰	174	۳۵۸۴	4297	۳۰۷۴	١٩	۳۸۵۲	المن الم
۳/۱	۵/۷	۱/۶	٩/٩	۱۶/۹	۶/۳	١٧٧	۱۲۰	۱۷۰	۳۶۲۹	4201	۳۰۸۶	٢٠	۳۸۷۲	
۲/۹	۴/۳	۱/۵	١٨	٣٣	11	۱۷۵	١٨١	١٧١	۳۵۰۵	41.9	۳۰۳۹	۲۱	۳۸۹۱	

جدول (۵– ۸). ادامهی جدول (۵–۷)؛ زونبندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۱

جدول (۵- ۹). زونبندی و پارامترهای حفاری در واحدهای ژئومکانیکی در حالتهای بیشینه، کمینه و میانگین چاه ۲

R	OP (m/	h)	W	OB (klb	of)	RP	'M (rpr	n)	То	rque (lb	f.ft)	GMU	شروع	زونها	
ميانگين	بيشينه	كمينه	ميانگين	بيشينه	کمینه	ميانگين	بيشينه	كمينه	ميانگين	بيشينه	كمينه	ONIC	عمق		
۲/۷	۴/۵	٠/۴	٩/٣	14	۶	١٠٣	١١٩	۷۷	۹۷۵	1771	٨۵٩	١	۳۵۰۱		
٣	٣/٩	٢	٧	٩/١	۴/۳	۱۰۰	118	۹١	۱۰۵۶	1806	٨٩١	٢	3016	زون ۱	
٣/١	۴/۱	۲/۱	٧/٩	٩/۶	۶/۵	٩٩	17.	٨٧	947	११۶	97.	٣	۳۵۳۱		
۲/۳	٣/٧	۰/۹۵	١.	١٢	۷/۳	1 • 1	114	٨٩	١٠٣١	١٣٣٧	۸۹۵	۴	۳۵۵۰		
۲/۳	۴/۲	١	٩/۶	۱۱/۹	۵/۹	1.8	114	٩٨	1	١٣۵٧	۹۲۵	۵	۳۵۸۸	زون ۲	
۲/۲	۶/۳	•/97	٩/۴	١٣	۵/۱	١٠۵	141	٨٧	٩۶۵	1129	٩٠٠	۶	3840		
٢	۲/۸	۱/۴	V/A	٩/۴	۵/۶	۱۳۰	۱۵۰	17.	١٠۵٩	1111	١٠١٨	٧	۳۷۱۰	نەن. ۳	
۲/۴	٣/۴	٦/٣	۶/٨	٨/٩	۴/۲	147	107	١٣٩	١٠٨٢	١٢۵٨	1.22	٨	3771		
۳/۱	۵/۲	١/٨	۶/۹	٩/٩	۲/۸	149	107	140	11	1108	۱۰۵۵	٩	۳۷۸۶		
٣/٢	۵/۴	١/٩	۶/٨	١٢	٢	141	107	۱۳۸	١١٢٩	1842	١٠٧٣	١٠	۳۸۱۶	۲.نمز ۱	
٣/۵	۵	١/٧	١٠	١٢	۵/۷	147	۱۵۳	140	1148	1188	۱۰۸۵	١١	۳۸۷۱		
٣/١	۵/۵	١/٧	٨	۱۰/۹	۴/۷	149	۱۵۷	14.	1184	1700	1.94	١٢	۳۸۸۸		



شکل (۵- ۱۵). تقسیم بندی مشترک میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در تحلیل ها برای چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)



شکل (۵- ۱۶). ادامهی شکل (۵–۱۵)؛ تقسیمبندی مشترک میان پارامترهای ژئومکانیکی و حفاری در تحلیلها برای چاه ۱ (چپ) و چاه ۲ (راست)

۵-۴-۳ تعیین محدودهی اعمال پارامترهای حفاری با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی در تحلیلهای بخش ۵-۴ به ضرورت اعمال متناسب پارامترهای حفاری وزن روی مته، گشتاور و سرعت چرخش مته طبق تغییرات خصوصیات ژئومکانیکی مقاومت تکمحوری، مقاومت محصور، زاویه اصطکاک، تنش قائم موثر و مدول الاستیک و نیز تاثیر گذاری بر نرخ نفوذ حفاری تاکید شد. در این قسمت بر اساس محاسبات جزئیات بهترین روند نرخ حفاری در هریک از زونها جداول شامل نسبت مقادیر عوامل حفاری برای پارامترهای ژئومکانیکی ارائه شده است. طریقه محاسبه محدودهی پارامتر حفاری به عنوان مثال در زون ۱ چاه ۱: برای مقاومت تکمحوری در وزن روی مته نسبت ۰/۱۸ عنوان شده است. با ایجاد یک نسبت به این صورت عمل می شود که در هر ۱ مگاپاسکال (واحد مقاومت تکمحوری) ۰/۱۸ وزن روی مته (با واحد klbf) اعمال متناسب در زون ۱ محسوب می شود، حال برای ۵۰ مگایاسکال چه میزان وزن روی مته نیاز است؟ پاسخ: ۱klbf و مورد نیاز می باشد. حال برای پارامترهای ژئومکانیکی دیگر همانند وزن روی مته، نسبت تعیین می شود و محدودهی آن در زون ۱ مشخص می گردد. با محاسبه سایر پارامترهای حفاری گشتاور و سرعت چرخش مته می توان محدودهی نرخ حفاری را طبق جداول (۵-۱۰)، (۵-۱۱) و (۵-۱۲) به طور نسبی تعیین کرد. واحدهای پارامترهای جداول مشابه واحدهای جداول (۵-۴) تا (۵-۹) است.

.///	.///	۸۱/۰ ۷۱/۰	CCS	
. / ۲ ۳	. / ٣ 1	• / \ \	UCS	В
./۴٩	۰۵۱	• /٣٣	angle	0
٠/١٩	۰/۱۸	•/14	Stress	N
۰/۵۸	٠/۵٣	۰/۴۵	Е	
۵1/۰۳	57/5	24/5	CCS	u
4/45	۶۲/۳	۵۸/۷	UCS	q
144/4	141	1.4	angle	r
54/0	۹/۱۵	۴۷/۳	Stress	0
۱۵۸/۹	104/4	۱۴۵/۸	Е	Т
۲/۳۷	۲/۵۱	۶۸/۶	CCS	
7	۲/۹۸	۲/۹۷	UCS	Ζ
ک/لح	٧/٠٣	۵/۲۵	angle	P
4/49	۲/۴۸	४/४१	Stress	R
٨/٨ ف	۶۳/۷	٧/٣٧	Е	
۰/۰۸	•/1	•/\	CCS	
•/11	٠/١٢	•/11	UCS	Р
•/٣٣	٠/٣	۰/۱۹	angle	0
۰/۰۹	•/\	٠/٠٩	Stress	R
۰/۲۷	۰/٣١	۰/۲۷	Е	
7	زیر زون ۱	1	زون و زير زا	ون

جدول (۵- ۱۰). مقادیر نسبی اعمال متناسب پارامترهای حفاری با توجه به ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی چاه ۱

•/۴	•/۴۲	۰/۷۹	۰/۲۷	٧/٠٨	۲۶/۰۴	γ٠/۵	149/11	۵۱	7.4	٣/٧٣	4/٩۵	٧/٣	۲/۵	1./.4	۰/۰٩	۰/۰٩	۰/۱۷	۶۰/۰	•/74	زير زون ۲
۰/۲	۰/۲۵	۰/۴۵	۶۱/۰	./24	6412	۷۸/۲	۱۳۹/۷	۵. •	197/1	۲/۹۷	٣/٧١	45/5	۲/۴	٩/٣۵	۰/۰۸	•/1	٩//٠	۰/۰۷	۰/۲۷	7
٠/١٣	۶//۶	۰/۳۸	۰/۱۲	٠/۴١	27/4	<i>4</i> /4	188/2	44	۱۵۸	۲/۵۱	۶ ۰/۸	۷/۰۱	۲/۳۵	ν۵٧	۰/۱۲	۰/۱۵	٠/٣۴	•/11	۰/۳۷	زیر زون ۳
۰/۱۵	۰/۲	۶,۸	٠/١٣	۰/۵۲	۵۵/۱	8/9A	۱۳/۱	۶/۸۶	19.	43/2	٣/۶٩	3/5	ዮ/ሞዮ	٩/٣١	۰/۰۴	۶۰/۰	•/11	۰/۰۴	۶۱/۰	-16

جدول (۵– ۱۱). ادامهی جدول (۵–۱۰)؛ مقادیر نسبی اعمال متناسب پارامترهای حفاری با توجه به ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی چاه ۱

جدول (۵- ۱۲). مقادیر نسبی اعمال متناسب پارامترهای حفاری با توجه به ارتباط با پارامترهای ژئومکانیکی چاه ۲

	В	0	8		u	q	r	0	T		Ζ	P	R			P	0	R		
CCS	UCS	angle	Stress	E	CCS	UCS	angle	Stress	E	CCS	UCS	angle	Stress	E	CCS	UCS	angle	Stress	E	زون
۰/۰۷	•/11	۰/۱۵	•/11	۰/۲۷	٩/٣	14/21	۱۷/۹۹	14/11	347/1	٠/٩٧	۱/۳۸	٨٩/١	١/٣٧	۳/۳۵	۰/۰۳	•/•۴	۶۰/۰	•/•۴	•/1	١
•/11	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۳۷	11/84	۱۵/۷۳	2/2X	١٣/٧	۳۸/۵	١/٣٣	<i>۶۶</i> /۱	۲/۸۱	۱/۴۵	۴/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۳	۶./۰	۰/۰۳	۰/۰۹	٢
۰/۰۸	•/1	•/44	۰/۰۹	•/74	17/98	۵۸/۵	ሞለ/ሞ	14/14	۲ ۸/۶	١/٧٧	۲/۱۷	D/TV	1/94	5/11	۰/۰۲	•/•٣	۰/۰۸	۰/۰۳	·/· \	7
•/1	۰/۱۳	۰/٣١	۰/۱۲	•/٣٣	17/85	12/21	71817	14/01	٣٧/٨	1/84	۲/۰۳	¥/۷۲	٩//١	¥۱۹۲	٠/٠٣	•/• 4	•/11	•/• 4	•/11	-16

۵–۵– جمعبندی

با بررسی کلی تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل حفاری، روندهای مشترک و تاثیر گذاری متقابل مشاهده می شود. در این فصل تحلیل های جزئی این تغییرات و اشتراکات انجام شد. در هر قسمت تحلیل های

مربوطه با جداول، اشکال و نمودارها همراه شده است. ابتدا زون بندی چاههای مورد مطالعه بر پایهی تحقیقات ییشین، ویژگیهای چینه شناسی، سنگ شناسی، نگارهای پتروفیزیکی و پارامترهای ژئومکانیکی انجام گرفت. بنابراین چاه شماره ۱ به ۴ زون و ۳ زیرزون و نیز چاه شماره ۲ به ۴ زون تقسیم شدند. جهت تحلیلهای با جزئیات بیشتر از روشی متداول یعنی تفکیک هریک از زونها به واحدهای ژئومکانیکی (GMU) بهره گرفته شد. بر اساس نگارهای چاه و پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره ۱ به ۲۱ و چاه شماره ۲ به ۱۲ واحد ژئومکانیکی تفکیک شدند. ویژگیهای هریک از واحدها بر طبق نگارها و پارامترهای ژئومکانیکی بیان شده است. در ادامه روند مشترک و تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل حفاری در اعماق مشابه مورد بررسی قرار گرفت. طبق تحلیلهای صورت گرفته بر اساس نمودارها، می توان اشاره کرد که تناسب یا عدم تناسب میان مقادیر عوامل حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی نمونهای از تاثیرپذیری متقابل این دو بخش است. به عنوان نمونه در واحدهایی که دارای پارامترهای مقاومتی (UCS و CCS) نسبی بالاتر هستند، اعمال متناسب وزن روی مته و گشتاور نسبی بیشتر بر کیفیت عملیات حفاری و نرخ نفوذ حفاری (به عنوان شاخصی از عملکرد مناسب حفاری) تاثیر گذار است. همچنین اگر مقادیر وزن روی مته و گشتاور طبق تحلیلها با توجه به تغییرات زاویهی اصطکاک انجام شود، روند ROP مناسب تری حاصل می شود. در ادامه فصل، ضرایب پارامترهای ژئومکانیکی نسبت به عوامل حفاری با جداول (۵-۱۰ تا ۵-۱۲) مطرح شده است. با استفاده از تناسب مطرح در جداول مذکور و با شناخت از محدودهی پارامترهای ژئومکانیکی می توان محدودهی متناسب عوامل حفاری را تشخیص داد. این تحلیلها در هر بخش در کنار جداول مطرح شده می تواند به عنوان نکات مهم و راهبردی جهت اعمال مناسب پارامترهای حفاری در هریک از سازندهای مورد مطالعه این تحقیق باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

عملیات حفاری با توجه به ماهیت و ویژگیهای موثر بر آن، بسیار پیچیده است. این عملیات و پارامترهای تاثیر گذار به تصمیم گیری متخصصین حفاری در تعیین مقادیر، ویژگیهای مکانیکی ثابت (همانند نوع مته و قطر چاه) و نیز خصوصیات ژئومکانیکی وابسته است. بنابراین در بررسیهای عملیات حفاری می بایست به عوامل انسانی، ویژگیهای مکانیکی/هیدرولیکی سیستم حفاری و در نهایت خصوصیات سازند توجه شود. در این تحقیق تلاش گردید تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی سازند بر مهمترین پارامترهای عملیاتی حفاری مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، اطلاعات دو چاه مورد مطالعه –که در مخازن نفتی آسماری و سروک حفر شده اند- تحلیل شد. این دو چاه، به ترتیب با استفاده از متههای PDC با ابعاد ۱۲/۲۵ و ۶/۱۲۵ اینچ حفر شدهاند. خصوصيات ژئومكانيكي مقاومت فشاري تكمحوري، مدول الاستيك، مقاومت فشاري محصور، زاویهی اصطکاک داخلی و تنش قائم موثر، با ساخت مدل ژئومکانیکی یکبعدی چاهها، تعیین شد. در تحقیقات گذشته، ارتباط میان مقاومت فشاری تکمحوری سنگ با نرخ نفوذ حفاری بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته بود. اما در تحقیق حاضر، علاوه بر دو پارامتر مذکور، به طور گستردهتر به ارتباط و تاثیر گذاری دیگر پارامترها مانند مقاومت فشاری محصور، زاویهی اصطکاک داخلی، مدول الاستیک و تنش قائم موثر بر پارامترهای حفاری مانند وزن روی مته و گشتاور اعمال شده بر مته مورد توجه قرار گرفته است. جزئیات نتایج حاصله، در سه بخش ذیل عنوان می گردد:

الف: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

پارامترهای ژئومکانیکی بر اساس مدلسازی ژئومکانیکی یکبعدی چاهها، تخمین، کالیبره و صحتسنجی شدند. بر این اساس از میان روابط متعدد تخمین پارامترها، روابط تجربی موجود برای سنگ مخزن مورد مطالعه (مخازن کربناته جنوب کشور) انتخاب شد. به دلیل محدودیت دسترسی به برخی اطلاعات مورد نیاز روند مدلسازی، از نتایج آزمایشات چاههای مجاور نیز بهره گرفته شد. بر اساس نتایج مدلسازی ژئومکانیکی یکبعدی میتوان موارد ذیل را عنوان کرد:

- بررسیهای معیارهای شکست نشان میدهند که مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاههای مورد مطالعه شرایط ژئومکانیکی را تشریح می کنند. بنابراین از خصوصیات ژئومکانیکی حاصل می توان برای تحلیلهای ژئومکانیکی سازندهای آسماری و سروک در مناطق دیگر بهره گرفت.
- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از مدلسازی ژئومکانیکی امکان کنترل روند عملیات حفاری و
 کاهش مخاطرات آن را فراهم میکند، به طوریکه در این تحقیق نحوهی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی
 حاصل از مدل بر پارامترهای عملیاتی و به طور کلی دسترسی به حفاری موثر مشخص شد.
 ب: روشهای آماری و هوشمند

در بخش تحلیلهای آماری و هوشمند، از روش احتمالاتی شبکههای بیزین استفاده شد. این روش برای فرایندهای دارای متغیرهای متعدد و وابسته مناسب است. برای آموزش، روش الگوریتم K2 (جزء قدرتمندترین ابزار در آموزش شبکههای بیزین) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در تحلیلی دیگر از مدلهای شبکههای عصبی بهره گرفته شد. تمایز مدلهای مطرح بر پایهی شبکههای عصبی با مطالعات گذشته، در نظر گرفتن گسترهی وسیعی از پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل حفاری است. در ارتباط با نتایج الگوریتم K2 و شبکههای عصبی نکات زیر قابل اشاره میباشند:

- استفاده از شبکهی بیزین با الگوریتم K2 در تعیین ارتباط میان ویژگیهای ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی حفاری در حالت چند متغیره و نیز تشخیص متغیرهای موثر کارایی خوبی برخوردار است.
- با توجه به نتایج گرافهای حاصل از الگوریتم K2 در چاههای مورد مطالعه (سازندهای مخزنی آسماری و سروک)، تاثیر مستقیم و غیرمستقیم پارامترها به این ترتیب است: در سازند آسماری پارامتر ROP در اولویت اول متاثر از مقاومت تکمحوری، مدول الاستیک و تنش قائم موثر میباشد و متغیرهای زاویه

اصطکاک و مقاومت محصور به طور غیرمستقیم بر آن اثر گذاراند. همچنین وزن روی مته و گشتاور تحت تاثیر زاویه اصطکاک و تنش قائم موثر میباشند و از میان پارامترها، پارامترهای مقاومت تکمحوری و مدول الاستیک بیشترین اثر را بر سرعت چرخش مته دارند. در سازند سروک پارامترهای اصلی تاثیر گذار و دارای اهمیت بالاتر بر نرخ حفاری شامل مقاومت تکمحوری، مدول الاستیک و تنش قائم موثر هستند و دیگر عوامل حفاری وزن روی مته، سرعت چرخش مته و گشتاور در نمودارهای ترسیمی متاثر از زاویه اصطکاک و تنش قائم موثر نشان داده شدهاند.

در مدلسازیهای شبکههای عصبی برای عوامل حفاری با ورودی شامل پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل حفاری، میانگین ضریب همبستگی در حالت کل برابر ۲۷۵۰ است. در نتایج نموداری ارتباط میان پارامترها به این صورت میباشند: نرخ حفاری: تنش قائم موثر و زاویه اصطکاک؛ وزن روی مته: مدول الاستیک و تنش قائم موثر؛ سرعت چرخش مته: مقاومت تکمحوری، تنش قائم موثر و زاویه اصطکاک؛ وزن روی مته: مدول ملاستیک و تنش قائم موثر، با انتخاب مناسب عوامل عملیاتی حفاری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی و عوامل

در بخش تفکیک واحدهای ژئومکانیکی، ابتدا بر پایهی مطالعات گذشته، چینهشناسی، سنگشناسی، نگارهای پتروفیزیکی و پارامترهای ژئومکانیکی چاههای مورد مطالعه، زونبندی تعیین شد. سپس بر طبق تغییرات نگارهای پتروفیزیکی و خصوصیات ژئومکانیکی به صورت جزئی واحدهای ژئومکانیکی تفکیک شد. در ارتباط با تفکیک واحدهای ژئومکانیکی و تحلیلها نتایج زیر را می توان اشاره کرد:

 جزئیات نحوهی تفکیک واحدهای ژئومکانیکی، مقادیر (بیشینه و کمینه) و میانگین پارامتر با نمایش به صورت شکل و نمودار در چاههای مورد مطالعه مشخص شده است. از منابع و تحلیلهای مذکور می توان برای تشخیص واحدها در سازندهای آسماری و سروک و نیز میادین دیگر با سازندهای مشابه بهره برد.

- در نقاط با تجربه حفاری قبلی ناچیز و یا عدم آگاهی از شرایط ژئومکانیکی، همواره هزینهها و مشکلات مرتبط با حفاری بیشتر است. طبق تحلیلها در زونها و واحدهای مختلف چاههای مورد مطالعه میدان مارون مقادیر متناسب (یا نامتناسب) افزایش یا کاهش عوامل حفاری وزن روی مته، گشتاور و سرعت چرخش مته در مقابل تغییرات مقاومت تکمحوری، مدول الاستیک، تنش قائم موثر و مقاومت محصور بر روی مسائلی همچون کیفیت عملیات حفاری، کاهش یا افزایش ROP موثر است. همچنین ارتباطی میان مقادیر گشتاور و زاویه اصطکاک مشاهده می شود که به وسیلهی مقادیر عوامل عملیاتی (وزن روی مته و گشتاور) قابل کنترل می باشند. بدیهی است که تاثیرات مذکور به طور وابسته بر هزینههای مرتبط حفاری اثر گذار است.
- بر پایهی تحلیلهای انجام گرفته در این تحقیق برای هریک از زونهای چاههای مورد مطالعه و قابل استفاده در سایر نقاط سازندهای آسماری و سروک، جداول پیشنهادی ارائه شده است. جداول مذکور جهت تخمین اولیه مقادیر قابل اعمال پارامترهای حفاری (با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی سازند) بکار میروند. همچنین با تشخیص زونبندیهای مطرح در چاههای مشابه حفر شده در سازندهای آسماری و سروک و استفاده از ضرایب نسبی جداول پیشنهادی میتواند به عنوان یک سری راهکار جهت جلوگیری از غافلگیری در اثر تغییر ویژگیهای ژئومکانیکی و بهبود روند حفاری برای متخصصین ژئومکانیک و حفاری مدنظر قرار گیرد.
- در تعدادی از موارد، روشهای تحلیلی توجیهی برای واحدهای ژئومکانیکی دارای نرخ نفوذ حفاری بالا ارائه نمی کند. در این شرایط امکان نقش پارامترهایی مانند چگالی شکستگیهای سنگها وجود دارد. در تحقیق حاضر تاثیر شکستگیها به علت عدم دسترسی به اطلاعات، لحاظ نشده است. به طور کلی با مقایسه میان روشهای گوناگون تعیین ارتباط میان پارامترهای تاثیر گذار بر عملیات حفاری، روش الگوریتم K2 و روش تحلیلی بر اساس واحدهای ژئومکانیکی دارای نتایج مشابهی هستند و می توان

از نتایج مشترک این روشها، برای انتخاب درست حدود پارامترهای حفاری (مبتنی بر خصوصیات ژئومکانیکی) استفاده کرد.

- ۲-۶ پیشنهادها
- در این تحقیق، تخمین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی انجام شده است. در صورت استفاده از آزمایشهای مکانیکسنگ، اندازه گیری مقادیر تنش، استفاده از نگارهای سرعت عبور موج برشی در جهات گوناگون و آزمایشهای درون چاهی، میزان عدمقطعیت در دادههای مدل ژئومکانیکی کاهش یافته و میزان دقت نتایج بهبود مییابد.
- روشهای گوناگونی جهت آموزش شبکههای بیزین در علوم مهندسی مطرح هستند. پیشنهاد می شود
 از سایر روشهای نوین آموزش شبکههای احتمالاتی، برای تعیین ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی
 و عوامل حفاری استفاده شود.
- راهکار استفاده از شبکههای عصبی برای تعیین مقادیر پارامترهای حفاری با استفاده از ورودیهای محدود، به مدلهایی با ضرایب همبستگی بالا منجر شده است. در حالت واقعی تعداد پارامترهای اثرگذار، بسیار بیشتر است که بخشی از پارامترهای مذکور، در این تحقیق به عنوان ورودی در نظر گرفته شد. بنابراین استفاده از روشهای ترکیبی و بهینهسازی شبکههای عصبی، جهت افزایش ضرایب همبستگی برای تعداد پارامترهای ورودی بیشتر و نزدیک به واقعیت پیشنهاد می شود.
- نتایج حاصل از این تحقیق، بر اساس تحلیل دادههای دو چاه میدان مارون حاصل شده است. با توجه به تحلیلهای صورت گرفته، ارتباط میان پارامترهای حفاری و ژئومکانیکی به خوبی مشاهده میشود.
 بنابراین پیشنهاد میشود این تحلیلها برای تعداد چاههای بیشتر، سازندهای مخزنی متنوعتر و با در نظر گرفتن ویژگی چگالی شکستکیهای سنگها انجام شود.

منابع:

اصانلو، م.، (۱۳۷۵). "ر*وشهای حفاری*"، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا، تهران، ص ۴۹۴. پاکدامن، ع.، (۱۳۸۰). "مطالعه زمینشناسی مخزن فوقانی میدان مارون"، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب.

رضایی تبار، و.، سلیمی، س.، (۱۳۹۵). "یادگیری ساختاری شبکهی بیزی با به کار گیری پوشش مار کوفی در الگوریتم K2"، اندیشهی آماری، سال بیست و یکم، شمارهی اول، بهار و تابستان ۱۳۹۵، شماره پیاپی ۴۱، ص ۱۲.

رمضی، ح.ر.، (۱۳۸۵). "*چاه پیمایی*"، چاپ دوم، انتشارات صنم، تهران، ص ۲۷۴.

رنجبر، خ، تخمچی، ب.، قوامی ریابی، ر.، مرادزاده، ع.، (۱۳۹۳). " انتخاب متغیرهای موثر در برآورد تخلخل با استفاده از تعیین ضریب همبستگی و روش شبکه بیزی"، اولین همایش ذخیرهسازی زیرزمینی نفت و گاز، دانشگاه تهران، ۳۰ و ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۳.

قلی پور. ع.م، و حقی، ع.، (۱۳۶۸). "مطالعه جامع سازند آسماری میدان مارون"، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب.

قنوانی، ک.، (۱۳۷۹). "مطالعه تکمیلی زمین شناسی مخزن بنگستان میدان مارون"، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.

گزارش تجزیه و تحلیل ساختمانی میدان مارون، (۱۳۸۷)، شرکت ملی نفت ایران، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب.

مطیعی، ه.، (۱۳۷۲). "*زمین شناسی ایران: چینه شناسی زاگرس*"، سازمان زمین شناسی کشور.

نوروزی، س.، (۱۳۹۳). پایاننامه ارشد: " بررسی تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ مخزن بر روی نرخ نفوذ حفاری در یکی از میادین نفتی شرکت مهندسی توسعه نفت (متن)"، دانشکدهی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abbas, A.K., Rushdi, S. and Alsaba, M., (2018). "Modeling rate of penetration for deviated Wells using artificial neural Network". In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Afsari, M., Amani, M., Razmgir, S.A.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". In *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.

Akgun, F., (2002). "Drilling Variables At Technical Limit Of Drilling Rate". In *Canadian International Petroleum Conference*. Petroleum Society of Canada.

Al-Ajmi, A.M. and Zimmerman, R.W., (2005). "Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3), pp.431-439.

Amani, A. and Shahbazi, K., (2013). "Prediction of rock strength using drilling data and sonic logs". *International Journal of Computer Applications*, 81(2).

Ameen, M.S., Smart, B.G., Somerville, J.M., 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*, *26*(4), pp.430-444.

Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., Molaghab, A. and Mohammadian, A., (2018). "Development of a new rock drillability index for oil and gas reservoir rocks using punch penetration test". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *166*, pp.131-145.

Artymiuk, J., (2006). "A new concept drilling hoisting systems rigs". Acta Montanistica

Slovaca. Kosice, Rocnik, 11(1).

Asef, M.R. and Najibi, A.R., (2013). "The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio". *Geophysics*, 78(3), pp.D135-D142.

Atajeromavwo, E.J. and Akinyokun, O.C., (2018). "Impact of Drilling Parameters on Depth of Oil Well in Monitoring and Control System". *Current Journal of Applied Science and Technology*, pp.1-10.

Atashbari, V. and Tingay, M.R., (2012). "Pore pressure prediction in carbonate reservoirs". In *SPE Latin America and Caribbean petroleum engineering conference*. Society of Petroleum Engineers.

Azadpour, M., Manaman, N.S., Kadkhodaie-Ilkhchi, A. and Sedghipour, M.R., (2015). "Pore pressure prediction and modeling using well-logging data in one of the gas fields in south of Iran". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *128*, pp.15-23.

Bataee, M., Kamyab, M. and Ashena, R., (2010). "Investigation of various ROP models and

optimization of drilling parameters for PDC and roller-cone bits in shadegan oil field". In

International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Society of Petroleum

Engineers.

Bielstein, J. and Cannon, G.E., (1950). "Factors Affecting the Rate of Penetration of Rock Bits". *Drilling and Production Practice*, *61*(4).

Bourgoyne Jr, A.T. and Young Jr, F.S., (1974). "A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection". *Society of Petroleum Engineers Journal*, *14*(04), pp.371-384.

Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. and Young, F.S., (1986). "Applied

Drilling Engineering (SPE Textbook Series, Vol. 2)". Society of Petroleum Engineers,

Richardson, TX.

Bowers, G. L., (1995). "Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction", *SPE Drill*, Complet. 89-95.

Calhoun, W. and Ewy, R., (2005). "New Confined Compressive Strength Calculation Improves Bit Selection and Bit Performance". Paper AADE-05-NTCE-61 Presented at AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition, 5e7.

Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., (1985). "Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks". *Geophysics*, 50(4), pp.571-581.

Castagna, J.P., Batzle, M.L., Kan, T.K. and Backus, M.M., (1993). "Rock physics—The link between rock properties and AVO response". *Offset-dependent reflectivity*—*Theory and practice of AVO analysis: SEG*, 8, pp.135-171.

Chang, C., Zoback, M.D. and Khaksar, A., (2006). "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3-4), pp.223-237.

Christaras, B., Mariolakos, I., Foundoulis, J., Athanasias, S. and Dimitriou, A., (1997). "Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece". In Proceedings of the 6th international symposium conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes (pp. 125-132).

Cooper, G.F. and Herskovits, E., (1991). "A Bayesian method for constructing Bayesian belief networks from databases". In *Uncertainty Proceedings 1991* (pp. 86-94). Morgan Kaufmann.

Doguc, O. and Ramirez-Marquez, J.E., (2009). "A generic method for estimating system reliability using Bayesian networks". *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), pp.542-550.

Donoso, H.G., (2016). Master thesis, "Sensitivity analysis of geomechanical parameters in a two-way coupling reservoir simulation". Faculty of the Graduate School of the Missouri University of Science and Technology.

Dosunmu, A., Odagme, B.S., Fekete, P., Anyanwu, C., Ekeinde, E. and Odusegun, O.C., (2014). "Comparative Analysis of Geomechanical Parameters Using Cores, Sonic and Gamma Ray Logs for Optimal Well Design". In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

E. M. Galle, H. B. Woods. (1963). "Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock

Bits." API Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute.

Eaton, B.A., (1975). "The equation for geopressure prediction from well logs". In *fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers.

Eissa, E.A. and Kazi, A., (1988). "Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(6).

Eren, T., (2010). PhD. Thesis, "Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations". School of Natural and applied sciences, Middle East Technical University.

Ernanda, A.; Primasty, Q.; Akbar, K. A., (2016). "Detecting overpressure using the Eaton and Equivalent Depth methods in Offshore Nova Scotia, Canada", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 132 (2018) 012016, doi: 10/1088/1755-1315/132/1/012016.

Ernst, S., Pastusek, P.E. and Lutes, P.J., (2007). "Effects of RPM and ROP on PDC Bit Steerability". In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Falconer, I.G., Burgess, T.M. and Sheppard, M.C., (1988). "Separating bit and lithology effects from drilling mechanics data". In SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.

Farquhar, R.A., Somerville, J.M. and Smart, B.G.D., (1994). "Porosity as a geomechanical indicator: an application of core and log data and rock mechanics". In *European Petroleum Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Fasheloum, M., (1997). "Investigation of drilling parameters indicators". PhD. Thesis, Department of Mineral Resources Engineering, University of Nottingham.

Fjaer, E., Holt, R.M., Raaen, A.M., Risnes, R. and Horsrud, P., (2008). "*Petroleum related rock mechanics*". (Vol. 53). Elsevier, 2nd Edition, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, the Netherlands.

Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V. and Hanachi, J., (2014). "Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), pp.13-25.

Graham, J.W. and Muench, N.L., (1959). "Analytical determination of optimum bit weight

and rotary speed combinations". In Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of

AIME. Society of Petroleum Engineers.

Gray, G.R. and Young Jr, F.S., (1973). "25 Years of Drilling Technology-A Review of Significant Accomplishments". *Journal of Petroleum Technology*, 25(12), pp.1-347.

Gstalder, S. and Raynal, J., (1966). "Measurement of some mechanical properties of rocks and their relationship to rock drillability". *Journal of Petroleum Technology*, *18*(08), pp.991-996.

Gutierrez, M. and Lewis, R.W., (1998). "The role of geomechanics in reservoir simulation". In *SPE/ISRM rock mechanics in petroleum engineering*. Society of Petroleum Engineers.

Haghnejad. A., Ahangari, K., Noorzad, A., and Minaeian, B., (2013). "Prediction Relations between Physical and Mechanical Properties of Rocks A Case Study of Asmari Formation in Iran." *International Journal of Geosciences Research*, ISSN 1929-2546, 12-19.

Hareland, G. and Hoberock, L.L., (1993). "Use of drilling parameters to predict in-situ stress bounds". In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Hareland, G., Wu, A. and Rashidi, B., (2010). "A drilling rate model for roller cone bits and its application". In *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.

Higgins, S.M., Goodwin, S.A., Bratton, T.R. and Tracy, G.W., (2008). "Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter Shale". In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Hoek, E. and Brown, E.T., (1997). "Practical estimates of rock mass strength". *International journal of rock mechanics and mining sciences*, *34*(8), pp.1165-1186.

Hoseinie, S.H., Aghababaei, H. and Pourrahimian, Y., (2008). "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(1), pp.1-10.

Howarth, D.F., (1987). "The effect of pre-existing microcavities on mechanical rock performance in sedimentary and crystalline rocks". In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 24, No. 4, pp. 223-233). Pergamon.

https://pdgm.com/products/geolog, Geolog 7.1.

https://www.mathworks.com/products/matlab.html, MATLAB Version 2016.2.

https://www.weatherford.com/en/products-and-services/formation-evaluation.

International Energy Outlook, (2018). (IEO2018), for Center for Strategic and International

Studies, Administrator: Dr. Linda Capuano, U.S. Energy Information Administration, July

24, 2018, Washington, DC.

Irawan, S., Rahman, A. and Tunio, S., (2012). "Optimization of weigth on bit during drilling operation based on rate of penetration model". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(12), pp.1690-1695.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W., (2007). "Fundamentals of Rock Mechanics", Fourth edition published 2007 by Black well Publishing Ltd, 475 pp.

Jiménez, J.M.C, Valera Lara, L.C., Rueda, A. and Saavedra Trujillo, N.F., (2007). "Geomechanical wellbore stability modeling of exploratory wells-study case at middle Magdalena Basin". *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, *3*(3), pp.85-102.

Jimeno, C., (1995). "Rock drilling and blasting". *AA Balkema, Rotterdam, Brook field*, pp.8-35.

Judzis, A., Black, A.D., Curry, D.A., Meiners, M.J., Grant, T. and Bland, R.G., (2007). "Optimization of Deep Drilling Performance; Benchmark Testing Drives ROP Improvements for Bits and Drilling Fluids". In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Kahraman, S., (1999). Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 7(36), pp.981-989.

Kidambi, T. and Kumar, G.S., (2016). "Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141, pp.38-51.

Kirsch, C., (1898). "Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre". Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 42, pp.797-807.

Lama, R.D. and Vutukuri, V.S., (1978). "Handbook on mechanical properties of rockstesting techniques and results-volume iii". (Vol. 3, No. 2). Langlo, F., (2014), Master thesis, "Application of reliability centered maintenance on a drilling system". Department of Mechanical and Structural engineering and Material Science, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger.

Liu, Z. and Liu, Y., (2019). "A Bayesian network based method for reliability analysis of subsea blowout preventer control system". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.

Lyons, W. C., & Plisga, G. J. (2004). "Standard handbook of petroleum & natural gas engineering". *Gulf Professional Publishing*.

Maleki, S., Moradzadeh, A., Riabi, R.G., Gholami, R. and Sadeghzadeh, F., (2014). "Prediction of shear wave velocity using empirical correlations and artificial intelligence methods". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, *3*(1), pp.70-81.

Masoudi, P., Tokhmechi, B., Jafari, M.A., Zamanzadeh, S.M. and Sherkati, S., (2012). "Application of Bayesian in determining productive zones by well log data in oil wells". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *94*, pp.47-54.

Maurer, W.C., (1962). "The" perfect-cleaning" theory of rotary drilling". *Journal of Petroleum Technology*, 14(11), pp.1-270.

Mensa-Wilmot, G., Langdon, S.P. and Harjadi, Y., (2010), "Drilling Efficiency and Rate of Penetration: Definitions, Influencing Factors, Relationships, and Value". In *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Mohaghegh, S. and Ameri, S., (1995). "Artificial neural network as a valuable tool for petroleum engineers", SPE Petroleum Computer Conference. *Texas*, 29220, pp.1-6.

Mohammadi Behboud, M., Ramezanzadeh, A. and Tokhmechi, B., (2017). "Studying empirical correlation between drilling specific energy and geo-mechanical parameters in an

oil field in SW Iran". Journal of Mining and Environment, 8(3), pp.393-401.

Monazami, M., Hashemi, A. and Shahbazian, M., (2012). "Drilling rate of penetration

prediction using artificial neural network: a case study of one of Iranian southern oil

fields". J. Oil Gas Bus, 6(6), pp.21-31.

Moore, P. L., (1958), "Five factors that affect drilling rate". Oil and Gas Journal, 6 October.

Moraveji, M.K. and Naderi, M., (2016). "Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *31*, pp.829-841.

Mostofi, M., Rasouli, V. and Mawuli, E., (2011). "An estimation of rock strength using a drilling performance model: A case study in Blacktip field, Australia". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3), p.305.

Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R. and Asef, M.R., (2015). "Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *126*, pp.78-82.

Nawi, N.M., Rehman, M.Z., Aziz, M.A., Herawan, T. and Abawajy, J.H., (2014). "An accelerated particle swarm optimization based Levenberg Marquardt back propagation algorithm". In *International Conference on Neural Information Processing* (pp. 245-253). Springer, Cham.

Nelson, M. M., Illingworth, W. T. (1991). "A Practical Guide to Neural Nets", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Nguyen, J.P., (1996). "Drilling: oil and gas field development techniques". Editions Technip.

Niedermayer, D., (2008). "An introduction to Bayesian networks and their contemporary applications". In *Innovations in Bayesian networks* (pp. 117-130). Springer, Berlin, Heidelberg.

Nourozi Bezminabadi, S., Ramezanzadeh, A., Jalali, S.M.E., Tokhmechi, B. and Roustaei,

A., (2017). "Effect of rock properties on ROP modeling using statistical and intelligent

methods: a case study of an oil well in southwest of Iran". Archives of Mining Sciences, 62(1),

pp.131-144.

Lomax, R.G. and Schumacker, R.E., (2004). "A beginner's guide to structural equation modeling". psychology press.

O'Connell, S.C., (1994). "Geological history of the Peace River Arch in Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin", Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council.

Omdal, K., (2015), Master thesis, "Development of procedure and analysis of hard rock drilling". Faculty of Science and Technology, University of Stavanger.

Onyia, E.C., (1988). "Relationships between formation strength, drilling strength, and electric log properties". In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Ozbayoglu, M.E. and Omurlu, C., 2005, "Minimization of Drilling Cost by Optimization of the Drilling Parameters". In *15th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey* (pp. 11-13).

Pearl, J. (2009). "*Bayesian Networks*". Cognitive Systems Laboratory, Computer Science Department, University of California. ftp://ftp.cs.ucla.edu/pub/stat_ ser/R246.ps, Retrieved 1 december 2009.

Pearl, J., (1988). "Probabilistic Reasoning in Expert Systems: Networks of Plausible Reasoning".

Peng, S. and Zhang, J., (2007). "*Engineering geology for underground rocks*". Springer Science & Business Media.

Plumb, R.A., (1994). "Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks". In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.

Prasad, U., (2009). "Drillability of a rock in terms of its physico-mechanical and microstructural properties". In 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Rampersad, P.R., Hareland, G. and Boonyapaluk, P., (1994). "Drilling optimization using drilling data and available technology". In *SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.

Rastegar, M., Hareland, G., Nygaard, R. and Bashari, A., (2008), "Optimization of multiple

bit runs based on ROP models and cost equation: a new methodology applied for one of the

Persian Gulf carbonate fields". In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference

and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Santarelli, F.J., Dusseault, M.B. and Yassir, N.A., (1991). "Estimating Rock Mechanics Properties in Petroleum Engineering Practice: Problem Statement". *Report of the ISRM/SPE Joint Commission on Rock Properties for Petroleum Engineers*.

Sare, A.R., Alvarellos, J., Villarroel, F.M., Ward, C., Vazquez, L.A. and Aguilera, L.F.N., (2012). "A Geomechanical Approach to Reduce Drilling Time". In *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.

Schlumberger Wireline Services Catalog, (2015). 3750 Briarpark Drive, Houston, Texas, Website: <u>www.slb.com</u>.

Shi, X., Meng, Y., Li, G., Li, J., Tao, Z. and Wei, S., (2015). "Confined compressive strength model of rock for drilling optimization". Southwest Petroleum University. *Production and hosting by Elsevier*, *1*(1), pp.40-45.

Skaugen, E., (2011). Master thesis, "Drilling introduction", Stavanger, Norway: university of Stavanger.

Smorodinov, M. I., Motovilov, E. A. and Volkov, V. A., (1970). "Determination of Correlation Relationships Between Strength and Some Physical Characteristics of Rocks,"

Proceeding of the Second Congress of the Int. Soc. for Rock Mech., Beograd, September 21-26.

Speers, R.G., (1978). "The Geology of the Bangestan Reservoir, Marun Field", report No. p-3541, oil Service company of Iran Exploitation Geology Division.

Terzaghi, K., 1951. "Theoretical soil mechanics". Chapman and Hall, Limited; London, United Kingdom.

Van Hung, N., Hao, L.P., Gerbaud, L., Souchal, R., Urbanczyk, C., Fouchard, C., (2015). "Penetration rate of rotary-percussive drilling". *Petrovietnam Journal*, Petroleum exploration & production, Vol 6/2015.

Walker, B.H., Black, A.D., Klauber, W.P., Little, T. and Khodaverdian, M., (1986), "Roller-

bit penetration rate response as a function of rock properties and well depth". In SPE Annual

Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Wardlaw, H.W.R., (1969). "Drilling performance optimization and identification of overpressure formations". In *Drilling and Rock Mechanics Symposium*. Society of Petroleum Engineers.

Warren, T.M., (1984). "Factors affecting torque for a roller cone bit". *Journal of petroleum technology*, *36*(09), pp.1-500.

Warren, T.M., (1987). "Penetration rate performance of roller cone bits". SPE Drilling Engineering, 2(01), pp.9-18.

Yamamoto, K., (2003). "Implementation of the extended leak-off test in deep wells in Japan". In Sugawra, K. (Ed.), Proceedings of the *Third International Symposium on Rock Stress*. Rotterdam, Balkema, PP. 225-229.

Yasar, E. and Erdogan, Y., (2004). "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *41*(5), pp.871-875.

Yılmaz, S., Demircioglu, C. and Akin, S., (2002). "Application of artificial neural networks to optimum bit selection". *Computers & Geosciences*, 28(2), pp.261-269.

Zhang, J., (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, *108*(1-2), pp.50-63.

Zhang, Q., Li, Z., Zhou, C.J. and Wei, X.P., (2013). "Bayesian network structure learning based on the chaotic particle swarm optimization algorithm". *Genetics and Molecular Research*, *12*(4), pp.4468-4479.

Zhu, M. and Liu, S., (2012). "A decomposition algorithm for learning bayesian networks based on scoring function". *Journal of Applied Mathematics*, 2012.

Zoback, M.D., (2007). "*Reservoir Geomechanics*". Cambridge University Press, United Kingdom, First published 2007, ISBN-978-0-521-77069-9.

Zoback, M.D., (2010). "Reservoir Geomechanics". Cambridge University Press, Business & Economics.

Abstract

The impact of various factors on the process of drilling operations in the oil and gas industry has been identified. Among these factors, the role of two general categories, geomechanical properties and operational parameters in the drilling studies are considered and very essential. The geomechanical section is defined in relation to the mechanical and environmental properties of rocks and another part affected by the application of drilling equipment. Detecting the relationship between geomechanical and drilling factors can play a vital role in improving drilling performance and reducing associated costs. In this research, using intelligent and statistical methods, two wells in Maroon oil field in southwest of Iran have been investigated.

In this way, first, one-dimensional geomechanical models of the wells in two reservoirs Asmari and Sarvak has been made. Then based on synchronization of data obtained from the geomechanical model and the drilling information, two algorithmic methods were used. The K2 algorithm method by Bayesian networks show direct and indirect relationships between the geomechanical parameters and each of the drilling factors with graphs. Also, training Artificial Neural Networks (ANN) with Multi-Layer Perceptron (MLP) method was used for modeling of drilling factors and its results are shown as analytical charts of the effect of geomechanical properties. The K2 results show a direct relationship between the Unconfined Compressive Strength (UCS) on the drilling Rate of Penetration (ROP) and the internal friction angle on the torque and Weight on Bit (WOB). The MLP results show, for example, in Asmari and Sarvak, respectively, the internal friction angle and UCS are the most effective on Revolutions per Minute (RPM) drilling bit. In another part of the study, geomechanical features in each well zones are investigated along with the drilling parameters and the results are presented in the form of comparative diagrams for Geomechanical Units (GMUs). The analyzes exposed the relationship between the inappropriate application of drilling parameters such as WOB and torque with respect to geomechanical parameters. Using proper or improper geomechanical parameters represent in ROP and with these results, proposed new tables for reservoir zones.

Keywords:

Geomechanical properties, operation parameters, 1-D geomechanical model, bayesian networks, K2 algorithm, Multi-Layer Perceptron (MLP) method, Geomechanical Units (GMU).



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

Impact of reservoir Geomechanical properties on drilling operating parameters

in one of Iran's south west oilfields

By:

Mohammad Reza Delavar Khoshkelat

supervisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh Adviser: Dr. Behzad Tokhmechi

June 2019