



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک

عنوان:

بررسی تاثیر پارامترهای حفاری بر نرخ نفوذ مته در روش حفاری با هوا در یکی از میادین نفتی ایران

دانشجو:

بهروز باغبانی

اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده

دکتر علی نخعی

استاد مشاور:

دکتر رضا روکی

پایان نامه کارشناسی ارشد جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

شهریور ۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای بهروز باغبانی رشته مهندسی نفت گرایش حفاری و بهره‌برداری تحت عنوان بررسی تاثیر پارامترهای حفاری بر نرخ نفوذ مته در روش حفاری با هوا در یکی از میادین نفتی ایران که در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: ۱۸-۷۵) امتیاز نسبتی ()
 مردود دفاع مجدد امتیاز نسبتی ()

۱- عالی (۲۰-۱۹) ۲- بسیار خوب (۹۹-۱۸)

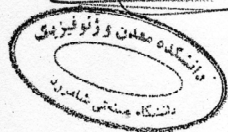
۳- خوب (۹۹-۱۷) ۴- قابل قبول (۹۹-۱۵-۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر علی مرادزاده	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر علی نخعی	۲- استاد راهنما
	دانشیار	دکتر ابوالقاسم کامکار	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مهرداد سلیمانی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر محمود نوروزی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: دکتر رضا قوامی ریایی

امضاء



**این پایان نامه با حمایت و پشتیبانی پژوهش و توسعه
شرکت نفت مناطق مرکزی ایران اجرا شده است**

تقدیم

به پدر فداکار و مادر دلسوزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خود گذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین
روزگاران بهترین پشتیبان است
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در
پناهمان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

قدردانی

سپاس پروردگار متعال را که در سایه‌ی رحمت بی‌کرانش فرصت تحصیل و دانش‌اندوزی نصیبم شد. در ابتدا وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ و خالصانه‌ی اساتید راهنمای فرهیخته و بزرگوارم، جناب استاد علی مرادزاده و دکتر علی نخعی و مشاور محترم جناب آقای دکتر رضا روکی که مرا از راهنمایی‌های ارزشمند خود بهره‌مند ساختند، صمیمانه تشکر نمایم. از خانواده عزیزم که همیشه پشتوانه و تکیه‌گاه من بودند و با تحمل سختی‌ها راه را بر من هموار نمودند سپاسگزارم.

در پایان مراتب سپاس خود را نسبت به

جناب آقای مهندس حمیدرضا عباسی مشاور صنعتی پروژه،

و همگی مهندسين بزرگوار در شرکت نفت مناطق مرکزی به ویژه جناب آقای مهندس رفعتی،

مهندس طاهری دهلری و خانم مهندس ایروانیان که بدون همکاری آنها انجام این تحقیق میسر نبود، ابراز

می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **بهروز باغبانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت- حفاری و بهره‌برداری دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " بررسی تاثیر پارامترهای حفاری بر نرخ نفوذ مته در روش حفاری با هوا در یکی از میادین نفتی ایران" تحت راهنمایی دکتر علی مرادزاده و دکتر علی نخعی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای 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 .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

هدف هر عملیات حفاری، حفاری کردن در زمان کوتاه و یا هزینه کمتر همراه با ایمنی در عملیات است. مفهوم زمان برای هر عملیات حفاری را می‌توان با نرخ نفوذ مته (ROP) بیان کرد. پارامترهای زیادی بر روی سرعت حفاری تأثیر دارند که در صورت یافتن ارتباط بین این پارامترها و سرعت حفاری می‌توان به مدلی جهت بهینه‌سازی عملیات حفاری دست پیدا کرد.

در حوضه زاگرس جنوبی سازندها تا عمق ۳۰۰۰ متری دارای شکستگی و تخلخل فراوان هستند و به علت هرزروی فراوان گل، حفاری با هوا و کف انجام می‌گیرد. در این مطالعه هدف اصلی بر این است تا رابطه بین پارامترهای مکانیکی (وزن روی مته، سرعت دوران مته)، پارامترهای هیدرولیکی (دبی هوای تزریقی و سیال تزریقی به همراه مواد کف‌زا) و پارامترهای محیطی (سختی سازند و عمق) در حفاری با کف برای پیش‌بینی و رسیدن به بیشترین سرعت حفاری بدست آید. جهت رسیدن به هدف از داده‌های ۲ حلقه چاه (شماره ۶ و ۱۰) میدان شانول واقع در حوضه زاگرس جنوبی استفاده شده است. نرخ بهینه هوای تزریقی برای حفاری با کف و هوا جهت کاهش مشکلات با استفاده از نرم‌افزار هیدرولیک حفاری با هوا محاسبه شد که در این راستا میزان بهینه حجم تزریقی هوا برای حفاری با کف بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ CFM بدست آمد. در ادامه از توانمندیهای شبکه عصبی برای ایجاد مدلی جهت پیش‌بینی سرعت حفاری با داشتن پارامترهای مختلف استفاده شد و مشاهده گردید که مدل ارائه شده دارای دقت و برازش قابل قبول بر داده‌ها است. سپس از این مدل در طراحی آزمایشات جهت پیش‌بینی سرعت حفاری برای حالت‌های گوناگون طراحی شده در نرم‌افزار MiniTab و ایجاد رابطه ساده‌تر بین پارامترهای تأثیرگذار با نرخ نفوذ مته استفاده شد. در نهایت تأثیر پارامترهای حفاری با کف بر روی سرعت حفاری در حفره‌های ۲۶، ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ اینچی در دو چاه مورد مطالعه بررسی و مشخص شد که سرعت چرخش مته و عمق بیشترین و کمترین تأثیر را بر سرعت حفاری دارند. همچنین بهترین ترکیب پارامترهای قابل کنترل برای بهینه‌سازی سرعت حفاری تعیین گردید و با توجه به ترکیب حالات مختلف مشاهده شد که با افزایش عمق چنانچه از وزن روی مته و سرعت چرخش مته کمتری استفاده گردد با افزایش پارامترهای هیدرولیکی می‌توان به بیشترین سرعت حفاری دست یافت.

کلید واژه: سرعت حفاری، پارامترهای حفاری، حفاری با کف و هوا، طراحی آزمایشات، شبکه عصبی

فهرست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بررسی تاثیر پارامترهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ مته با استفاده از آنالیز فاکتوریال، کنفرانس و

نمایشگاه تخصصی نفت، شماره ۹۳۹۵، ۲۴-۲۶ اردیبهشت ۹۲

۲- تخمین سرعت حفاری با سیال کف با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی رگرسیون عمومی،

همایش مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالا دستی، ۱۹ اردیبهشت، ۱۳۹۲

فهرست مطالب

۱	فصل اول : کلیات
۱-۱	مقدمه
۲-۱	تشریح مسئله
۳-۱	فرضیه‌ها و سوالات تحقیق
۴-۱	هدف مطالعه و روش تحقیق
۵-۱	ساختار پایان‌نامه
۷	فصل دوم : انواع سیالات حفاری و بررسی سوابق حفاری با هوا
۱-۲	مقدمه
۲-۲	طبقه بندی سیالات حفاری
۱-۲-۲	سیالات پایه نفتی
۲-۲-۲	سیالات پایه آبی
۳-۲-۲	سیالات پایه گازی
۳-۲	مجموعه‌های حفاری با هوا
۱-۳-۲	حفاری با هوای خشک
۲-۳-۲	حفاری با هوای مرطوب
۳-۳-۲	حفاری با کف
۴-۳-۲	حفاری با گل هوازده
۴-۲	مقایسه بین گل حفاری و سیالات پایه گازی
۵-۲	کف
۱-۵-۲	کیفیت کف
۲-۵-۲	رئولوژی کف
۶-۲	انتقال خرده‌ها
۷-۲	عوامل موثر بر سرعت حفاری
۱-۷-۲	خصوصیات سازند/ سنگ

۲۵.....	۲-۷-۲ عوامل مکانیکی
۲۵.....	۱-۲-۷-۲ وزن روی مته
۲۷.....	۲-۲-۷-۲ سرعت دوران مته
۲۷.....	۳-۲-۷-۲ نوع مته
۲۹.....	۳-۷-۲ خصوصیات سیال حفاری
۲۹.....	۴-۷-۲ عوامل هیدرولیکی
۳۰.....	۸-۲ مروری بر مطالعات گذشته
۳۰.....	۱-۸-۲ مطالعات گذشته حفاری با هوا
۳۲.....	۲-۸-۲ مطالعات گذشته حفاری با کف
۳۴.....	۳-۸-۲ مطالعات گذشته مدل حفاری
۳۹.....	۹-۲ معرفی میدان مورد مطالعه
۴۵.....	فصل سوم: معرفی روشهای طراحی آزمایشات مورد استفاده
۴۶.....	۱-۳ مقدمه
۴۶.....	۲-۳ طراحی آزمایشات
۴۷.....	۳-۳ دلایل استفاده از طراحی آزمایشات
۴۸.....	۴-۳ مراحل طراحی یک آزمایش
۵۰.....	۱-۴-۳ درک و بیان مسئله
۵۰.....	۲-۴-۳ تعیین متغیر پاسخ
۵۰.....	۳-۴-۳ انتخاب عاملها و سطوح
۵۱.....	۴-۴-۳ انتخاب نوع آزمایش طراحی شده
۵۱.....	۵-۴-۳ انجام آزمایش
۵۱.....	۶-۴-۳ تجزیه و تحلیل دادهها
۵۱.....	۷-۴-۳ تعیین اعتبار نتایج
۵۲.....	۵-۳ انواع روش طراحی آزمایشات
۵۲.....	۱-۵-۳ طراحی فاکتوریال
۵۲.....	۱-۱-۵-۳ طراحی کامل فاکتوریال

۵۴.....	۲-۵-۳ طراحی سطح پاسخ
۵۷.....	فصل چهارم : هیدرولیک حفاری با هوا و انجام محاسبات لازم
۵۸.....	۱-۴ مقدمه
۵۸.....	۲-۴ سیال و هیدرولیک حفاری
۶۱.....	۳-۴ مبانی نظری نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا
۶۳.....	۱-۳-۴ ساختار کلی فرمولی سیالات تراکم پذیر
۶۵.....	۴-۴ شرح بکارگیری نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا
۷۶.....	فصل پنجم : پیش بینی سرعت حفاری به کمک شبکه عصبی مصنوعی رگرسیون شعاعی
۷۷.....	۱-۵ مقدمه
۷۷.....	۲-۵ جمع آوری داده و ایجاد بانک اطلاعاتی
۷۸.....	۱-۲-۵ پارامترهای ورودی
۷۹.....	۲-۲-۵ پارامتر خروجی یا پاسخ شبکه
۷۹.....	۳-۵ پیش بینی سرعت حفاری با شبکه عصبی
۸۶.....	فصل ششم : مدل سازی نرخ نفوذ مته در حفاری با کف بکمک روش طراحی آزمایشات
۸۷.....	۱-۶ مقدمه
۸۷.....	۲-۶ طراحی سطح پاسخ (باکس - بنکن)
۹۶.....	۳-۶ تفسیر آنالیز واریانس
۹۸.....	۴-۶ تعیین اعتبار نتایج طراحی آزمایش
۹۸.....	۱-۴-۶ آنالیز باقی مانده ها
۱۰۳.....	۵-۶ طراحی فاکتوریل
۱۰۴.....	۶-۶ بررسی تأثیر پارامترهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ مته
۱۰۴.....	۱-۶-۶ اثرات منفرد (اصلی)
۱۰۹.....	۲-۶-۶ اثرات متقابل پارامترها
۱۱۷.....	۷-۶ بهینه سازی سرعت حفاری
۱۲۵.....	فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۷ نتیجه گیری ۱۲۶

۲-۷ پیشنهادات ۱۲۷

منابع ۱۲۸

پیوست الف ۱۳۲

فهرست اشکال

- شکل ۲-۱ تقسیم بندی سیالات حفاری ۹
- شکل ۲-۲ تجهیزات عملیاتی مورد نیاز حفاری با هوا و کف ۱۱
- شکل ۲-۳ تفاوت ساختاری کف و هوای مرطوب ۱۵
- شکل ۲-۴ مقایسه انواع سیال حفاری و تأثیر آن بر سرعت حفاری ۱۶
- شکل ۲-۵ مقایسه انواع سیال حفاری در پتانسیل جلوگیری از آسیب سازند ۱۷
- شکل ۲-۶ مقایسه انواع سیال حفاری در قابلیت جلوگیری از هرزروی ۱۷
- شکل ۲-۷ مقایسه انواع سیال حفاری در کنترل فشار منفذی ۱۸
- شکل ۲-۸ مقایسه انواع سیال حفاری در کنترل آب سازندی ۱۸
- شکل ۲-۹ توانایی انتقال خرده‌های بزرگ توسط کف در مقایسه با هوای مرطوب ۲۳
- شکل ۲-۱۰ تأثیر وزن روی مته بر سرعت حفاری ۲۶
- شکل ۲-۱۱ طبقه بندی انواع مته ۲۸
- شکل ۲-۱۲ چینه‌شناسی و سازندهای میدان شانول ۴۰
- شکل ۳-۱ فرایند مطالعه طراحی آزمایشات ۴۷
- شکل ۳-۲ فلوجارت روش طراحی آزمایش‌ها ۴۹
- شکل ۳-۳ طراحی باکس- بنکن سه عامل در سه سطح ۵۵
- شکل ۴-۱ مقایسه سرعت سیال حفاری و دانسیته انرژی جنبشی در فضای حلقوی در عملیات های حفاری با گل و هوا ۶۱
- شکل ۴-۲ مقایسه نمودار دانسیته سیال حفاری در فضای حلقوی و داخل رشته حفاری بین عملیات های حفاری با گل و هوا ۶۳
- شکل ۴-۳ شماتیک گردش مستقیم گل ۶۴
- شکل ۴-۴ شماتیک حفرات چاه شماره ۶ شانول ۶۶
- شکل ۴-۵ نمودار انرژی جنبشی در دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی CFM ۵۹۰۰ ۶۷
- شکل ۴-۶ نمودار انرژی جنبشی در دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی CFM ۶۹۰۰ ۶۹

- شکل ۵-۱ ساختار شبکه عصبی رگسیون عمومی ۸۰
- شکل ۵-۲ نمای کلی از شبکه عصبی رگسیون عمومی و بخشی از لایه پنهان آن ۸۲
- شکل ۵-۳ سرعت حفاری اندازه گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده های آموزش ۸۳
- شکل ۵-۴ سرعت حفاری اندازه گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده های اعتبارسنجی ۸۴
- شکل ۵-۵ سرعت حفاری اندازه گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده های تست (آزمایش) ۸۴
- شکل ۶-۱ نمودار هیستوگرام مقادیر باقی مانده طراحی باکس- بنکن ۹۹
- شکل ۶-۲ نمودار احتمال توزیع داده های باقی مانده طراحی باکس- بنکن ۱۰۰
- شکل ۶-۳ نمودار باقی مانده در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده ۱۰۱
- شکل ۶-۴ نمودار باقی مانده بر حسب ترتیب حالات مشاهده آزمایش شده ۱۰۲
- شکل ۶-۵ تاثیر پارامتر عمق بر سرعت حفاری ۱۰۵
- شکل ۶-۶ تاثیر پارامتر وزن روی مته بر سرعت حفاری ۱۰۶
- شکل ۶-۷ تاثیر پارامتر سرعت چرخش مته بر سرعت حفاری ۱۰۶
- شکل ۶-۸ تاثیر پارامتر دبی سیال تزریقی بر سرعت حفاری ۱۰۷
- شکل ۶-۹ تاثیر پارامتر دبی هوای تزریقی بر سرعت حفاری ۱۰۸
- شکل ۶-۱۰ تاثیر پارامتر فرسایش دندان مته بر سرعت حفاری ۱۰۸
- شکل ۶-۱۱ تاثیر پارامتر سختی سازند بر سرعت حفاری ۱۰۹
- شکل ۶-۱۲ تاثیر اثرات متقابل (الف) عمق و وزن روی مته، (ب) عمق و دبی تزریقی سیال، (ج) عمق و سختی سنگ، (د) وزن روی مته و دبی تزریقی سیال، (ه) وزن روی مته و سختی سنگ، (و) دبی تزریقی سیال و سختی سنگ بر سرعت حفاری ۱۱۰
- شکل ۶-۱۳ تاثیر اثرات متقابل پارامترهای (الف) وزن روی مته و سرعت دوران، (ب) وزن روی مته و دبی تزریق هوا، (ج) وزن روی مته و فرسایش مته، (د) سرعت دوران مته و دبی تزریق هوا، (ه) سرعت دوران مته و فرسایش مته، (و) دبی تزریق هوا و فرسایش مته بر سرعت حفاری ۱۱۲

- شکل ۶- ۱۴ تاثیر اثرات متقابل پارامترهای (الف) سرعت دوران و دبی تزریق سیال، (ب) سرعت دوران و سختی سنگ، (ج) دبی تزریق سیال و دبی تزریق هوا، (د) دبی تزریق سیال و فرسایش مته، (ه) دبی تزریق هوا و سختی سنگ، (و) فرسایش مته و سختی سنگ بر سرعت حفاری ۱۱۴
- شکل ۶- ۱۵ چگونگی تاثیر پارامترهای اصلی بر سرعت حفاری ۱۱۷
- شکل ۶- ۱۶ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل حالت اول (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی سنگ در سطح پایین قرار گیرند) ۱۱۸
- شکل ۶- ۱۷ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت دوم (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی سازند در سطح متوسط (خطوط قائم قرمز) قرار گیرند) ۱۲۰
- شکل ۶- ۱۸ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت سوم (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی سازند در سطح بالا قرار گیرند) ۱۲۱
- شکل ۶- ۱۹ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت چهارم (حالتی که سطح دو پارامتر عمق و سختی سازند بالا بوده ولی سطح فرسایش مته پائین است) ۱۲۳
- شکل الف- ۱ مته‌ی تیغه ثابت ۱۳۲
- شکل الف- ۲ نمونه‌ای از مته‌ی دکمه‌ای و دندان‌های (غلتکی) ۱۳۲

فهرست جداول

- جدول ۲-۱ ترکیب کف فشرده ۲۰
- جدول ۲-۲ ترکیب کف پایدار ۲۱
- جدول ۲-۳ فاکتورهای مطرح شده موثر بر نرخ نفوذ مته ۲۴
- جدول ۲-۴ پارامترها و نمونه داده چاه‌های ۶ و ۱۰ میدان شانول ۴۴
- جدول ۴-۱ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی ۵۹۰۰CFM ۶۸
- جدول ۴-۲ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی ۶۹۰۰CFM ۷۰
- جدول ۴-۳ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۲۶ اینچ با حجم هوای تزریقی ۵۰۰۰CFM ۷۲
- جدول ۴-۴ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۲۶ اینچ با حجم هوای تزریقی CFM ۱۶۰۰ ۷۳
- جدول ۴-۵ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۲/۲۵ اینچی با حجم هوای تزریقی ۶۰۰۰CFM ۷۴
- جدول ۴-۶ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۲/۲۵ اینچی با حجم هوای تزریقی ۱۲۰۰CFM ۷۴
- جدول ۵-۱ میزان سختی معرفی شده برای سازندهای میدان شانول ۷۹
- جدول ۵-۲ مقادیر ضرایب همبستگی (R) و جذر میانگین مربعات خطا (RMS) با فاکتورهای تعدیلی متفاوت در دو سری داده آموزش و آزمایش ۸۱
- جدول ۶-۱ سطح تعیین شده پارامترها جهت طراحی به روش باکس-بنکن ۸۷
- جدول ۶-۲ نمونه حالات طراحی شده به روش باکس-بنکن و سرعت حفاری پیش‌بینی شده از شبکه عصبی ۸۸
- جدول ۶-۳ نوع مدل طراحی سطح پاسخ توسط نرم‌افزار مینی‌تب ۸۹
- جدول ۶-۴ تخمین ضرایب رگرسیون در واحد نرم‌الایز شده طراحی باکس-بنکن ۹۱

- جدول ۶-۵ آنالیز واریانس برای طراحی باکس - بنکن ۹۴
- جدول ۶-۶ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت اول ۱۱۹
- جدول ۶-۷ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت اول در چاه ۶ شانول ۱۱۹
- جدول ۶-۸ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت دوم ۱۲۰
- جدول ۶-۹ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت دوم در چاه ۶ شانول ۱۲۱
- جدول ۶-۱۰ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت سوم ۱۲۲
- جدول ۶-۱۱ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت سوم در چاه ۶ شانول ۱۲۴
- جدول ۶-۱۲ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت سوم در چاه ۶ شانول ۱۲۴

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر به خاطر هزینه و مشکلات عملیاتی در میدان‌های نفتی و گازی، شرکت‌های عملیاتی بر کار کردن مؤثرتر و بکارگیری تکنیک‌های مختلف حفاری تاکید دارند. انتخاب تکنیک‌های مختلف حفاری یکی از راهکارهای افزایش دادن سرعت حفاری و کاهش هزینه‌های نهایی چاه‌های حفاری می‌باشد. استفاده از هوا و دیگر گازهای فشرده به عنوان سیال حفاری برای انتقال خرده‌های حفاری شده به سطح که به وسیله مته در ته چاه ایجاد شده‌اند، یکی از این روشها می‌باشد. هوا یا دیگر گازهای فشرده می‌توانند به تنهایی استفاده شوند یا می‌توان آنها را با یک سیال تراکم‌ناپذیر مثل آب همراه با افزودنی‌های مناسب به درون چاه تزریق کرد. سه نوع کاربرد عملیاتی برای این تکنولوژی وجود دارد: عملیات حفاری با هوا یا گاز (استفاده از هوا یا گاز فشرده شده به عنوان سیال حفاری)، عملیات حفاری گل‌هوازده^۱ (استفاده از هوا یا گاز فشرده شده مخلوط با یک سیال تراکم‌ناپذیر) و عملیات حفاری کف پایدار^۲ (استفاده از هوا و یا گاز با یک سیال تراکم‌ناپذیر برای ایجاد یک کف پیوسته سیال حفاری) (William, 2009). در فصل‌های بعدی به معرفی و کاربرد هر یک از این ترکیبات پرداخته می‌شود. در صورت استفاده از روش حفاری با هوا در سازندهای متخلخل و دارای شکستگی می‌توان سرعت حفاری را بیشتر و عمر مفید مته را طولانی‌تر ساخت، هرزروی گل را بهتر کنترل کرد، مغزه‌های تمیزتری گرفت و بر لایه‌های کم فشار مراقبت بیشتر و مؤثرتری اعمال نمود.

حفاری با هوا و گاز در اواخر دهه ۱۹۴۰ آغاز شد ولی به دلیل شکست‌های اولیه این روش جدید، رکودی نسبتاً طولانی در به کارگیری آن به وجود آمد. در اواخر دهه ۱۹۶۰ دوباره کاربرد آن گسترش یافت زیرا در لایه‌هایی که پایداری آن‌ها کم است و با جذب آب ریزش می‌کنند، حفاری با هوا نه تنها نتیجه‌ای عالی دارد بلکه با این روش می‌توان سریع‌تر حفاری کرده و تعداد مته‌ی کمتری هم استفاده کرد. سرعت حفاری در سازندهای شیلی با این روش تا ۹۰ فوت در دقیقه هم گزارش شده است (آریان‌پور، ۱۳۶۸). روش حفاری با هوا در ایران از سال ۱۹۷۰ و بوسیله شرکت‌های خارجی در منطقه کنگان مورد استفاده قرار گرفته شد (آریان‌پور، ۱۳۶۸). روش حفاری با هوا و کف از سال ۱۳۷۴ با حفر

1- Aerated Drilling Operation

2- Stable Foam Drilling Operation

چاه شماره ۱ به عنوان مخزن گازی دهرم در میدان شانول مورد استفاده قرار گرفت. علی رغم تمهیدات اندیشیده شده مشکلاتی همچون تعیین بهینه حجم تزریقی سیال و حجم تزریقی هوا در مورد حفاری با هوا و کف و همچنین رفع گیر لوله حفاری در این میدان وجود دارد.

۲-۱ تشریح مسئله

حفاری با هوا (کف) در جاهایی که سازند دارای شکستگی و تخلخل بالا است و هرزروی گل زیاد است می‌تواند راندمان حفاری را افزایش و هزینه مربوطه را کاهش دهد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در این پایان‌نامه که میدان گازی شانول در حوضه زاگرس جنوبی است نیز در همین گروه سازندها قرار می‌گیرد از این روش استفاده شده است. با توجه به شکستگی و تخلخل فراوان در سازندهای موجود این میدان برای حفاری چند چاه تا عمق حدود ۳۰۰۰ متر از روش حفاری با هوا و کف در سه قطر حفاری (در عمق‌های مختلف) استفاده شد که از آنها به عنوان حفره ۲۶، ۱۷/۵، ۱۲/۲۵ اینچی یاد می‌شود. با توجه به اینکه تکنولوژی حفاری با هوا و زیر گروه‌های آن همچون کف سرعت حفاری را تا ۲ برابر از زمانی که از سیالات مرسوم حفاری (پایه نفتی و پایه آبی) استفاده می‌شود، افزایش می‌دهد ولی با این حال در بسیاری موارد به کارگیری نامناسب پارامترهای حفاری، به خصوص پارامترهای هیدرولیکی (دبی هوای تزریقی و دبی سیال تزریقی)، بطور مثال دبی‌های بیش از حد هوا و آب باعث به وجود آمدن مشکلاتی از قبیل تمیزسازی ضعیف چاه و گیر لوله‌ها و افزایش گشتاور می‌شود که سرعت حفاری را کاهش می‌دهد. بنابراین به یک حداقل دبی برای تزریق سیال و هوا مورد نیاز است تا علاوه بر جلوگیری از مشکلات ذکر شده به سرعت حفاری بیشتری دست یابیم. همچنین یکی دیگر از مشکلاتی که در حفاری با کف وجود دارد عدم شناخت کافی از پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت حفاری و چگونگی تغییر آنها با یکدیگر است که بایستی در طراحی برنامه حفاری به دقت مورد مطالعه قرار گیرند.

۳-۱ فرضیه‌ها و سوالات تحقیق

فرضیاتی که برای این تحقیق به کار برده شده است:

- مته و وسایل درون‌چاهی مورد استفاده برای سازند حفاری شده به طور مناسب انتخاب شده است.
 - سازندهای حفاری شده از لحاظ سختی و خصوصیت سازندی همگن فرض شده‌اند. اما با توجه به تقسیم‌بندی سازندهای حوضه زاگرس جنوبی توسط شرکت شولومبرژه هر سازند به صورت عددی بر اساس عمق و مقیاس بندی نگارهای چاه تقسیم بندی‌هایی صورت گرفت.
 - سورفکتانت (عامل کف زا) و سیال تزریقی استاندارد هستند.
 - سیستم حفاری به صورت باز است و سیال حفاری (کف) بعد از چرخش در سیستم به بیرون هدایت می‌شود و حفاری فرو تعادلی^۱ نداریم.
- سوالات اصلی که در این مطالعه قرار است به آنها پاسخ داده شود :
- مقدار حجم هوای بهینه تزریقی در سیستم حفاری با هوا و کف چیست؟
 - چگونه می‌توان عمده مشکلات موجود در میدان شانول را رفع کرد؟
 - پارامترهای موثر بر سرعت حفاری در سیستم حفاری با کف کدامند؟
 - نوع ارتباط پارامترهای موثر با سرعت حفاری چگونه است؟
 - بهترین ترکیب پارامترهای قابل کنترل برای دستیابی به سرعت حفاری بهینه چیست؟

1- Underbalanced Drilling (UBD)

۴-۱ هدف مطالعه و روش تحقیق

هدف از این مطالعه مدل سازی و ایجاد رابطه بین پارامترهای حفاری با کف و سرعت حفاری جهت شناخت تأثیر پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر نرخ نفوذ مته و همچنین بدست آوردن میزان دقیق حجم هوای تزریقی (CFM¹) در حفاری با هوا و کف برای دست یافتن به حداکثر سرعت حفاری در راستای کاهش مشکلات میدان شانول، یکی از میدان های زاگرس جنوبی است.

جهت نیل به هدف ابتدا بایستی بانک اطلاعات مربوط تشکیل شود به همین منظور داده های موجود از چاه های حفاری شده شماره ۶ و ۱۰ در میدان شانول واقع در حوضه زاگرس جنوبی از طریق گزارش های روزانه حفاری استخراج شده است. این داده ها شامل سرعت حفاری و پارامترهای مکانیکی، هیدرولیکی و محیطی می باشند که در بعضی موارد با توجه به خطاهای انسانی نیاز به تصحیح دارند. پس از تصحیح و حذف داده های غلط پایگاه داده ها ایجاد می شود. در ادامه از نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا (طاهری دهلری، ۱۳۹۱) برای محاسبات هیدرولیکی لازم جهت تعیین حجم هوای تزریقی مناسب برای حفاری با هوا و کف استفاده می نمایم. سپس با مطالعه در زمینه روش های محاسباتی هوشمند، از شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش بینی نرخ نفوذ مته برای حالت های گوناگون طراحی شده در طراحی آزمایشات استفاده می شود. پس از آموزش و تست شبکه با داده های دو چاه ۶ و ۱۰ شانول توسط نرم افزار Matlab (2009) Matlab با روش طراحی آزمایشات در نرم افزار Minitab (2012) Minitab به ایجاد و طراحی مناسب پایگاه داده های واقعی پرداخته و با استفاده از مدل ایجاد شده توسط شبکه عصبی، نرخ نفوذ برای حالت های مختلف طراحی پیش بینی می شود. سپس به تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای موثر بر سرعت حفاری و بدست آوردن رابطه بین آنها با استفاده از نرم افزار مینی تب پرداخته و در نهایت با بدست آوردن بهترین ترکیب پارامترهای قابل کنترل، سرعت حفاری بهینه می شود.

1- Cubic Foot per Minute (CFM)

۵-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۷ فصل ارائه می شود. فصل اول، مقدمه و هدف از انجام این مطالعه را بیان می کند. فصل دوم مختصری از تعاریف کلی و مروری بر مطالعات گذشته را شامل خواهد شد. در فصل سوم به معرفی روش طراحی آزمایشات خواهیم پرداخت. فصل چهارم محاسبات لازم برای هیدرولیک حفاری با هوا در راستای کاهش مشکلات ذکر شده را در بر دارد و در فصل پنجم به ایجاد مدل حفاری با شبکه عصبی و پیش بینی سرعت حفاری با استفاده از این شبکه می پردازیم. در ادامه در فصل ششم مدل سازی نرخ نفوذ مته با کمک طراحی آزمایشات انجام می شود و علاوه بر آن به بررسی پارامترهای موثر بر سرعت حفاری و همچنین بهینه کردن سرعت حفاری پرداخته می شود. در فصل آخر نیز نتیجه گیری و پیشنهادات را خواهیم داشت.

فصل دوم

انواع سیالات حفاری و بررسی سوابق حفاری باهوا

۲-۱ مقدمه

هوا، نهایی‌ترین و سبک‌ترین ماده ایست که به عنوان یک سیال حفاری سبک وزن از آن استفاده می‌شود. این سیال ممکن است به صورت فاز پیوسته مثل هوای خشک و یا اینکه به صورت فاز غیرپیوسته (پراکنده) مثل سیال کف به کار گرفته شود. لذا حفاری با هوا می‌تواند میزان و سرعت حفاری را بیشتر و عمر مفید مته را طولانی‌تر سازد. همچنین هرزروی گل را بهتر کنترل کند، مغزه‌های تمیزتری گرفت و بر لایه‌های کم‌فشار مخزنی مراقبت بیشتر و موثرتری اعمال نمود. هوا به دلیل داشتن وزن سبک نسبت به فشارهای عمودی و محوری موجود در سازندهایی که مته در آنها در حال بریدن است با ایجاد یک فشار معکوس قابلیت حفر سنگ‌ها را افزایش می‌دهد بدین معنی که مته قادر خواهد بود آسانتر برش و خرد شدن سنگ را انجام دهد. امروزه تنها دلیل عدم استفاده از تکنیک حفاری با هوا غالباً عدم شناخت کامل از آن می‌باشد.

در این فصل ابتدا درباره انواع سیالات حفاری بحث می‌شود و سپس تعاریفی از زیر مجموعه‌های حفاری با هوا خواهیم داشت. در ادامه به مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه حفاری با هوا و کف و مدل‌های حفاری خواهیم پرداخت و در نهایت به معرفی مختصر میدان مورد مطالعه می‌پردازیم.

۲-۲ طبقه بندی سیالات حفاری

استفاده از آب به عنوان سیال حفاری به قرن سوم برمی‌گردد. پس از آن انواع مختلفی از سیالات استفاده شده است که شامل: هوا، گاز طبیعی، هوای مرطوب^۱، کف^۲ و شکل‌های مختلف نفت طبیعی و مصنوعی می‌شود. انتخاب سیال حفاری برای یک چاه مشخص بر اساس فاکتورهای مختلفی مثل خصوصیات و تراکم سازندی که حفاری می‌شود، فشار و دمای سازند، پیش‌بینی مشکلات حفاری و حتی منبع و کیفیت سیال و مواد استفاده شده در ساخت آن سیال است. همه این موارد طبقه‌بندی سیالات حفاری را پیچیده می‌کند با این حال امکان ایجاد طبقه‌بندی‌هایی بر اساس فاز پیوسته سیال و ترکیبات استفاده شده در ساخت سیال وجود دارد (Bourgoyne et al., 1991).

1 - Mist

2- Foam

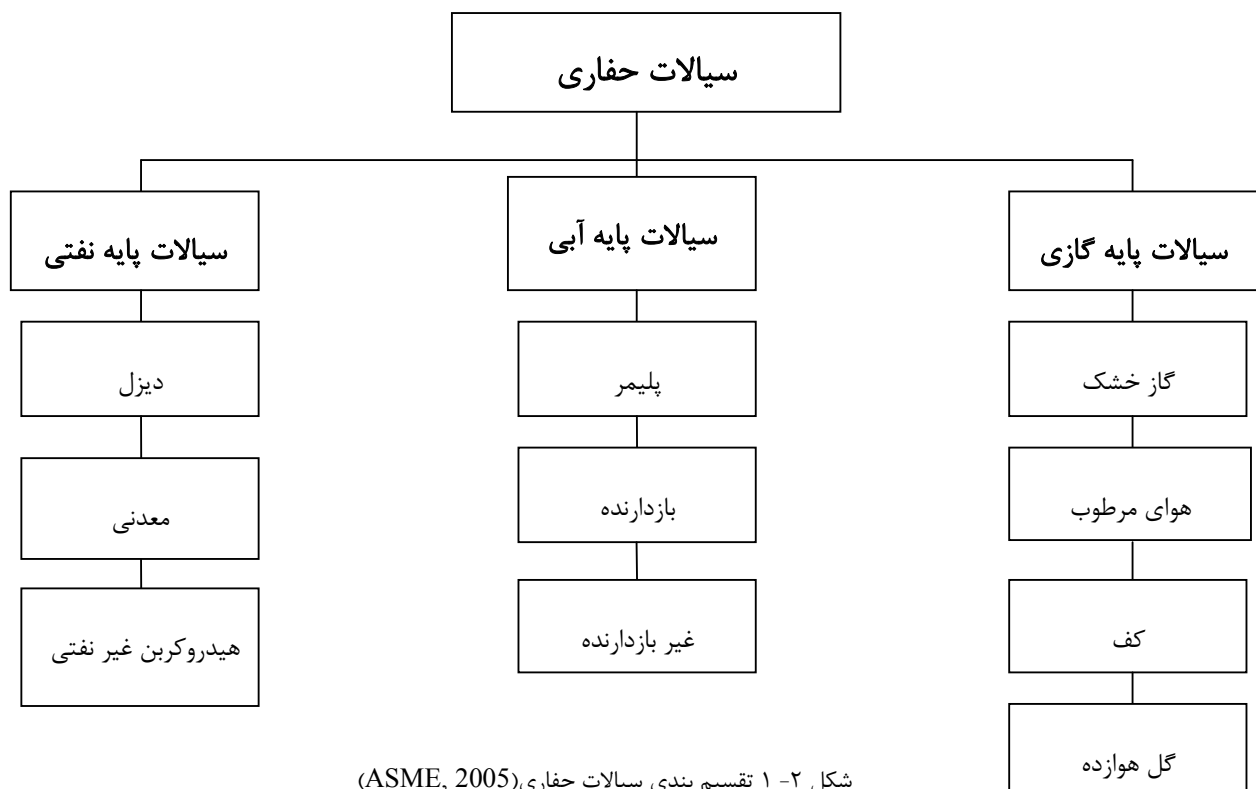
بر این اساس سه نوع طبقه‌بندی برای سیالات حفاری وجود دارد:

سیالات پایه نفتی

سیالات پایه آبی

سیالات پایه گازی

در شکل (۱-۲) طبقه‌بندی سیالات حفاری مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲-۱ تقسیم بندی سیالات حفاری (ASME, 2005)

۱-۲-۲ سیالات پایه نفتی

استفاده از سیالات پایه نفتی در ابتدا برای حفاری شیل‌ها و توسعه پایداری چاه می‌باشد. همچنین در حفاری جهت‌دار و یا برای کاربردهای مخصوصی مثل چاه‌های با دما و فشار بالا و کم کردن آسیب

سازندگی^۱ انتخاب می‌شوند. دلیل انتخاب سیالات پایه نفتی مقاومت در برابر آلاینده‌هایی مثل نمک، انیدریت و گازهای اسیدی دی اکسید کربن (CO_2) و سولفید هیدروژن (H_2S) است. هزینه، فاکتور اصلی و مهم در هنگام انتخاب گل‌های پایه نفتی است. هزینه هر بسته از گل پایه نفتی در مقایسه با گل پایه آبی بسیار بالاست (Amoco, 2010).

۲-۲-۲ سیالات پایه آبی

سیالات پایه آبی بیشترین مورد استفاده را دارند. یک سیال پایه آبی از ترکیب آب برای فاز مایع و رس تجاری برای ایجاد ویسکوزیته ساخته می‌شود. فاز پیوسته می‌تواند آب تازه، آب دریا، آب لب شور^۲ باشد. رس تجاری استفاده شده ممکن است بنتونایت، آتاپولگیت، سیپیولایت باشد. اینگونه سیالات بطور کلی آسان ساخته می‌شوند و نگهداری آن‌ها ارزان است و می‌توان آن‌ها را جهت غلبه بر بیشتر مشکلات حفاری تنظیم و فرمول بندی کرد (Amoco, 2010).

۳-۲-۲ سیالات پایه گازی

سیالات حفاری پایه گازی (سیالات پنوماتیکی^۳) گاز یا هوا فاز پیوسته (به طور مثال گاز خشک و هوای مرطوب) و همچنین گاز به عنوان فاز ناپیوسته است (به طور مثال کف). در سیالات پایه گازی از گاز یا هوای فشرده برای کاهش گرادیان سیال حفاری استفاده می‌شود. هدف اصلی در استفاده از این نوع سیالات جلوگیری از هرزروی سیال در سازندهای شکافدار و حفاری در نواحی دارای فشار کم در نتیجه جلوگیری از صدمه به ناحیه تولیدی است. مزیت مهم دیگر استفاده از اینگونه سیالات افزایش سرعت حفاری به خصوص در سازندهای سخت است (William, 2009). تجهیزات اصلی که در حفاری با سیالات پایه گازی مورد نیاز است و در حفاری با سیالات متداول حفاری به کار نمی‌رود شامل: کمپرسورهای هوا یا گاز و بوسترها، وسایل چرخشی سرچاهی، پمپ‌های تزریق مواد شیمیایی (برای کف‌زها و بازدارنده‌های

1- Formation damage

2- Brackish

3- Pneumatic Fluid

خوردگی) و واحدهای تولیدکننده کف هستند. تمام طراحی سیستم حفاری با هوا و زیر مجموعه‌های آن وابسته به ظرفیت و کارایی کمپرسورهاست. برای درک بهتر شکل (۲-۲) یک نمای کلی از حفاری با هوا و کف و تجهیزات اصلی مورد نیاز را نشان می‌دهد.

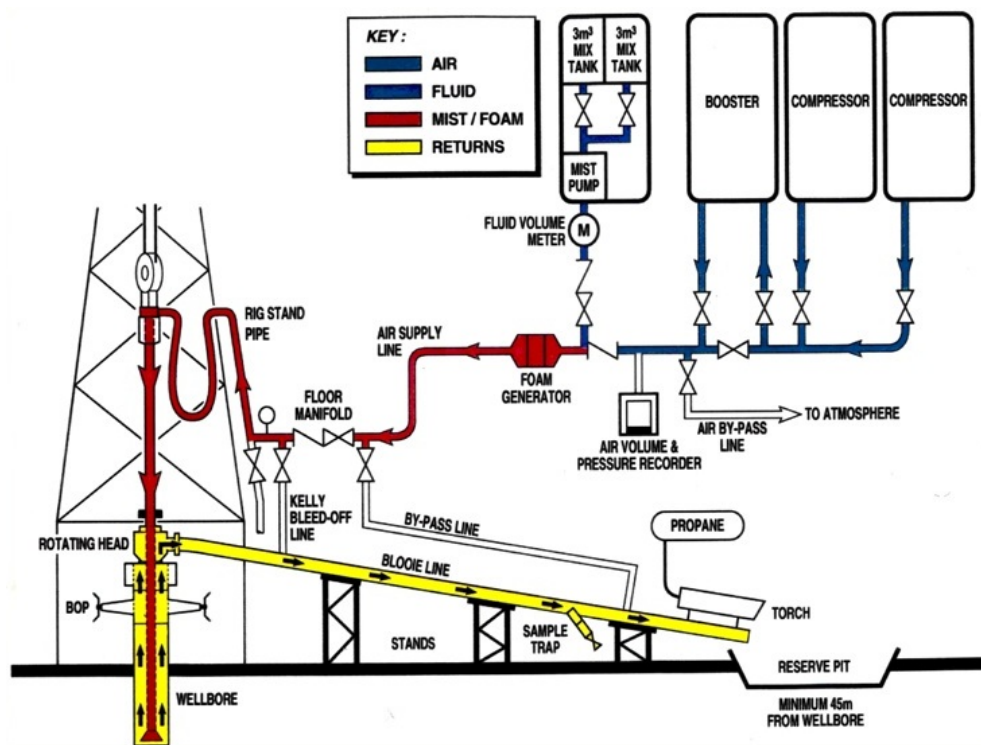
در حفاری با سیالات پایه گازی نیاز به یک یا چند نوع از مواد شیمیایی اصلی می‌باشد. این مواد

شیمیایی شامل (ASME, 2005):

- سورفکتانت‌ها^۱ مانند گرد صابون یا عوامل کف زا

- مواد خشک کننده

- بازدارنده‌های خوردگی



شکل ۲-۲ تجهیزات عملیاتی مورد نیاز حفاری با هوا و کف (William, 2009)

۲-۳ مجموعه‌های حفاری با هوا

در کل حفاری با هوا به ۴ دسته طبقه‌بندی می‌شود، که طبقه‌بندی و فواید آن بشرح زیر است:

۱- حفاری با هوای خشک^۱

الف: سرعت حفاری را بیشتر می‌سازد.

ب: عمر مته را افزون‌تر می‌سازد.

ج: به لایه موئد نفت ضرر نمی‌زند.

د: بطور مرتب و پیوسته‌ای لایه آزمائی خواهیم داشت.

۲- حفاری با هوای مرطوب^۲

الف: مواقعی استفاده می‌شود که جریان آب ناشی از سازندها بیش از اندازه باشد.

ب: خرده‌های حفاری بزرگتری حاصل می‌شود.

ج: لایه‌آزمایی پیوسته‌ای خواهیم داشت.

د: فواید مربوط به هوای خشک را نیز دربر دارد.

۳- حفاری با کف^۳

الف: سرعت حفر مته را زیاد تر می‌کند.

ب: هوای کمتری مورد نیاز است.

ج: فشار هیدرواستاتیک را کمتر می‌کند.

د: به سازندها ضرر نمی‌رساند.

۴- حفاری با گل هوا زده^۴

الف: باعث می‌شود که از مواد شکاف پرکن^۵ استفاده نشود.

ب: از خطرات ناشی از گیر لوله در چاه جلوگیری می‌شود.

1- Dust drilling

2- Mist drilling

3- Foam drilling

4- Aerated mud drilling

5- Lost circulation material (L.C.M)

ج: از زیان رساندن به سازند جلوگیری بعمل می‌آید.

د: رسیدن بمیزان حفاری مورد نیاز.

۲-۳-۱ حفاری با هوای خشک

در حفاری با هوای خشک از هوا یا گاز طبیعی به عنوان سیال حفاری استفاده می‌شود. حفاری با گاز خشک در سازندهای سخت که آب یا نفت جریان ندارد کاربرد دارد. اگر سازندی که در آن حفاری می‌کنیم کاملاً خشک باشد و یا اینکه جریان خفیفی از آن تراوش کند این جریان خفیف به وسیله جریان توده هوا جذب می‌گردد. در این حالت کنده‌های حفاری شده به هنگام رسیدن به سطح زمین به صورت ابری از گرد و غبار در می‌آیند. نیروی قابلیت حمل جریان هوا با دانسیته و مجذور سرعت آن در فضای حلقوی متناسب است. هر چه عمق چاه بیشتر شود دانسیته هوا به دلیل وجود کنده‌های حفاری افزایش می‌یابد در نتیجه برای تامین سرعت حلقوی مناسب باید فشار و حجم را در سطح زمین افزایش داد. وقتی که حفاری با هوا با ناکامی رو به رو شود، غالباً دلیل عمده آن است که میزان حفاری سریع بوده و حجم هوایی که می‌باید چاه را پاکسازی نماید، کافی نمی‌باشد. هرچه عمق چاه بیشتر شود به همان نسبت هوای بیشتری جهت تامین سرعت حلقوی چاه مورد نیاز می‌باشد تا بتواند کنده‌های حفاری را از ته چاه به سطح زمین حمل نماید (William, 2009).

۲-۳-۲ حفاری با هوای مرطوب

حفاری با هوای مرطوب در جایی که جریان آب ناشی از سازند زیاد باشد و امکان خشک کردن آن وجود نداشته باشد کاربرد دارد. هوای مرطوب شامل آب، سورفکتانت، و بازدارنده خوردگی به مقدار کم است. افزاینده‌های دیگر شامل کلرید پتاسیم و پلیمرها و حتی بنتونایت اگر مطلوب باشد اضافه می‌شود. مقدار آب برای حفاری مرطوب به اندازه چاه، نوع سازند و سرعت حفاری بستگی دارد (William, 2009). بنا به سه دلیل عمده ذیل، حفاری به طریقه مرطوب حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد هوا نسبت به حفاری با هوای خشک بیشتر احتیاج دارد و در حالت‌های خاص ممکن است به فشار ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ Psi (پوند بر اینچ مربع) نیز نیاز پیدا کنیم:

الف: ستون هوای موجود در فضای حلقوی به دلیل حمل آب ناشی از سازندها سنگین تر است.

ب: کنده‌ها، پیوسته بدون تغییر شکل (پودر شدن) به سمت بالا در حرکت هستند.

ج: بعضی از کنده‌ها، به دلیل داشتن مقداری رطوبت به یکدیگر می‌چسبند و قطر آن‌ها بزرگتر می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از سقوط آن‌ها باید سرعت فضای حلقوی را با افزایش مقدار هوا بیشتر نمود.

سیالات کف ساز قادرند مقدار هوای مورد نیاز را به طور موثر کاهش دهند. در صورتیکه بخواهیم آب ناشی از طبقات را بالا بکشیم به هوای بیشتری نیازمندیم بدین معنی که هر چه این مقدار آب زیاد شود باید جریان و فشار هوا را به همان نسبت افزایش داد (William, 2009).

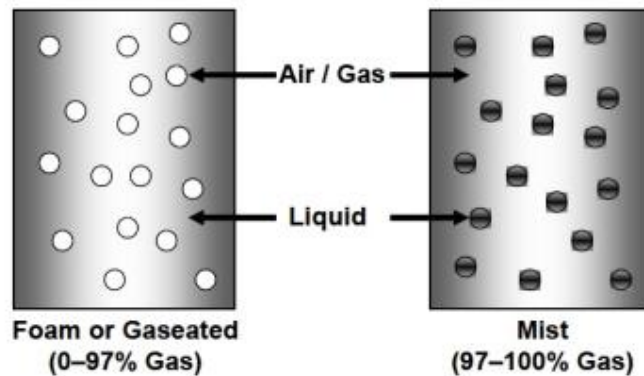
۲-۳-۳ حفاری با کف

کف فشرده در واقع یک نوع امولسیون است که هوا در آن به صورت یک عنصر بسیار پایدار به همراه مواد کف ساز و پایدار کننده در آمده است. کف مثل سیال حفاری در چاه چرخش دارد. ظرفیت حمل کنده‌های حفاری با کف ۶-۷ مرتبه بیشتر از هوا می‌باشد. کف، علاوه بر تمیزسازی حفر چاه، کیک گل^۱ نازکی روی دیواره ایجاد می‌کند که تا حدودی باعث پایداری دیواره چاه می‌شود. جهت تغلیظ کف و در نتیجه بهبود تمیزسازی و پایداری بیشتر حفر چاه، گاهی بنتونایت یا پلیمرهای خاصی با دوغاب تزریقی مخلوط می‌گردد. از خصوصیات ویژه کف غلیظ این است که پس از خارج شدن از چاه به خاطر داشتن غلظت زیاد، نمی‌توان آن را به درون چاه فرستاد. تمامی کف خارج شده از لوله خروجی چاه را به داخل حوضچه‌های اطراف چاه روانه می‌کنند. به عبارت دیگر حفاری با کف فشرده باید به صورت سیستم باز انجام شود (William, 2009).

تفاوت بین هوای مرطوب و کف، در سرعت فضای حلقوی و درصد مایع موجود در مخلوط هوا و مایع است. در حفاری با کف سرعت فضای حلقوی در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ فوت بر دقیقه که خیلی کمتر از هوای مرطوب است، قرار دارد. در هوای مرطوب درصد مایع در مخلوط کمتر از ۴ درصد است و هوا فاز

1-Mud cake

پیوسته است. در کف مایع فاز پیوسته است و درصد مایع در ترکیب خیلی بیشتر است (معمولاً ۲۰ تا ۴۰ درصد). در شکل (۲-۳) می‌توان تفاوت ساختاری هوای مرطوب و کف را مشاهده کرد.



شکل ۲-۳ تفاوت ساختاری کف و هوای مرطوب (Gou and Ghalambor, 2002)

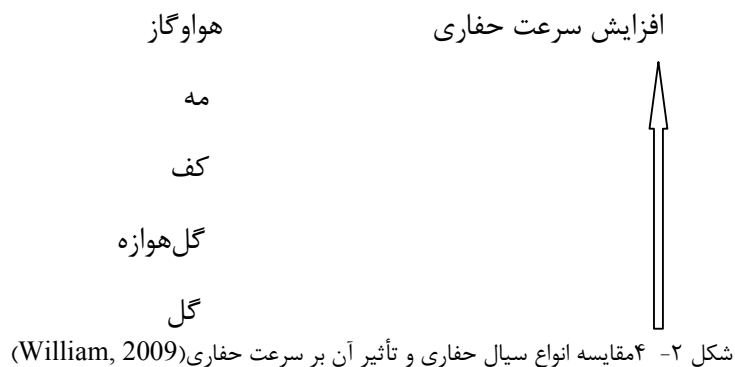
۲-۳-۴ حفاری با گل هوازده

گل هوازده یک مخلوط از هوا و سیال حفاری یا آب است. هوا برای کم کردن فشار هیدرواستاتیک به سیال حفاری اضافه می‌شود. گل هوازده خیلی شبیه گل حفاری با مقدار کمی اصلاحات می‌باشد. سرعت گل هوازده در فضای حلقوی تنها ۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از سرعت سیال حفاری در این فضا است. سیستم گل هوازده ناپایدار است زیرا گاز و مایع به هم متصل نیستند. گاز، در سطح قبل از اینکه وارد لوله حفاری شود به درون سیال وارد می‌شود. بیشترین گازی که استفاده می‌شود، هوا و نیتروژن است. در این سیستم حفاری، هوا و گل همزمان با یکدیگر به داخل لوله ایستاده^۱ جریان پیدا می‌کنند و این مساله باعث می‌شود که وزن ستون گل برگشتی کاهش یابد. حفاری با این سیستم موقعی صورت می‌گیرد که آب ناشی از طبقات بسیار زیاد باشد و امکان حفاری با هوا وجود نداشته باشد. غالباً مواقعی که هرزروی باعث افزایش هزینه شود، استفاده از این سیستم بسیار موفقیت آمیز خواهد بود (William, 2009).

1- Stand Pipe

۴-۲ مقایسه بین گل حفاری و سیالات پایه گازی

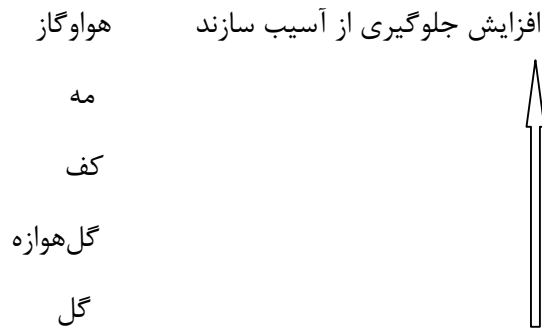
مزایا و معایب بسیار اساسی در عملیات حفاری با گل و حفاری با هوا وجود دارد. مزیت واضح و مشخص در حفاری با هوا افزایش سرعت حفاری در مقایسه با گل حفاری است. شکل (۴-۲) یک شماتیک از سیالات مختلف حفاری و چگونگی تأثیر آنها بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. به طور کلی سیال حفاری سبک‌تر سرعت نفوذ بیشتری دارد. ستون سیال سبک‌تر در فضای حلقوی فشار محدود کننده کمتری بر روی مته وارد می‌کند که به مته اجازه می‌دهد راحت‌تر در سنگ نفوذ کند (William, 2009).



شکل (۵-۲) شمائی از سیالات مختلف حفاری و پتانسیل مربوطه برای جلوگیری از آسیب سازند را نشان می‌دهد. آسیب سازند یک موضوع مهم در بازیابی منابع (به طور مثال چاه های آبی، مانیتورینگ محیطی، عملیات حفاری چاه، نفت و گاز طبیعی و سیال‌های گرمایی) است. ستون سبک‌تر سیال در فضای حلقوی کمترین پتانسیل تخریب سازند را دارد. آسیب سازند زمانی اتفاق می‌افتد که فشار ستون سیال در پایین چاه بیشتر از فشار منفذی^۱ سیال سازند (آب، نفت، گاز) باشد که در نهایت با ایجاد اثر پوسته^۲ کاهش تولید را به همراه دارد.

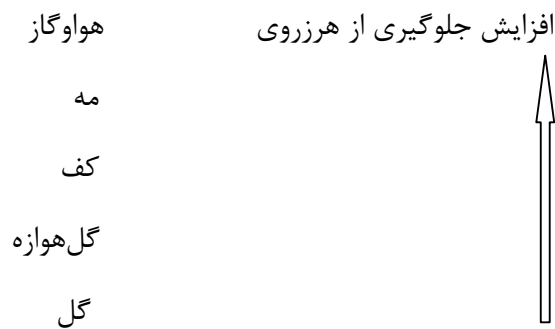
1-Pore Pressure

2- Skin effect



شکل ۲-۵ مقایسه انواع سیال حفاری در پتانسیل جلوگیری از آسیب سازند (William, 2009)

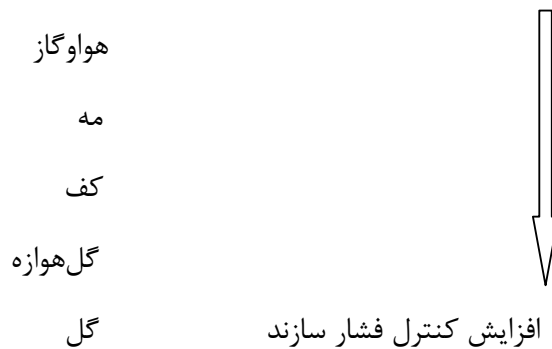
شکل (۲-۶) یک شمائی از سیالات حفاری مختلف و پتانسیل مربوطه برای جلوگیری از هرزروی را نشان می‌دهد. هرزروی گل زمانی که گل حفاری در سازندی که شکستگی دارد و یا حفره‌ها و منافذ بزرگ دارد، اتفاق می‌افتد. اگر این ترک‌ها و منافذ به اندازه کافی بزرگ باشند و از سیالات سازندی پر نشده باشند، بنابراین به محض اینکه حفاری شروع می‌شود، سیال حفاری که در فضای حلقوی در حال حرکت به سطح می‌باشد می‌تواند به این شکاف‌ها و یا منافذ برسد که باعث می‌شود سیال حفاری به سطح بازگشت نکند و در شکاف‌ها و منافذ وارد شود. خرده‌های سنگ در ته چاه باقی می‌ماند و اطراف بخش پایینی رشته حفاری و مته حفاری را می‌گیرد. اگر این وضعیت به سرعت تشخیص داده نشود، رشته حفاری درون چاه شروع به گشتاور به سمت بالا می‌کند و آسیب مکانیکی در رشته حفاری اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۲-۶ مقایسه انواع سیال حفاری در قابلیت جلوگیری از هرزروی (William, 2009)

شکل (۲-۷) یک شمائی از سیالات حفاری مختلف و پتانسیل مربوطه برای استفاده در مناطق زمین‌شناسی با فشارهای منفذی بالا را نشان می‌دهد. در عملیات حفاری نفت، گاز طبیعی و منابع سیالات زمین‌گرمایی با فشار منفذی بالا مواجه می‌شویم. به منظور حفاری ایمن این منابع از گل‌های

حفاری سنگین شده استفاده می‌شوند. ستون سنگین گل در فضای حلقوی فشار ته‌چاهی بالایی را برای تعادل (یا بالای تعادل) فشار منفذی سیالات مخزنی ایجاد می‌کند. همچنین شکل نشان می‌دهد که رفتار ستون سیال حفاری در فضای حلقوی برای کنترل فشار بالای منفذی از گل حفاری مفیدتر است (جهت پیکان به سمت پایین در جهت افزایش ظرفیت کنترل فشار بالای منفذی است).



افزایش کنترل فشار سازند
شکل ۲-۷ مقایسه انواع سیال حفاری در کنترل فشار منفذی (William, 2009)

شکل (۲-۸) یک شمائی از سیال حفاری مختلف و پتانسیل مربوطه برای حفظ آب سازندی که بر اثر حفاری چاه جریان پیدا کرده را نشان می‌دهد. اگر گل حفاری به عنوان سیال چرخشی در سیستم استفاده می‌شود، فشار ستون گل در فضای حلقوی معمولاً برای حفظ جریان آب سازندی حفاری شده در ته چاه کافی است. سیال‌های حفاری سبک‌تر فشار ته‌چاهی کمتری دارند، بنابراین، فشار کمتری بر آب ایجاد شده در شکاف و ساختار متخلخل سازند حفاری شده دارد.



افزایش کنترل آب سازندی
شکل ۲-۸ مقایسه انواع سیال حفاری در کنترل آب سازندی (William, 2009)

۲-۵ کف

کف مثل سیال حفاری در چاه چرخش دارد. ظرفیت حمل کننده‌های حفاری ۶-۷ مرتبه بیشتر از هوا می باشد. کف، علاوه بر تمیزسازی حفر چاه، کیک گل نازکی روی دیواره ایجاد می کند که تا حدودی باعث پایداری دیواره چاه می شود. این سیستم حفاری در سنگ‌های پایدار استفاده می شود. جهت تغلیظ کف و در نتیجه بهبود تمیزسازی و پایداری بیشتر حفر چاه، گاهی اپراتور بنتونایت یا پلیمرهای خاصی را با دوغاب تزریقی مخلوط می کند. کف‌ها به صورت ترمودینامیکی سیستم‌های غیر پایدار هستند زیرا آنها همیشه شامل مقدار بیشتر از حداقل سطح مشترک گاز محلول می شوند (William, 2009).

سورفکتانت یا همان عامل کفزا که نقش مهمی در پایداری بازی می کند، حباب‌های گاز را به دام می اندازد و به ساختار کف اجازه می دهد که پایدار بماند. کف می تواند یک ویسکوزیته بالا داشته باشد، همچنین یک چگالی پایین تر از فاز مایع دارد. ویسکوزیته بالای آن اجازه می دهد که انتقال خرده‌ها به صورت مؤثر صورت گیرد و چگالی پایین اجازه می دهد شرایط حفاری فرو تعادلی جهت افزایش سرعت حفاری محقق شود. ساختار رئولوژی کف برای جابجایی خرده‌ها بسیار مناسب است. کیفیت کف از مهمترین فاکتور در حفاری با کف است. کیفیت به صورت نسبت حجم گاز به حجم مایع کف تعریف می شود. سیال کف را می توان به صورت، کف فشرده^۱، و کف پایدار^۲ طبقه‌بندی کرد که خیلی شبیه هم هستند.

کف فشرده از طبقه‌بندی‌های کف است که از نظر رئولوژی بیشتر شبیه گل است. یک سیال حفاری با دانسیته کم که برای حفاری سازندهایی که یکپارچگی ضعیفی دارد، استفاده می شود. هنگامی که از کف فشرده استفاده می شود، سرعت در فضای حلقوی می تواند از ۱۰۰ تا ۲۰۰ فوت بر دقیقه برای تمیزسازی چاه باشد. در نتیجه تعداد کمپرسورهای مورد نیاز کمتر از انواع دیگر حفاری پایه گازی (هوای خشک، حفاری با هوای مرطوب) است. کف فشرده به وسیله ترکیب اولیه پلیمرها در آب، درون مخازن گل^۳ تشکیل می شود. اغلب وقت‌ها مقدار کمی بنتونایت اضافه می شود. این مخلوط به مخزن کف انتقال

1-Stiff Foam

2-Stable Foam

3-Mud pit

داده می‌شود و مواد تولید کننده کف (کف‌زاها) به داخل مخلوط اضافه می‌شود. آنگاه به مسیر جریان هوا تزریق می‌شود. مقدار تزریق کف فشرده بین ۸ تا ۱۲ بشکه در ساعت می‌باشد (William, 2009). جدول (۱-۲) ترکیب کف فشرده را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ ترکیب کف فشرده (Amoco, 2010)

ترکیب کف فشرده	مقدار
آب معمولی	۱ بشکه
بنتونایت	۱۲ پوند
کربنات سدیم	۱ پوند
کلروپتاسیم	۳-۵٪ حجمی
کربوکسی-متیل-سلولز پرل‌جیت ^۱	۰٫۵ پوند
کاستیک	۰٫۵ پوند
کف حفاری	۱٪ حجمی

کف پایدار از ترکیب خاص یک سیال تراکم ناپذیر تزریق شده با هوا یا گازهای دیگر فشرده شده ساخته می‌شود. برای ایجاد یک کف پایدار بخش تراکم ناپذیر معمولاً از آب با یک سورفکتانت که عامل تولید کف است، ساخته می‌شود. ترکیب سیال تراکم ناپذیر (با سورفکتانت) و هوای فشرده (یا گازهای دیگر) مثل یک سیال هوازده به داخل رشته حفاری جریان پیدا می‌کند (William, 2009). جدول (۲-۲) ترکیب کف پایدار را نشان می‌دهد. کف پایدار و کف فشرده بسیار شبیه به هم بوده فقط در برخی اضافه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند و اغلب موارد این دو را با یک اسم همان سیال کف بکار می‌برند.

1- Carboxymethylcellulose

جدول ۲-۲ ترکیب کف پایدار (Amoco, 2010)

ترکیب کف پایدار	مقدار
بنتونایت	۱۰-۱۵ پوند بر بشکه
سلولوس پلی یانیونیک	۰,۵ پوند بر بشکه
سدیم	۱ پوند بر بشکه
سورفکتانت کفزا	۱٪ حجمی
پتاسیم کلرید	۳-۵٪ حجمی
اکس پلیمر	۰,۲۵-۱ پوند بر بشکه
آهک	۰,۵-۰,۲۵ پوند بر بشکه

۲-۵-۱ کیفیت کف

کیفیت کف به صورت نسبت حجم گاز به حجم کل کف تعریف می شود. شاخص کیفیت کف Γ که به صورت زیر تعریف می شود (Paknejad, 2005):

$$\Gamma = \frac{V_g}{V_g + V_l + V_f} \times 100 \quad (1-2)$$

V_g = حجم گاز

V_l = حجم مایع

V_f = حجم مایع سازندی وارد شده

کیفیت کف بسته به مقدار گاز در کف، بین صفر و ۱ تغییر می کند. کیفیت کف یک تابع از فشار و عمق در فضای حلقوی است. بیشتر کفها تا زمانی که کیفیت آنها بین ۰/۶ تا ۰/۹۷ باشد، پایدار هستند. در عملیات حفاری با کف پایدار حد پایین کیفیت کف معمولاً در پایین فضای حلقوی و حد بالایی آن در بالای فضای حلقوی دیده می شود. کیفیتهای بالاتر از ۰/۹۷ ساختار کف به هوای مرطوب تغییر پیدا می کند و زمانی که کیفیت کمتر از ۰/۶ است ساختار کف شکسته می شود. قانون گاز واقعی برای تعیین حجم گاز در شرایط فشار و دمای مختلف می تواند استفاده شود (Paknejad, 2005).

۲-۵-۲ رئولوژی کف

رئولوژی، مطالعه تغییر شکل سیالات می‌باشد. کف نیز مانند خیلی از سیالات حفاری دیگر دارای خصوصیات غیر نیوتنی می‌باشد. در سیالات غیر نیوتنی رابطه ساده‌ای بین تنش برشی و نرخ برش وجود ندارد یعنی ویسکوزیته این سیالات در یک دما و فشار معین ثابت نیست و به عوامل دیگری مانند نرخ برش بستگی دارد. جریان کف و تحلیل رئولوژی کف موضوع مطالعات زیادی در چند دهه گذشته بوده است. این مطالعات شامل موارد زیر می‌شوند (Paknejad, 2005):

- مطالعات آزمایشگاهی رئولوژی کف با استفاده از رئومترها و وسایل آزمایشگاهی که پارامترهای مختلفی از جمله تنش تسلیمی، سرعت لغزش دیواره و غیره در این مطالعات در نظر گرفته شده‌اند و از این اندازه‌گیری‌ها یک معادله رئولوژیکی ارائه می‌شود.

- اندازه‌گیری‌های رئولوژی کف در شرایط شبیه‌سازی صنعت نفت شامل اندازه‌گیری‌های افت فشار در لوله‌های بزرگ مقیاس.

- مطالعات تئوری که سعی می‌کنند رئولوژی کف را از دیدگاه میکروسکوپی مطالعه کنند.

در مورد بهترین مدل رئولوژیکی توصیف کننده رفتار غیرنیوتنی سیال کف با توجه به روش تحلیل، وسیله آزمایشگاهی، فاز گاز، انواع افزودنی‌های کف ساز و سایر افزودنی‌ها هنوز توافق کامل وجود ندارد (Paknejad, 2005). مطالعات نشان داده‌اند که کف می‌تواند به عنوان سیال قانون توان، بینگهام پلاستیک و هرشل بالکلی، عمل کند. این مدل‌ها به صورت زیر می‌باشند (Paknejad, 2005):

مدل قانون توان^۱

$$\tau = K\gamma^n \quad (۱۰-۲)$$

مدل بینگهام پلاستیک

$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ \tau = \tau_y + \mu_p \gamma & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (۱۱-۲)$$

1-Power law (PL)

مدل قانون توان تسلیمی (هرشل - بالکلی)

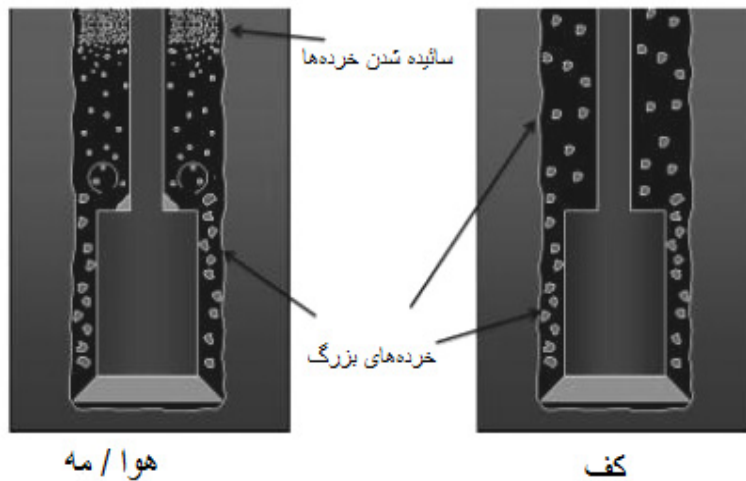
$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ |\tau| = \tau_y + K|\gamma|^n & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (2-12)$$

که در آنها:

γ نرخ برش (1/s)، n شاخص رفتاری جریان، K شاخص سازگاری سیال ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)، μ_p ویسکوزیته پلاستیکی ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) و τ_y تنش تسلیمی (Pa) است.

۲-۶ انتقال خرده‌ها

ویسکوزیته بالا و مؤثر کف آن را به یک سیال مناسب برای انتقال خرده‌ها تبدیل کرده است. در حقیقت کف قادر به انتقال خرده‌های بزرگ حفاری است. خرده‌های ایجاد شده توسط مته در هر اندازه به بیرون انتقال پیدا می‌کند. شکل (۲-۹) مقایسه توانایی کف برای انتقال خرده‌های بزرگ در برابر هوای مرطوب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹ توانایی انتقال خرده‌های بزرگ توسط کف در مقایسه با هوای مرطوب (Gou and Ghalambor, 2002)

مخلوط کف و خرده‌ها را به عنوان یک سیستم همگن نمی‌توان بررسی کرد. تفاوت‌های قابل توجهی بین کف و سرعت‌های خرده‌ها فضای حلقوی ممکن است وجود داشته باشد. در عملیات حفاری

با کف دبی‌های تزریق گاز و مایع باید مطابق شرایط احتیاجات ظرفیت انتقال خرده‌ها و پایداری کف باشد. زیرا میزان زیاد تزریق مایع ممکن است کیفیت کف را پایین بیاورد و یا میزان زیاد تزریق هوا کف را بُرد و خرده‌ها بطور کامل از ته چاه به سطح نیایند. در فصول بعدی به این مسئله خواهیم پرداخت.

۷-۲ عوامل موثر بر سرعت حفاری

عواملی زیادی بر نرخ نفوذ مته^۱ (ROP) تأثیر می‌گذارند و بطور کامل شناخته شده نیستند. یکی از مشکلات در آنالیز نرخ نفوذ مته دشواری جداسازی متغیرهای تحت مطالعه می‌باشد که تحلیل آنها را پیچیده می‌کند. بنابراین توسعه یک مدل ریاضی دقیق در حفاری دورانی به راحتی قابل محاسبه نمی‌باشد. فاکتورهای موثر بر سرعت حفاری می‌توانند به دو گروه اصلی فاکتورهای قابل کنترل و فاکتورهای محیطی تقسیم‌بندی شوند. در جدول (۲-۳) لیست این فاکتورها آورده شده است. فاکتورهای قابل کنترل را راحت‌تر از فاکتورهای محیطی می‌توان تغییر داد. زیرا به علت شرایط اقتصادی و زمین‌شناسی، تغییر در فاکتورهای محیطی غیر عملی و یا گران می‌باشد. تعدادی از این فاکتورها در پیچیدگی سطح اشتراک بین سنگ و مته هستند، که این چیزی است که با وابستگی متقابل و غیر خطی در برخی از این اثرات مرکب است. از آنجا که خصوصیات سیال کف، مثل سرعت، دانسیته، و غیره، وابسته به نوع سازند، فشار سازند و غیره هستند، خصوصیات کف شامل فاکتورهای محیطی می‌باشد.

جدول ۲-۳ فاکتورهای مطرح شده موثر بر نرخ نفوذ مته (Eren, 2010)

فاکتورهای قابل کنترل	فاکتورهای محیطی
طراحی مته	عمق
وزن روی مته	خصوصیات سازند
سرعت چرخش	دانسیته سیال
دبی تزریق سیال	قطر (اندازه) مته
دبی تزریق هوا	فشار سیال پایین چاه
گشتاور	دیگر خصوصیات سیال
فشار پمپاژ	حالت پوشش دندان مته

1- Rate of penetration (ROP)

دلیل اینکه دانسیته سیال جزء فاکتورهای محیطی می‌باشد این است که مقدار مشخصی از دانسیته سیال برای بدست آوردن اهدافی مثل ایجاد فشار بیش از حد جهت جلوگیری از به جریان افتادن سیال سازندی لازم است (Eren, 2010).

۲-۷-۱ خصوصیات سازند/سنگ

خصوصیات سازند که روی نرخ نفوذ مته تأثیر دارند به ترتیب اهمیت از بیشترین به کمترین می‌توان سنگ‌شناسی، استحکام، دانسیته، تخلخل و تراوایی سازند، را نام برد. حدود الاستیک و مقاومت نهایی سازند، مهمترین خصوصیات تاثیرگذار سازند بر نرخ حفاری هستند. در بسیاری از موارد این خصوصیت را به عنوان قابلیت حفاری سازند نیز بررسی می‌کنند.

در حفاری، سنگ‌ها را به سه گروه تقسیم می‌کنیم (Bourgoyne et al., 1991):

- الف) سنگ‌های نرم مثل رس‌ها، شیل‌های نرم و ماسه‌های غیر متحجر نسبتاً سیمان شده
- ب) سنگ‌های متوسط: شیل‌ها، آهک‌های متخلخل و دولومیت‌ها، ماسه‌های متحجر و ژئیس
- ج) سنگ‌های سخت: آهک‌ها و دولومیت‌های فشرده، ماسه‌ها با سیمان زیاد، کوارتزیت و چرت

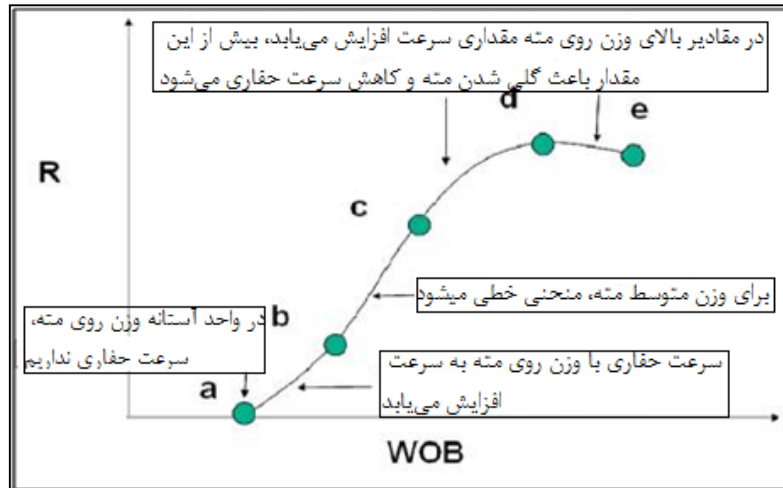
۲-۷-۲ عوامل مکانیکی

از عوامل مکانیکی که بر نرخ نفوذ مته تأثیر می‌گذارند می‌توان از: وزن روی مته^۱، سرعت دوران و نوع مته، نام برد که هر کدام بطور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۷-۲-۱ وزن روی مته

تأثیر وزن روی مته و سرعت دوران بر نرخ نفوذ مته توسط افراد زیادی در دو مقیاس آزمایشگاهی و عملیاتی انجام شده است. معمولاً نرخ نفوذ مته نسبت به وزن روی مته در حالی که تمام متغیرهای حفاری ثابت فرض شوند به صورت شکل (۲-۱۰) می‌باشد (Bourgoyne et al., 1991).

1- Weight on Bit (WOB)



شکل ۲- ۱۰ تأثیر وزن روی مته بر سرعت حفاری (Bourgoyne et al., 1991)

با توجه به شکل فوق ابتدا باید وزن معادل نقطه a را به سنگ اعمال کنیم تا بر مقاومت فشاری سنگ غلبه نفوذ کرده و نفوذ در سنگ آغاز شود. به این وزن، وزن آستانه‌ای^۱ می‌گویند. زیر این وزن مته هیچ نفوذی در سنگ ندارد. در بعضی مواقع مقدار a منفی است به این معنی که وزن مته‌ای اعمال نمی‌کنیم و مته با کمک نیروی فشاری ایجاد شده توسط جت مته در سنگ نفوذ می‌کند، که در مورد سنگ‌های نرم صدق می‌کند. با افزایش وزن روی مته نفوذ مته در سنگ به سرعت افزایش می‌یابد و از نقطه a تا b رابطه بین نرخ نفوذ مته و وزن به صورت نمایی افزایش می‌یابد. از b تا c که شرایط نرمال حفاری می‌باشد رابطه بین سرعت حفاری (R) و وزن مته به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. برای این بخش می‌توان رابطه زیر را بیان کرد:

$$R = a + b_w \quad (۱۳-۲)$$

که a و b به ترتیب محل تقاطع و شیب خط می‌باشند و به خصوصیات سنگ، اندازه مته، خصوصیات گل و غیره بستگی دارند. از c تا d رابطه بین نرخ نفوذ مته و وزن به صورت نمایی کم می‌شود و افزایش وزن روی مته تنها مقدار ناچیزی سرعت حفاری را افزایش می‌دهد. در بعضی مواقع کاهش نرخ نفوذ مته در حداکثر وزن روی مته بدست می‌آید (c تا d). رفتار این مرحله را اصطلاحاً گلی شدن مته^۲

1- Threshold Weight

2- Bit Floudering

می‌نامند. در این مرحله هیدرولیک ما متناسب با حجم کنده‌های تولید شده نمی‌باشد و چاه خوب تمیز نمی‌شود و مته به جای حفاری سازند، کنده‌های زیر خود را حفاری کرده و آنها را ریزتر می‌کند (Bourgoyne et al, 1991).

۲-۲-۷-۲ سرعت دوران مته

مطالعات نشان می‌دهد که افزایش نرخ نفوذ نسبت مستقیمی با سرعت چرخش در سازندهای نرم بر خلاف سازندهای سخت دارد. در سازندهای سخت، میزان افزایش نرخ نفوذ با سرعت چرخش (دوران) از آهنگ کندتری برخوردار است و بعضاً باعث کاهش آن می‌شود. به همین دلیل در سازندهای نرم سرعت دوران بالا حدود ۱۵۰ دور در دقیقه^۱ یا بیشتر و در سازندهای سخت از سرعت دوران پایین حدود ۴۵ تا ۷۵ دور در دقیقه استفاده می‌کنند. اثر سرعت دوران بر روی نرخ حفاری را می‌توان به صورت زیر نوشت (Bourgoyne et al., 1991):

$$R = f(RPM)^\lambda \quad (۲-۱۴)$$

جایی که λ ضریب سختی سازند است.

۲-۲-۷-۲ نوع مته

طراحی‌های مته بر اساس دو گروه کلی صورت می‌گیرد: در پیوست (الف) نمونه‌ای از شکل این دو مته آورده شده است.

مته‌های غلتکی^۲

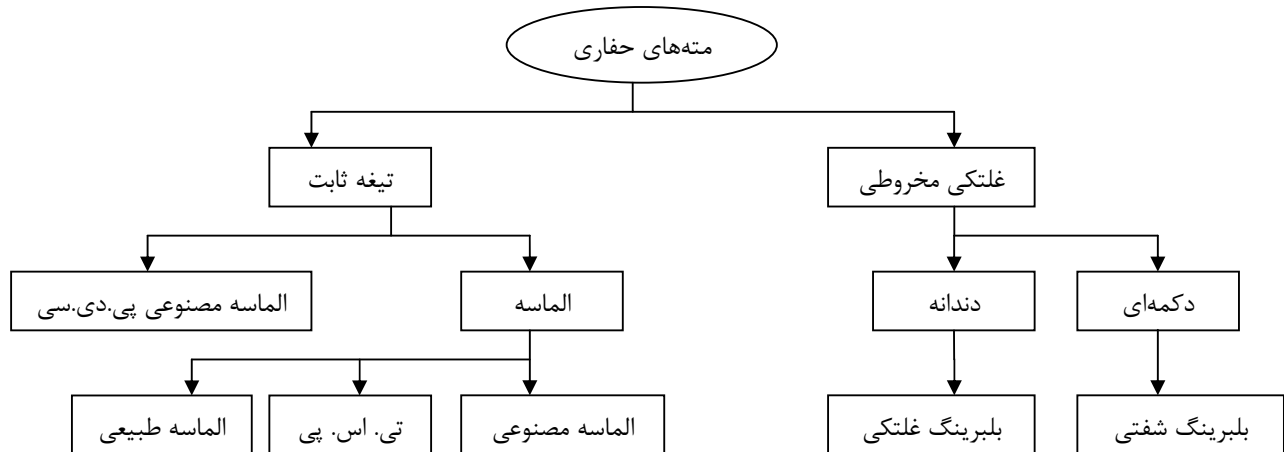
مته‌های تیغه ثابت^۳

شکل ۲-۱۱ طبقه‌بندی کلی انواع مته‌ها را نشان می‌دهد.

1-Rotation per minute (RPM)

2- Rock Bits

3- Drag Bits



شکل ۲- ۱۱ طبقه بندی انواع مته (Rahimzadeh et al., 2010)

برای حفاری سازندهای نرم از مته‌های غلتکی دندانهای با دندان بلند و فاصله زیاد دندانه‌ها و در نظر گرفتن زاویه مرکزی^۱ زیاد استفاده می‌شود. مکانیزم کندن این مته‌ها عمل خراشیدن^۲ یا مغار کردن^۳ در دو مرحله، اول نفوذ و ایجاد شکست در سنگ و دوم جابجایی دندانه در سنگ انجام می‌شود. در سنگ‌های سخت معمولاً از مته‌های غلتکی نوع دکمه‌ای با زاویه افست پایین یا صفر استفاده می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که آن‌ها در مسیر درستی چرخش کرده و از این رو حفاری در یک پروسه واقعاً ضربه‌ای انجام می‌شود. در این پروسه فشار دندانه بر سنگ باعث عمل خرد کردن^۴ و له کردن^۵ می‌شود و عمل کندن یا پارو کردن در سنگ‌های سخت انجام نمی‌شود. در سنگ‌های سخت طول دندانه‌ها باید کوتاه‌تر و تعداد آن‌ها در واحد سطح باید بیشتر باشد. در میدان شانول از مته‌های غلتکی مخروطی استفاده شده است که در حفره ۲۶ اینچی از مته‌های نوع GTX415، حفره ۱۷/۵ از مته نوع ۵۱۷ و حفره ۱۲/۲۵ اینچی از مته نوع GTX517 استفاده شده است.

1- Offset
2- Scraping
3- Gouging
4- Chipping
5- Crushing

۲-۷-۳ خصوصیات سیال حفاری

خصوصیات سیال حفاری که بر نرخ نفوذ مته تأثیر می‌گذارد شامل: وزن گل، خصوصیات رئولوژی گل، میزان فیلتراسیون، محتوی جامدات گل و ترکیب شیمیایی گل می‌باشند (Bourgoyne et al., 1991). به طور کلی نرخ نفوذ مته با افزایش وزن گل، گرانروی و محتوای جامدات گل کاهش می‌یابد و با افزایش نرخ فیلتراسیون افزایش می‌یابد. وزن گل، محتوی جامدات و مشخصات فیلتراسیون گل اختلاف فشار را در مقابل بخشی از سنگ که زیر مته خرده شده، کنترل می‌کند. گرانروی گل افت‌های اصطکاکی داخل رشته حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه انرژی هیدرولیکی را در نازل‌های مته برای تمیزسازی چاه مهیا می‌کند (Bourgoyne et al., 1991).

۲-۷-۴ عوامل هیدرولیکی

خصوصیت اصلی سرعت حفاری (ROP) در حفاری چرخشی نه تنها شکاف سنگ در ته چاه است بلکه انتقال سریع و مؤثر خرده‌های شکافته شده از سطح سنگ برای شکاف دادن بیشتر و پیشرفت حفاری می‌باشد. یکی از اهداف اصلی هیدرولیک، انتقال کنده‌ها از زیر مته می‌باشد. هیدرولیک انتقال لحظه‌ای کنده‌ها را امکان پذیر می‌کند و اعمال مناسب آن سایش مکرر کنده‌ها را کاهش داده و نرخ نفوذ مته را افزایش می‌دهد. زمانی که هیدرولیک متناسب با سرعت حفاری نباشد و هیدرولیک مته نتواند حجم خرده‌های تولید شده را منتقل کند، مته به جای حفاری سازند، کنده‌های زیر خود را ساییده و خردتر می‌کند و به تدریج سرعت حفاری کاهش یافته و همچنین می‌تواند باعث گیر مته شود. برای اینکه هیدرولیک سرعت کافی را بر انتقال خرده‌ها بدهد، در مته نازل قرار داده می‌شود که نه تنها انرژی گل را به مته منتقل می‌کند، بلکه با استفاده از انرژی ایجاد شده در اثر جت، باعث کندن سازند و انتقال کنده‌ها به سطح می‌شود (Bourgoyne et al., 1991).

۲-۸ مروری بر مطالعات گذشته

پیدا کردن فاکتورهای موثر بر روی نرخ نفوذ مته می‌تواند کمک شایانی در شناخت بهتر و بکارگیری بهینه پارامترهای حفاری در عملیات میدانی باشد. امروزه صنعت در حال توجه به این است که بیشترین اثر را بر روی سرعت حفاری کدام فاکتور دارد. مطالعات بسیاری هم در این خصوص شده است. در این قسمت ابتدا به مطالعات انجام شده در زمینه حفاری با هوا پرداخته و سپس مروری بر مطالعات گذشته در زمینه حفاری با کف خواهد شد و در نهایت به مطالعات انجام شده در خصوص مدل‌های حفاری ارائه شده پرداخته می‌شود.

۲-۸-۱ مطالعات گذشته حفاری با هوا

شروع بکارگیری تکنولوژی حفاری با هوا و گاز در جهان از سال ۱۹۳۰ در آمریکا بوده است (William, 2009). روش حفاری با هوا در ایران از سال ۱۹۷۰ و بوسیله شرکت‌های خارجی در منطقه کنگان مورد استفاده قرار گرفته شده (آریان‌پور، ۱۳۶۸).

آنجل^۱ در سال ۱۹۶۰، اولین مدل تجربی و ریاضی قابل استفاده در عملیات حفاری را ارائه کرد. این مدل در صنعت بکار برده شد و تا امروز نیز برای مهندسی و مشاورین حفاری مفید می‌باشد. این مدل تجربی در نتیجه یک دانش قابل توجه در خصوص حمل کننده‌های حفاری با هوا می‌باشد. بنابراین مدل تجربی آنجل به عنوان یک ابزار مهندسی وارد صنعت شد. اصلی‌ترین و مهم‌ترین فرضی که در خصوص مخلوط کننده‌ها و هوا در مدل آنجل صورت گرفته اینست که کننده‌های حفاری با سرعت برابر با جریان هوا در دالیز (فضای حلقوی) حرکت و به سطح می‌آیند. همچنین در محاسبه حجم هوای مورد نیاز دو فرض اساسی در نظر گرفت اولاً سرعت هوا در دالیز ۳۰۰۰ فوت در دقیقه است و دوماً رفتار هوا یا گاز ایده‌ال می‌باشد. فرض دوم باعث محاسبه حجم هوای مورد نیاز کمتر از مقدار واقعی می‌شود.

در سال‌های بعد، بسیاری از محققین این مدل را برای تعمیم به دیگر بخشهای مهندسی حفاری توسعه دادند. در سال ۱۹۸۱، تحقیقات دانشگاهی فناوری حفاری با هوا آغاز شد. این تحقیقات اولین بار در دانشگاه تولسا و پنسیلوانیا صورت گرفت و توسط وزارت انرژی آمریکا پشتیبانی گردید. تلاش شد تا

1- Angel

جزئیات برخورد و تماس هوا با کنده های حفاری در دالیز تضمین گردد. در این کار تجربی مشخص شد که در مسیر عمودی دالیز، جریان هوا رو به بالا توسط کنده های سنگ گلوگیر می شود که این بسیار شبیه حالتی می باشد که در حمل بادی در صنعت اتفاق می افتد. این آزمایش تجربی فرضیات آنجل که عبارت بود از شدت جریانهای حجمی محدود با کنده های حفاری کوچک را تأیید کرد. نتایج این کار تجربی موجب ارتقاء مدل های بعدی گردید (William, 2009).

در ۱۹۸۳، مدل دیگری ارائه گردید که در آن سرعت متفاوت ذرات سنگ با هوا لحاظ گردیده بود. این مدل مقادیر مخلوط هوا و سنگ را ارائه می کند که می تواند صحت برنامه ریزی ها را بالا ببرد. مشکلی که در این مدل وجود دارد، محاسبه تحلیلی سرعت های میانگین برای ذرات مشکل می باشد. در ۱۹۹۲، یک کار نظری دیگری صورت گرفت تا بتوان داده های سرعت میانگین ذرات را فیلتر و در مدل وارد کرد ولی این مدل نیز با مشکل محاسبه سرعت میانگین ذرات مواجه بود (William, 2009).

شوپل و ساپر^۱ (۱۹۶۷) تاثیر دما و فشار را نیز بر روی خروجی متراکم کننده ها در نظر گرفتند. آنها رفتار کنده ها در دالیز را نیز تفسیر کرده و بر مبنای افت فشار در سیستم گردش گل، رابطه ای ارائه کردند که ارتباط بین عمق و حجم هوای مورد نیاز را بیان می کرد.

ایکوکو و آذر^۲ (۱۹۸۰) مدل مشابهی را ارائه کردند که حجم هوای مورد نیاز را محاسبه می کند. آنها اثر جریان هوا و جریان کنده های حفاری را به طور مستقل در نظر گرفتند. علاوه بر این، آنها ضریب اصطکاک را برای انواع مخلوط های هوا با کنده های حفاری ارائه نمودند.

ماچادو و ایکوکو^۳ (۱۹۸۲) مدل مشابهی را ارائه کردند که حجم هوای مورد نیاز را محاسبه می کند. آنها اثر جریان هوا و جریان کنده های حفاری را به طور مستقل در نظر گرفتند. علاوه بر این، آنها ضریب اصطکاک را برای انواع مخلوط های هوا با کنده های حفاری ارائه نمودند.

در زمینه فقط حفاری با هوا مطالعات زیادی صورت نگرفته است و تنها یک کتاب حفاری هوا و گاز به طور کامل در سه چاپ در سال های ۱۹۸۴، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۹ به معرفی این روش و کاربردهای آن

1- Schoepel- Sapre

2- Ikoku - Azar

3- Machado - Ikoku

پرداخته است (William, 2009). در میدان مورد مطالعه نیز مطالعه‌ای در خصوص حفاری با هوا صورت نگرفته و تمامی عملیات حفاری بر اساس تجربیات حفاری در میادین قبلی بوده است.

۲-۸-۲ مطالعات گذشته حفاری با کف

کف برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ در عملیات تعمیر^۱ مورد استفاده قرار گرفت. بعد از اولین استفاده از کف به عنوان سیال حفاری در اواخر ۱۹۸۰، ثابت شد که استفاده از سیالات حفاری که فشار هیدرواستاتیک کمتری نسبت به فشار منفذی دارند، سرعت حفاری را افزایش خواهد داد.

حفاری با کف در سازندهای شکسته و منطقه‌هایی که نفوذپذیری بالایی دارند یک ایده آل محسوب می‌شود (William, 2009). مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی کف موضوع مورد توجه در بسیاری از تحقیقات بوده است. در حفاری با سیالات متداول حفاری، امکان محاسبه فشارهای اصطکاکی^۲ و هیدرواستاتیکی به صورت جداگانه و سپس تعیین افت فشار کلی سیستم وجود دارد. در حفاری با کف این چنین روشی ممکن نیست زیرا مؤلفه فشار استاتیکی و اصطکاکی بر روی یکدیگر اثر می‌گذارند.

کراگ و میچل^۳ در سال ۱۹۷۲ اولین کسانی بودند که چارتهایی برای پیدا کردن حجم و فشار تزریقی مورد نیاز برای عملیات حفاری با کف را ایجاد کردند. آن‌ها یک مدل عددی بر اساس معادله‌های اصلاح شده باکینگهام و رینر^۴ ایجاد کردند. آن‌ها فرض کردند طول‌های لوله حفاری با افت فشار ثابت و طول چاه و متغیرهای وابسته به فشار برای هر افزایش فشار متوسط بودند.

بی‌یر و همکاران^۵ (۱۹۷۲) روشی را برای محاسبه ویسکوزیته نیوتنی مؤثر و چگالی کف در حالتی که تحلیل هیدرولیکی سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر ادامه دارد، پیشنهاد دادند. آن‌ها فرض کردند چگالی فاز گازی نادیده گرفته شود. برای اصلاح این فرض بلوور^۶ و کوهلاس^۷ در سال ۱۹۷۴ یک مدل دیگر ارائه

1- Work over

2- Frictional Pressure

3- Krug - Mitchell

4- Buckingham - Reiner

5- Beyer et al

6- Blauer

7- Kohlaas

دادند که طول چاه را در محاسبه در نظر می‌گرفت. آنها برای مشاهده تغییرات در کیفیت، سرعت، ویسکوزیته و فشار، چاه را به بخش‌های مختلف طولی تقسیم کردند. قانون گاز واقعی برای محاسبه قابلیت تراکم گاز استفاده شد.

لرد^۱ (۱۹۷۹) اولین کسی بود که از یک روش پیچیده و متفاوت استفاده کرد. او یک معادله حالت برای قانون گاز طبیعی و بحث موازنه جرم ارائه داد. او ضریب اصطکاک متوسط را برای سیستم دست‌نخورده فرض کرد و به صورت عددی معادله توازن انرژی مکانیکی را حل کرد. برای ایجاد نتیجه‌های خوب این روش لزوماً بهترین مقدار ضریب اصطکاک تخمین زده شد.

اوکپوبیری و ایکوکو^۲ (۱۹۸۶) یک روش شبه تجربی تکراری را برای پیش‌بینی افت فشار ایجاد شده توسط فاز جامد کف ارائه دادند. در این روش جریان کف به صورت ریاضی مانند سیال Ostwald-de Weal قانون توان مدل‌سازی شد و راه‌حلی با استفاده از تکرار کردن در طول بخش‌های لوله حفاری و فضای حلقوی بدست آوردند.

اسپورکر و همکاران^۳ (۱۹۹۱) یک معادله جریان دوفازی جدید برای حل معادله لرد پیشنهاد دادند. به جای معادله حالت گاز حقیقی، آن‌ها معادله ویریا^۴ را پیشنهاد دادند. آن‌ها معادله دیفرانسیل توازن انرژی مکانیکی را حل کردند و یک حالت ساده برای افت فشار جریان کف ارائه دادند.

گاردینر و همکاران^۵ (۱۹۹۸) یک روش دیگر با استفاده از ترکیب مدل حجم مساوی قانون توان و معادله هاگن-پویسل^۶ ارائه دادند. آنها همچنین یک حالت ساده برای افت فشار جریان کف نتیجه گرفتند.

گیو و همکاران^۱ (۲۰۰۳) یک معادله هیدرولیکی به شکل بسته برای فشار مته در عملیات حفاری با کف ارائه دادند. مدل تحلیلی آن‌ها مؤلفه‌های فشار هیدرولیکی و اصطکاک را در چاه‌های عمودی و جهت‌دار بهم وصل کردند. در این مدل ارائه شده جدید برای کف رفتار قانون توان در نظر گرفته می‌شود.

1- Lord

2- Okpobiri - Ikoku

3- Spoerker et al

4- Virial

5- Gardiner et al

6- Hagen-Poiseuille

گورو و همکارش^۲ (۲۰۰۴) یک تئوری برای بهینه هیدرولیک کف معرفی کرد و با این تئوری روشی برای تعیین بهترین ترکیب هوا و سیال تزریقی بر اساس بیشترین سرعت حفاری ارائه داد.

ونگ و همکاران^۳ (۲۰۰۹) با در نظر گرفتن انتقال جرم و شارش جریان از مخزن، یک مدل هیدرولیکی دو لایه یک بعدی برای توصیف مکانیسم انتقال خرده‌های حفاری توسط کف در چاه افقی تشکیل دادند.

اسگوی^۴ (۲۰۱۰) در رساله دکتری خود به صورت آزمایشگاهی به تحلیل کارایی تمیزکاری سیالات حفاری گازدار در چاه‌های افقی، شیب‌دار و قائم پرداخت. یک مدل مکانیکی به کمک نتایج آزمایشگاهی توسعه یافت.

گوماتی و تاکاشی^۵ (۲۰۱۱) به صورت آزمایشگاهی و مدل عددی یک بعدی بر روی افت فشار جریان کف و جریان کف-خرده‌ها در لوله افقی با در نظر گرفتن کیفیت‌های مختلف کف، تحقیق نمودند. آنها سیال کف را به عنوان سیال قانون توان در نظر گرفتند.

۲-۸-۳ مطالعات گذشته مدل حفاری

اسپیر^۶ (۱۹۵۸) اولین کسی بود که یک روش جامع را برای تعیین تکنیک‌های بهینه حفاری ارائه داد. در این مطالعه روابط متقابل تجربی بین سرعت نفوذ، وزن روی مته، سرعت چرخشی، توان هیدرولیکی و قابلیت حفاری سازند نشان داده شد.

مائورر^۷ (۱۹۶۲) معادله سرعت نفوذ را برای مته‌های غلتکی با در نظر گرفتن مکانیزم ایجاد سنگ بدست آورد. معادله بر اساس شرایط تمیز سازی کامل بود جایی که تمام بقایای سنگ از بین دندان مته پاک شود، بررسی می‌شود. رابطه‌ای بین سرعت حفاری، وزن مته و سرعت چرخشی به دست می‌آید که با

1- Guo et al

2- Kuru - Okunsebor

3- Wang et al

4- Osgouei

5- Gumati - Takahshi

6- Speer

7- Maurer

فرض بر اینکه چاه در شرایط کامل تمیز بودن قرار دارد، می‌باشد. این رابطه همچنین بیان می‌کند که رابطه‌های بدست آمده تابعی از عمق حفاری بودند. معادله سرعت حفاری در معادله زیر بیان شده است :

$$\frac{dF}{dt} = \frac{4}{\pi d_b^2} \frac{dV}{dt} \quad (15-2)$$

که: F مترژ حفاری شده توسط مته، t زمان، V حجم سنگ خرد شده و d_b قطر مته است.

گال و وودز^۱ (۱۹۶۳) از اولین محققانی بودند که اثر بهترین وزن مته و سرعت دورانی را برای کمترین هزینه با یک رابطه ریاضی بررسی کردند. آنها گرافها و دستورات عمل‌هایی را برای کاربردهای میدانی برای تعیین بهترین ثابت وزن و سرعت دورانی را تولید کردند. آنها همچنین یک معادله را انتشار دادند که یک رابطه بین سرعت فرسایش مته و سرعت مته تنها برای مته‌های دندان‌های برای سازندهای نرم را نشان می‌داد. در گراف‌های آنها هزینه‌های حفاری، مترژ حفاری، ساعات حفاری و وضعیت دندان‌ها و تحمل خستگی مته را می‌توان محاسبه کرد. نشان داده شد که هزینه‌های حفاری با استفاده از ترکیب‌های پیشنهادی از پارامترهای حفاری کاهش خواهند یافت.

بینگهام^۲ (۱۹۶۵) معادله سرعت نفوذ را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ارائه داد. در معادله او آستانه وزن مته ناچیز در نظر گرفته می‌شود و سرعت نفوذ تابعی از وزن به کار رفته بر روی مته و سرعت چرخش مته بود. توان وزن مته، a_s به طور تجربی تعیین می‌شود. N سرعت چرخش مته و K مقدار ثابت مناسب معادله می‌باشد.

$$R = K \left[\frac{WOB}{d_b} \right]^{a_s} N \quad (16-2)$$

یانگ^۳ (۱۹۶۸) یک سیستم کامپیوتر پیشرفته در محل سایت برای کنترل وزن مته و سرعت دورانی ارائه داد. او یک اصطلاح حداقل هزینه حفاری را با چهار معادله اصلی: سرعت حفاری به عنوان تابعی از وزن مته و بلندی دندان مته، سرعت فرسایش مته و در آخر هزینه حفاری معرفی کرد. با ترکیب معادله‌های معرفی شده برای بدست آوردن بهینه ثابت‌های وزن مته و سرعت چرخشی بهترین راه حل‌ها گزارش می‌شود.

1- Galle - Woods

2- Bingham

3- Young

یکی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده در رابطه با تعیین مدل حفاری توسط بورگوین و یانگ^۱ (۱۹۷۴) بود. آنها یک مدل خطی سرعت نفوذ را ایجاد کردند و یک تحلیل رگرسیون چندگانه را به منظور انتخاب وزن مته، سرعت چرخشی و هیدرولیک مته انجام دادند. آنها در تحلیلشان اثرات استحکام سازند، عمق سازند، تراکم سازند، فشار دیفرانسیلی در سراسر ته چاه، وزن مته، قطر مته، سرعت دوران، سائیدگی مته و هیدرولیک مته را در بر می‌گرفت. آنها دریافتند روش تحلیل رگرسیونی به طور سیستماتیک می‌تواند برای ارزیابی بسیاری از ثابت‌های معادله سرعت نفوذ مفید باشد. آنها از اطلاعات مربوط به حداقل ۲۵ چاه برای بدست آوردن ضرایب پارامترهای ذکر شده در مدل‌شان که $a_8, \dots, a_3, a_2, a_1$ می‌باشد، استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده معادله‌های نسبتاً ساده بهینه‌سازی حفاری می‌تواند هزینه‌های حفاری را تا حدود ۱۰ درصد کاهش دهد.

وارن^۲ (۱۹۸۶) یک مدل سرعت حفاری شامل هر دو اثر تولید تراشه اولیه و فرایند انتقال خرده‌ها را ارائه داد. معادله سرعت نفوذی که وی ارائه داد از دو جمله تشکیل می‌شود، که تنها با فرضیه تمیزسازی کامل ته چاه کار می‌کند. اولین جمله تأمین حداکثر اثر وزن روی مته بدون نرخ نفوذ دندان، دومین جمله نفوذ دندان در سازند را در نظر می‌گیرد.

میسکا^۳ (۱۹۸۸) سه معادله مهم دیفرانسیل سرعت نفوذ، سرعت فرسایش دندان و سرعت فرسایش را ارائه داد. انتظار می‌رفت که معادله‌های داده شده بتواند به طور موفقیت آمیزی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی اهداف استفاده شوند که برخی شرایط اصلی رضایت بخش بودند.

پسیر و فییر^۴ (۱۹۹۲) یک روش انرژی خاص مکانیکی را نشان دادند. آنها تست‌های شبیه ساز در کامپیوتر و تست‌های آزمایشگاهی برای تعیین کمیت و توسعه یک مدل متعادل انرژی در حفاری چاه‌های تحت شرایط فشار هیدرواستاتیکی انجام دادند. آنها یک معادله برای انرژی مکانیکی خاص ارائه دادند. آنها روش‌های شناسایی بهتری را (از ارزیابی متمرکز شده وزن روی مته و سرعت حفاری) برای مشکلات

1- Bourgoyne - Young

2- Warren

3- Miska

4- Pessier - Fear

خستگی مته‌های حفاری پیدا نمودند که بسیار سریع اتفاق می‌افتد و توسط مشاهده مداوم معادله E_s و μ قابل تشخیص است.

$$E_s = WOB \left[\frac{1}{A} + \frac{13.33\mu_s N}{D_B ROP} \right] \quad (17-2)$$

$$\mu = 36 \frac{T}{D_B WOB} \quad (18-2)$$

که A : سطح مقطع چاه، D_B قطر مته، N سرعت چرخش مته و μ_s ویسکوزیته ظاهری سیال است.

کوپر و بین^۱ (۱۹۹۵) یک برنامه شبیه‌ساز حفاری را توسعه دادند. شبیه‌ساز شامل خواصی بود که مهندسين حفاری می‌توانستند تغییر اثرات پارامترهای عملیاتی به منظور بهینه‌سازی عملیات حفاری را تجربه کنند. شبیه‌ساز شامل یک الگوریتم می‌شد که میزان سرعت نفوذ و سرعت سایش مته را تعیین می‌کرد. مجموع زمان و قیمت همراه با هزینه تمام شده هر فوت و هزینه مته در طول اجرای حفاری در دسترس هستند.

باراگان و همکاران^۲ (۱۹۹۷) بر روی یک مطالعه پژوهشی بر اساس روشی برای پیدا کردن حداقل مقدارها به دنبال بهینه‌سازی حفاری و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و به خصوص توسعه الگوریتم عددی کار کردند. آنها این روش را روش اکتشافی نام بردند و توسط آن معادله‌های نرخ نفوذ توسعه یافته توسط مور، مائورر، و بینگهام را آنالیز کردند. آنها پنج روش مختلف بهینه‌سازی حفاری را مورد توجه قرار دادند (با استفاده از بهینه‌سازی وزن روی مته و سرعت حفاری) از قبیل؛ راندن مته تنها در سازند همگن و ناهمگن، راندن مته در بخش‌های حفاری همگن و ناهمگن، و سرانجام بهینه‌سازی برای هر سازند همگن و مته خاص. آنها نتیجه گرفتند که بهینه‌سازی بخش‌های چاه می‌تواند از راندن تنهای

1- Cooper - Bihn

2- Barragan et al

مته اقتصادی تر باشد. آنها دریافتند روش اکتشافی می‌تواند برای بهینه‌سازی حفاری‌های جهت‌دار مناسب باشد.

اگکان^۱ (۲۰۰۲) متغیرهای قابل کنترل حفاری را که بر روی سرعت حفاری اثر دارد بررسی کرد. وزن گل، وزن روی مته، سرعت چرخشی، نوع مته و هیدرولیک‌ها عمده متغیرهای قابل کنترل هستند. انتخاب مناسب متغیرهای قابل کنترل برای پیشرفت قابل توجه حفاری گزارش شده است. یک محدودیت سرعت حفاری بالا یا مفهوم محدودیت فنی معرفی شده است که نمی‌تواند بدون خطر ایمنی عملیات حفاری فراتر رود. برای مثال وزن گل انتخابی نیاز نیست کمتر از مقداری که منجر به فوران چاه یا ریزش دیواره چاه می‌شود، باشد (پایداری دیواره چاه). پارامترهای وزن روی مته و سرعت چرخش نیاز دارند با توجه به حداقل هزینه عملیاتی مته و پایداری رشته حفاری مقدار ممکن ماکزیمم را داشته باشند. مقدار جریان باید در جایی که یک مقدار بهینه با توجه به هیدرولیک مته و تمیزسازی چاه وجود دارد، انتخاب شود.

اوزبایگلو و اومورلو^۲ (۲۰۰۵) یک مطالعه را که در آن پارامترهای حفاری به صورت ریاضی به منظور کاهش هزینه بهینه شده‌اند، انجام دادند. آنها فرض کردند که وزن مته، سرعت چرخشی، نوع مته و فرسایش آن، و هیدرولیک مته اثر مستقیم بر روی نرخ نفوذ می‌گذارند. سپس یک معادله تحلیلی هزینه حفاری با در نظر گرفتن یک معادله غیر خطی نرخ نفوذ تعریف شد و پارامترهای حفاری داده‌های میدانی با استفاده از معادله تعریف شده به وسیله مدل‌های ریاضی مشخص، بهینه شد. آنها تصریح کردند که هزینه‌های حفاری تا چهار برابر کاهش یافته بود.

شیرکاووند و هارلند^۳ (۲۰۰۹) مدل مکانیکی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ مته در حفاری فروتعدالی ارائه دادند. در این مطالعه بر روی تعیین مقاومت سنگ در حفاری فروتعدالی بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و حفاری تمرکز شده است. همچنین به پیش‌بینی فشار ته چاهی در حفاری فروتعدالی با

1- Akgun

2- Ozbayoglu - Omurlu

3- Shirkavand - Hareland

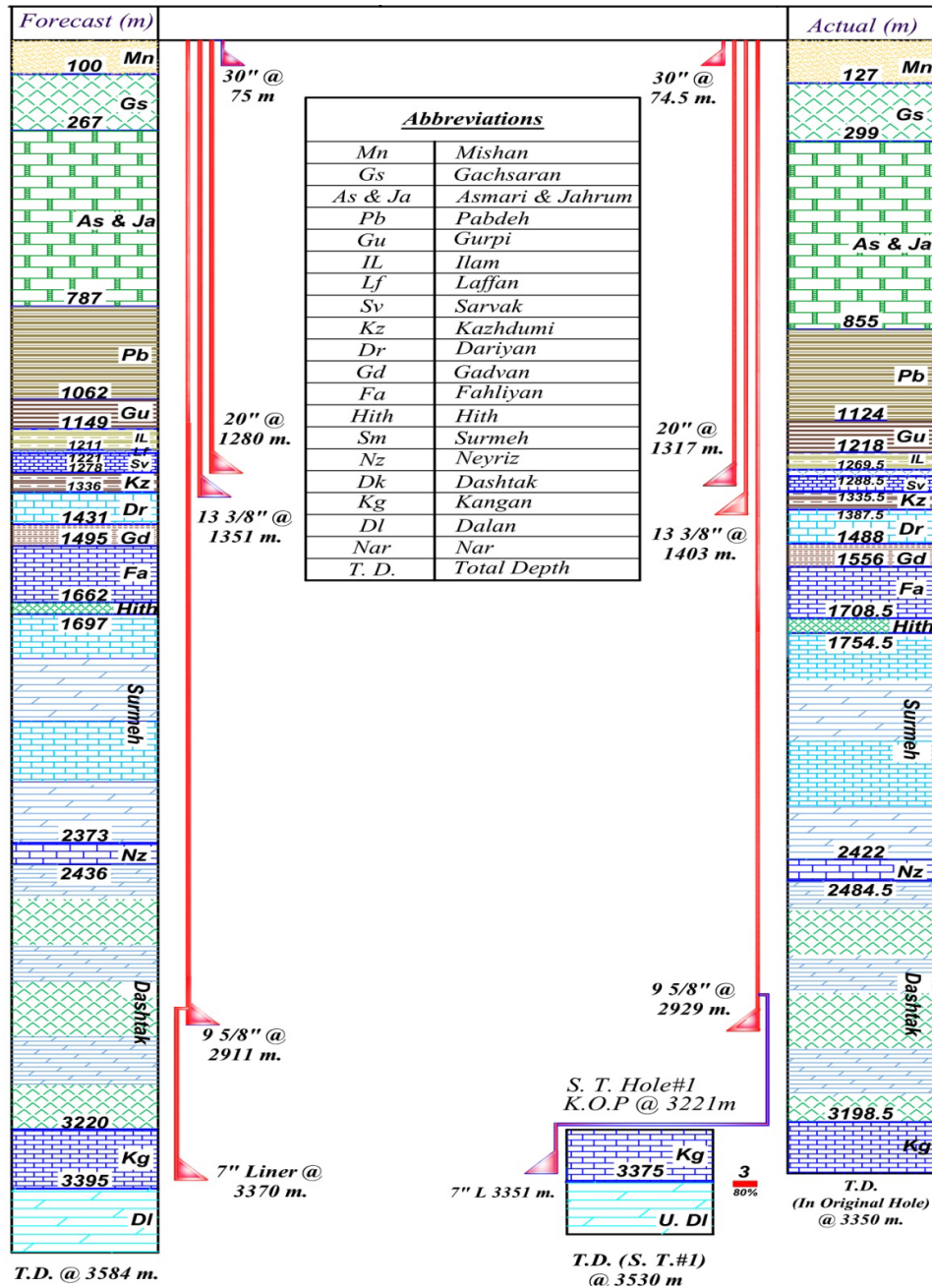
کف پرداختند. آنها تصریح کردند که این کار باعث ایجاد ارتباط بین برنامه پیش‌بینی فشار ته چاهی و مدل مته حفاری در حفاری فرو تعادلی خواهد شد.

رحیم زاده و همکاران^۱ (۲۰۱۰) به مقایسه کلی مدل‌های ایجاد شده برای سرعت حفاری در یکی از میادین خلیج فارس پرداختند. آنها ذکر کردند که معادله‌های سرعت حفاری بدست آمده در این مقاله در چندین فواصل عمقی بر اساس دو مدل یانگ - بورگوین و واررن می‌باشد بعد از مقایسه این مدل‌ها به ایجاد یک مدل جدید با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداختند. آنها تصریح کردند که نتیجه این کار کاهش زمان و هزینه در حفاری چاه‌های جدید بوده است.

۹-۲ معرفی میدان مورد مطالعه

این مطالعه در میدان شانول واقع در حوضه زاگرس جنوبی صورت گرفته است. میدان گازی شانول در استان فارس در منطقه فارس ساحلی حدود ۲۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز بین چین‌های وراوی، بندوبست و باووشت قرار دارد. میدان شانول در سال ۱۳۷۴ با حفر چاه ۱ به عنوان مخزن گاز دهرم با عمق ۳۲۸۴ متر کشف شد و چاه شماره ۲ آن در سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۹ با عمق ۴۲۳۰ متر حفر گردید (شرکت نفت مرکزی ایران، ۱۳۸۳). سازندهای این میدان در شکل (۲-۱۲) آورده شده است. میدان شانول به شکل تاق‌دیس متقارن با سطح ناحیه در سازند آسماری و بالای سازند کنگان است. گاز در این میدان در واحد J سازند دشتک تا سازند دالان بالایی قرار دارد.

1- Rahimzadeh et al



شکل ۲-۱۲ چینه‌شناسی و سازندهای میدان شانول (شرکت نفت مرکزی ایران، ۱۳۸۳)

چینه‌شناسی سازندهای این میدان به ترتیب از سن جدید به قدیم شامل (شرکت نفت مرکزی

ایران، ۱۳۸۳):

- سازند میشان (۰ تا ۱۲۷ متری): این سازند دارای لایه ضخیمی سنگ آهک^۱ خاکستری به قهوه‌ای کم رنگ می‌باشد. (میوسن پایینی به میانی)
- سازند گچساران (۱۲۷ تا ۲۹۹ متری): این سازند شامل مارل متمایل به خاکستری و سنگ آهک (بخش مول) و مقداری دولومیت خاکستری می‌باشد. (میوسن پایینی)
- سازند آسماری (۲۹۹ تا ۳۵۴ متری): سازند آسماری شامل سنگ آهک متخلخل کرم و قهوه‌ای رنگ و قسمت بالایی این سازند از سنگ آهک دولومیتی می‌باشد. مرز سازندهای آسماری و جهرم بر هم منطبق است. (اولیگوسن تا میوسن پایینی)
- سازند جهرم (۳۵۴ تا ۸۵۵ متری): قسمت بالایی جهرم تا ۵۰ متری از سنگ آهک کرم و قهوه‌ای با کمی تخلخل و قسمت پایینی آن کریستال دولومیت ریز به درشت با رنگ متمایل به خاکستری تشکیل شده است. (ائوسن پایینی و بالایی)
- سازند پابده (۸۵۵ تا ۱۱۲۴ متری): اساس این سازند را سنگ آهک خاکستری با رگه‌هایی از سنگ آهک شیلی خاکستری رنگ تشکیل داده است. (پالئوسن تا ائوسن پایینی)
- سازند گورپی (۱۱۲۴ تا ۱۲۱۸ متری): سازند گورپی از سنگ آهک مایل به قهوه‌ای با سیلیکات آهن^۲ در بالا و میانه سازند تشکیل شده است. (کامپانین تا مائستریچتین)
- سازند ایلام (۱۲۱۸ تا ۱۲۶۹/۵ متری): سازند از سنگ آهک کرم و مایل به خاکستری رنگ با تخلخل کم به متوسط تشکیل شده است. (سنتونین تا کامپانین)
- بخش شیلی لافان (۱۲۶۹/۵ تا ۱۲۸۸/۵ متری): این بخش از مارل خاکستری رنگ متوسط تا نرم، شیل و کمی سنگ آهک تشکیل شده است. (کوناکین تا سنتونین)
- سازند سروک (۱۲۸۸/۵ تا ۱۳۳۵/۵ متری): بطور کلی این سازند از سنگ آهک قهوه‌ای، قهوه‌ای روشن و کرم با تخلخل ضعیف تشکیل شده است. به علت میکروفوسیل در این بخش، ناحیه مادود و بالایی این سازند به علت بالا آمدگی ناحیه رسوبی شکل نگرفته است. (سنومائین تا آلبین)

1-limestone

2-Glauconitic

- سازند کژدمی (۱۳۳۵/۵ تا ۱۳۸۷/۵ متری): این سازند از شیل‌های خاکستری، سبز و قهوه‌ای با رگه‌های سنگ آهک خاکستری رنگ تشکیل شده است. در قاعده آن یک لایه ماسه سنگ خاکستری و قهوه‌ای با دانه‌بندی متوسط تا درشت گلوکونیتی قرار گرفته است. (آلبین تا سنومائین)
- سازند داریان (۱۳۸۷/۵ تا ۱۴۸۸ متری): شروع این سازند با سنگ آهک کرم و قهوه‌ای رنگ متراکم متخلخل می‌باشد. واحد شیل با ۳۰ متر ضخامت در این سازند می‌باشد. (آپتین)
- سازند گدوان (۱۴۸۸ تا ۱۵۵۶ متری): این سازند از شیل خاکستری مایل به سبز، مارل و مقداری سنگ آهک در بخش خلیج تشکیل شده است. بخش خلیج از دیگر ساختارها باریک‌تر می‌باشد که در قسمت میانی این سازند قرار گرفته است. (بارمین تا آپتین)
- سازند فهلیان (۱۵۵۶ تا ۱۷۰۸/۵ متری): قسمت بالایی سازند فهلیان از سنگ آهک خاکستری نخودی و گاهی خاکستری سیلیت‌دار و قسمت پایین آن حدود ۳۵ متر از کریستال دولومیت با ابعاد ریز به متوسط و دیگر قسمت سازند (وسط) از سنگ آهک سفید و مایل به سفید تشکیل شده است. (نفوکومین)
- سازند هیث (۱۷۰۸/۵ تا ۱۷۵۴/۵ متری): ابتدا این سازند با پیدایش انیدریت سفید رنگ و بلورین مشخص می‌شود و متشکل از لایه‌هایی از دولومیت قهوه‌ای رنگ و انیدریت سخت می‌باشد. (ژوراستیک بالایی)
- سازند سورمه (۱۷۵۴/۵ تا ۲۴۲۲ متری): این سازند از دانه‌های ریز تا درشت دولومیت قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای خاکستری رنگ و سنگ آهک تشکیل شده است که شامل واحدهای زیر می‌باشد: (ژوراستیک میانی)
- ناحیه عرب (۱۷۵۴/۵ تا ۲۰۵۴): تشکیل شده از دولومیت قهوه‌ای رنگ، دانه‌های درشت با بستری از انیدریت. این ناحیه با سازند عرب در عربستان سعودی معادل شده است.
- بخش مند (۲۰۵۴ تا ۲۱۴۴ متری): سنگ آهک سفید، قهوه‌ای کم رنگ به خاکستری و بستری از شیل این بخش را تشکیل می‌دهند.

- سورمه شیلی پایین (۲۲۸۵ تا ۲۲۹۱ متری): همانطور که از اسم این لایه پیداست از شیل خاکستری و مایل به خاکستری با ضخامت حدود ۵ متر تشکیل شده است.
- بستر لیتوتیسیس (۲۳۵۷ تا ۲۴۲۲ متری): ۱۵ متر پایه سازند سورمه از دولومیت تشکیل شده است.
- سازند نیریز (۲۴۲۲ تا ۲۴۸۴/۵ متری): قسمت بالای سازند (حدود ۱۵ متر از بالا) را دولومیت و قسمت پائینی را شیل‌های خاکستری تا سیاه رنگ تشکیل می‌دهد. (ژوراستیک پائینی (لیاس))
- سازند دشتک (۲۴۸۴/۵ تا ۳۱۹۸/۵ متری): سازند دشتک از چندین واحد C, D, E, F, G, H, I, J, Blue zone, k و شیل آغار تشکیل شده است. دولومیت سپیدار و واحد B ممکن است به علت دگر شیبی ژوراستیک و دوره پسرقت، فقدان شوند. (پایین تا متوسط تریاس)
- واحد C (۲۴۸۴/۵ تا ۲۷۲۱ متری): این واحد از سازند دشتک بر اساس دولومیت و بستری از انیدریت تشکیل شده است.
- واحد D تا G (۲۷۲۱ تا ۲۸۸۱ متری): این لایه بستری از انیدریت و دولومیت در بالای قسمت لایه و همچنین مقداری شیل با بستری از سنگ رس می‌باشد.
- واحد H تا بخش شیل آغار (۲۸۸۱ تا ۳۱۹۰ متری): این واحد نیز از سطح مشترک انیدریت و دولومیت و بستر نازکی از شیل ایجاد شده است. اختلاف میدان شانول با دیگر تاقدیس‌ها فقدان شیل قرمز در واحد I است. تفاوت دیگر، موجودیت سنگ آهک در واحد K میدان شانول می‌باشد.
- شیل آغار (۳۱۹۰ تا ۳۱۹۸/۵ متری): این سازند از شیل متمایل قهوه‌ای به قرمز رنگ با دولومیت بین لایه‌ای همراه با تخلخل ایجاد شده است.
- سازند کنگان (۳۱۹۸/۵ تا ۳۳۷۵ متری): قسمت بالایی و پائینی سازند کنگان تشکیل شده از سنگ آهک سفید به سفید مایل خاکستری رنگ، سنگ گل و دولومیت با رنگ قهوه‌ای روشن

می‌باشد. قسمت میانی سازند از بستر شیل خاکستری مایل به آبی رنگ با سنگ آهک درون لایه‌ای ایجاد شده است. (تریاس)

- سازند دالان بالایی (۳۳۷۵ تا ۳۵۳۰ متری): این قسمت شامل دولومیت کرم به قهوه‌ای روشن رنگ و کرم مایل به سفید تشکیل شده است. (پرامین)

در این مطالعه از تعداد ۵۵۰۵ داده دو حلقه چاه شماره‌های ۶ و ۱۰ میدان شانول با استخراج اطلاعات از گزارشات روزانه حفاری استفاده شده است. چاه شماره ۶ شانول در سال ۱۳۸۳ تا عمق ۳۵۳۰ متری و چاه شماره ۱۰ آن در سال ۱۳۸۷ تا عمق ۳۲۸۷ متری حفاری شده‌اند. در هر دو چاه این میدان در حفرات ۲۶، ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ اینچی در حدود ۲۹۰۰ متر از روش‌های مختلف حفاری با هوا استفاده گردیده است. جدول زیر نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه را در اعماق متفاوت نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴ پارامترها و نمونه داده چاه‌های ۶ و ۱۰ میدان شانول

شماره چاه	عمق (متر)	وزن روی مته (کیلو پوند)	سرعت چرخش (RPM)	دبی سیال تزریقی (گالن بر دقیقه)	دبی هوای تزریقی (CFM)	فروسدگی دندان مته	سختی سازند	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۶	۷۶	۱۰	۸۰	۱۳۰	۴۰۰۰	۰	۴	۲/۱۱
۶	۱۵۰	۱۸	۱۰۵	۱۰۰	۴۰۰۰	۱	۴	۷/۸۱
۶	۲۰۰۰	۱۱	۹۵	۱۰۰	۵۰۰۰	۶	۶	۷/۲
۶	۲۲۰۰	۱۲	۹۵	۱۱۰	۵۰۰۰	۰	۶	۸/۲۱
۶	۲۷۰۰	۱۱	۹۵	۱۰۰	۵۰۰۰	۲	۸	۶/۵۵
۶	۲۸۰۰	۲۳	۹۵	۱۰۵	۶۰۰۰	۱	۸	۵/۵۳
۱۰	۲۰۳	۱۵	۱۲۰	۷۳	۳۰۰۰	۰	۴	۳/۶۶
۱۰	۳۵۰	۱۵	۱۲۰	۷۳	۳۷۰۰	۱	۴	۴/۷۸
۱۰	۱۶۰۰	۱۵	۱۲۰	۶۸	۴۶۰۰	۳	۶	۹/۱
۱۰	۱۸۲۰	۱۵	۱۲۰	۹۵	۵۱۰۰	۰	۶	۷/۲۵
۱۰	۲۸۰۰	۱۵	۱۲۰	۱۷۵	۵۱۰۰	۴	۸	۴/۲

فصل سوم

معرفی روشهای طراحی آزمایشات مورد استفاده

۳-۱ مقدمه

طراحی آزمایشات^۱ روشی برای انجام نظاممند مجموعه‌ای از آزمایشات است که هدف آن بدست آوردن نتایج قابل اطمینان بر مبنای تعداد محدودی از مشاهده است. طراحی آزمایشات برای این منظور از ابزارهای آماری استفاده می‌کند. عمده‌ترین ابزارهای این حوضه به دو گروه ابزارهای طراحی و تحلیل آزمایشات تقسیم‌بندی می‌شوند. برای طراحی آزمایشات روش‌هایی مثل روش فاکتوریال کامل^۲، روش سطح پاسخ^۳، روش تاگوچی^۴ و غیره وجود دارند. در این فصل ابتدا تعریف کلی از روش طراحی آزمایشات را خواهیم داشت و در ادامه انواع روش‌های مختلف طراحی آزمایشات را معرفی خواهیم کرد. سپس به این مسئله می‌پردازیم که چرا از روش طراحی آزمایشات استفاده می‌کنیم و در نهایت به مقایسه‌ای بین روش طراحی باکس-بنکن^۵ و طراحی فاکتوریال کامل، خواهیم پرداخت.

۳-۲ طراحی آزمایشات

روش تعریف و بررسی تمامی شرایط ممکن در یک آزمایش شامل چند فاکتور "طراحی آزمایشات" نامیده می‌شود. طراحی آزمایشات شامل تجزیه و تحلیل‌های آماری از یک مجموعه آزمایش‌ها است که در آن تغییرات عمدی در فاکتورهای فرایند و اثرات مشاهده شده از آن برای تعیین رابطه بین متغیرهای فرایند و در نهایت بهبود فرایند استفاده می‌شود. بعضی متغیرهای فرایند قابل کنترل و سایر آنها غیرقابل کنترل هستند (گرچه می‌توانند در شرایط آزمایش قابل کنترل باشند). در بعضی موارد این عوامل غیرقابل کنترل را عامل‌های نوفه‌ای (اغتشاشی^۶) می‌نامند. اغلب مسائل موجود در حوزه‌های علمی و مهندسی نیاز به مطالعه سیستم و انجام آزمایش دارد. از جمله کاربرد های این علم می‌توان به کنترل کیفیت آماری، طراحی آزمایشات، داده کاوی و پیش‌بینی اشاره نمود. طراحی آزمایش‌ها یکی از قوی‌ترین فنون بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری است. در این شیوه از طریق انجام برخی آزمایش‌ها، آگاهانه

1- Design of Experiment

2- Full factorial

3- Response surface method (RSM)

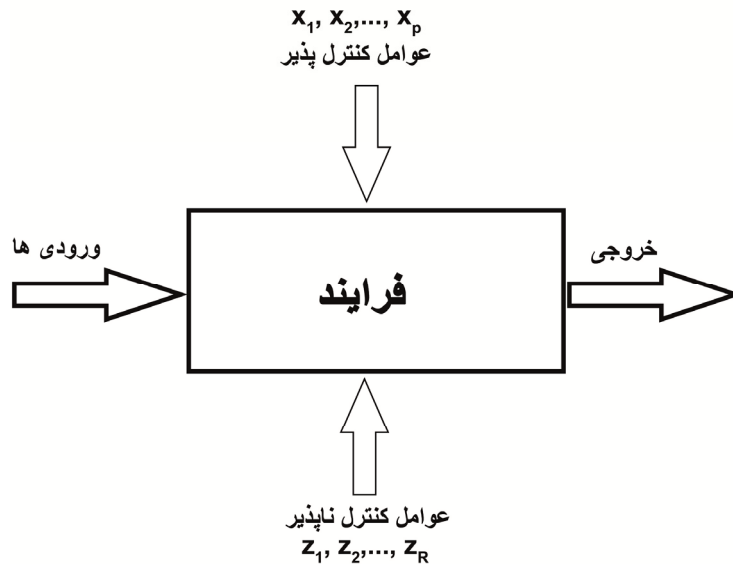
4- Taguchi design

5- Box-behnken design

6- Noise

تغییراتی در فرایند یا سیستم اعمال می شود تا تاثیر آنها در ویژگی های عملکردی یا پاسخ فرایند یا سیستم به آنها، مورد بررسی قرار گیرد (Douglas and George, 2011).

شکل ۱-۳ فرایند یا سیستم تحت مطالعه را به وسیله مدلی که نشان داده شده معرفی می کند.



شکل ۱-۳ فرایند مطالعه طراحی آزمایشات (Douglas and George, 2011)

۳-۳ دلایل استفاده از طراحی آزمایشات

به طور کلی دلایل استفاده از طراحی آزمایشات می تواند شامل موارد زیر باشد

(Douglas and George, 2011):

۱. تعیین متغیرهایی که بیشترین تاثیر را در پاسخ دارند.
۲. تعیین مقادیر متغیرهای مؤثر بر پاسخ، به طوری که پاسخ همیشه نزدیک مقداری اسمی مطلوب خود باشد.
۳. تعیین مقادیر متغیرهای مؤثر بر پاسخ به طوری که تغییرپذیری پاسخ کم باشد.
۴. تعیین مقادیر متغیرهای مؤثر بر پاسخ به طوری که اثرات متغیرهای کنترل ناپذیر حداقل شوند.
۵. ارائه راهی جهت اندازه گیری تغییرات طبیعی
۶. اجازه تجزیه و تحلیل واضح از اثرات پیچیده
۷. کارآمدترین راه برای استخراج اطلاعات مورد نیاز در کمترین زمان و با حداقل هزینه

با رسیدن به اهداف فوق می‌توان به موارد زیر که از کاربردهای طراحی آزمایشات است، دست

یافت:

۱- افزایش بازده تولید ۲- کاهش زمان ۳- کاهش تغییرپذیری ۴- کاهش هزینه

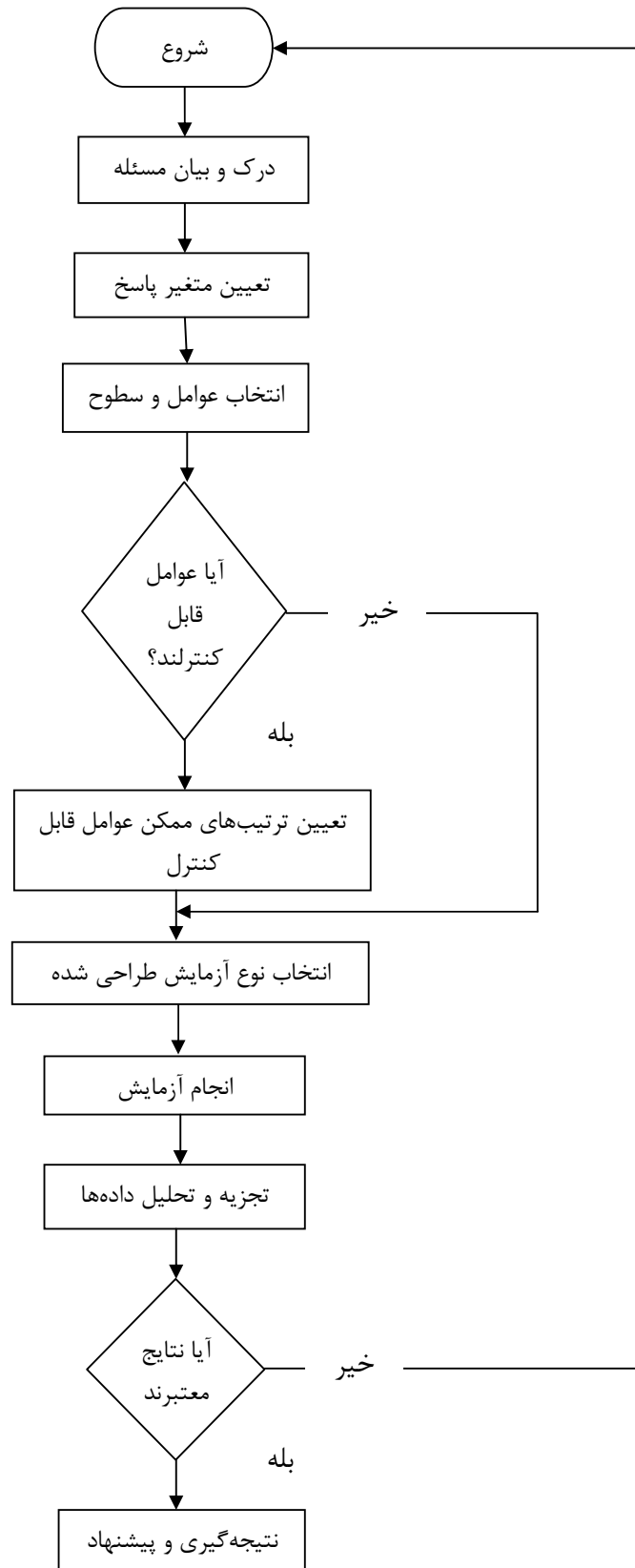
سپس باید بتوان به سوالات زیر نیز جواب داد:

- فرمول ترکیب مطلوب چیست؟
- تغییر بهینه، در متغیرها کدام است؟
- کدام متغیر در فرایند حساس است؟
- برای عملکرد مناسب، چه دامنه تغییراتی برای هر متغیر است؟

۳-۴ مراحل طراحی یک آزمایش

روش‌های طراحی آزمایشات از روش‌های مهم در تعیین عوامل موثر و بهبود فرایند هستند. به منظور استفاده از این روش‌ها باید قبل از انجام آزمایش درک دقیق و واضحی در مورد هدف آزمایش، عامل‌هایی که مورد مطالعه قرار می‌گیرند، چگونگی نتیجه‌گیری در مورد آزمایش و حداقل یک درک کیفی از چگونگی تجزیه و تحلیل داده‌ها داشته باشیم (Douglas and George, 2011).

مهمترین روش‌های موثر در طراحی آزمایشات، تکنیک‌های آماری می‌باشد که از معمول‌ترین آنها، روش‌های آماری نظیر آنالیز واریانس یکطرفه و دوطرفه، روش‌های طرح‌های عاملی (فاکتوریال)، روش رگرسیون و می‌باشد. در شکل (۳-۲) فلوجارت روش طراحی آزمایشات نشان داده شده است. در ادامه به شرح مختصر بخش‌های مختلف آن می‌پردازیم.



شکل ۳-۲ فلوجارت روش طراحی آزمایشات (Douglas and George, 2011)

۳-۴-۱ درک و بیان مسئله

در عمل، غالباً تشخیص اینکه یک مسئله را می‌توان از طریق طراحی آزمایش‌ها حل کرد، بسیار دشوار است. به همین علت شاید نتوان بطور واضح مسئله را بیان کرد. با این حال باید بدانیم که ارائه کلی نظرات به طور کامل در مورد مسئله و اهداف آزمایش ضرورت دارد.

معمولاً تهیه اطلاعات باید قشر وسیعی از افراد نظیر واحدهای مهندسی، اطلاعات اپراتورها، اطلاعات کسانی که معمولاً نادیده گرفته می‌شوند و غیره را در برگیرد. غالباً بیان صریح و واضح مسئله و اهداف آزمایش در درک بهتر فرایند و حل مسئله کمک به سزائی خواهد داشت.

۳-۴-۲ تعیین متغیر پاسخ

در انتخاب متغیر پاسخ، شخص آزمایشگر باید اطمینان داشته باشد که متغیر انتخاب شده اطلاعات مفیدی را در مورد فرایند مورد مطالعه فراهم می‌نماید. کارائی ابزار جهت اندازه‌گیری یا مشخص کردن مقدار متغیر پاسخ بسیار مهم می‌باشد. اگر ابزار اندازه‌گیری کارائی خوبی نداشته باشد، بطور مثال ضعیف عمل کردن شبیه‌سازها یا دقیق نبودن اپراتور در تشخیص مقدار پاسخ، آنگاه آزمایش فقط بوجود اثرات بزرگ پی خواهد برد و یا اینکه آزمایش باید تکرار شود.

۳-۴-۳ انتخاب عامل‌ها و سطوح

محقق باید عوامل و دامنه‌های مربوط به تغییرات آنها و سطوح خاصی که برای آزمایش در نظر گرفته خواهد شد را انتخاب نماید. به منظور انجام چنین کاری باید شناخت و دانش کافی در مورد فرایند وجود داشته باشد. معمولاً این شناخت ترکیبی از تجارب عملی و درک تئوری است.

کلیه عواملی که ممکن است به گونه‌ای در آزمایش نقش مهمی داشته باشند باید مورد بررسی قرار گیرند تا از تاکید بیش از حد در مورد عامل‌هایی که ممکن است تحت نفوذ تجارب قبلی واقع گردند، اجتناب گردد. وقتی که هدف غربال عامل‌ها یا ویژگی شناسی فرایند باشد معمولاً بهتر است که تعداد سطوح عامل‌های مورد مطالعه را کم در نظر بگیریم.

۳-۴-۴ انتخاب نوع آزمایش طراحی شده

انتخاب نوع طرح شامل انتخاب تعداد دفعاتی که آزمایش باید تکرار شود، تعیین ترتیب صحیح انجام آزمایش و تعیین محدودیت‌هایی نظیر بلوک‌بندی و غیره، می‌گردد.

۳-۴-۵ انجام آزمایش

روش اجرای آزمایش باید کاملاً تصادفی باشد به گونه‌ای که اثر عوامل غیر قابل کنترل حداقل گردد. در مواردی که از شبیه‌ساز استفاده می‌شود، حالات آزمایش (که در این مطالعه از نرم‌افزار مینی تب جهت تعیین حالات آزمایش به صورت کاملاً تصادفی استفاده شده) را به شبیه‌ساز می‌دهیم و برای تک تک این حالات متغیر پاسخ را بدست می‌آوریم.

۳-۴-۶ تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش‌های آماری را باید برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده کرد تا نتایج حاصل معتبر و عاری از قضاوت‌های شخصی باشد. روش‌های نموداری ساده نیز نقش مهمی در تعبیر و تفسیر داده‌ها ایفا می‌کند. که از مهمترین آنها می‌توان به آنالیز واریانس اشاره کرد.

۳-۴-۷ تعیین اعتبار نتایج

بعد از گرفتن نتایج می‌بایست آنها را اعتبار سنجی نمود که یکی از روش‌های معتبر، روش آنالیز باقی‌مانده‌ها برای آزمایش می‌باشد.

تمامی این مراحل، مراحل فرایند یک طراحی آزمایشات به صورت کلی است. در فصول بعدی به صورت جزئی‌تر و کاربردی به این مسئله بحث می‌پردازیم.

۳-۵ انواع روش طراحی آزمایشات

طراحی آزمایشات دارای روشهای متفاوتی مثل طراحی فاکتوریال، طراحی سطح پاسخ، طراحی مخلوط و طراحی تاگوچی می باشند که باید بر اساس نیازمان نوع تکنیک طراحی آزمایش را انتخاب کنیم (MiniTab, 2012). در ادامه روش طراحی فاکتوریال کامل و روش سطح پاسخ، به علت استفاده بیشتر در مطالعه حاضر توضیح داده می شود.

۳-۵-۱ طراحی فاکتوریال

طراحی فاکتوریال یا همان طراحی عاملی برای بررسی همزمان اثرها بکار می رود که ممکن است چندین فاکتور در فرایند باشند. بدون استفاده از آزمایشات فاکتوریال، اثرات متقابل مهم ممکن است کشف نشده باقی بمانند. طراحی فاکتوریال شامل چند بخش می باشد (MiniTab, 2012):

- طراحی کامل فاکتوریال (دو سطحی و چند سطحی)
- طراحی کسری فاکتوریال^۱
- طراحی اسپلیت-پلات^۲
- طراحی پلاکت-برمن^۳

۳-۵-۱-۱ طراحی کامل فاکتوریال

در آزمایش فاکتوریال کامل، پاسخ از ترکیب تمامی سطوح عاملهای آزمایش اندازه گیری می شود. هر حالت آزمایش را "اجرا"^۴، پاسخ اندازه گیری شده را "مشاهده" و مجموع اجراها را "طراحی" می نامند. در طراحی در دو سطح هر عامل تنها دارای دو سطح (به این منظور که تنها دارای یک مینیمم و یک ماکزیمم) می باشد. سطوح در طراحی آزمایشات به منظور محدوده تغییرات برای هر فاکتور است. اگر فاکتوری دارای سه سطح تعریف شود دارای یک حد مینیمم، متوسط و ماکزیمم است. قابل ذکر است که طراحی فاکتوریال در دو سطح قادر به کشف کامل فضای بین دو سطح عامل نیست. آنها اطلاعات مورد استفاده را برای نسبت یافتن تعداد کمی اجرا بر عامل، فراهم می کنند.

1- Fractional factorial design

2- Split- plot design

3- Placket-Burman design

4- Run

طراحی فاکتوریل زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که هر فاکتور دارای بیش از ۳ سطح باشد. در این روش پارامترهای مورد استفاده در طراحی می‌توانند هر سطحی داشته باشند. بطور مثال پارامتر A ممکن است دارای ۳ سطح باشد و پارامتر B دارای ۵ سطح باشد، قابل ذکر است که تعداد سطوح نمی‌تواند بیش از ۱۰۰ سطح باشد. روش فاکتوریل کامل بر خلاف روش باکس-بنکن علاوه بر اثرات منفرد پارامترها، فقط اثرات متقابل را بین پارامترها بررسی می‌کند و اثرات مربعیات^۱ پارامترها را بررسی نمی‌کند. اگر فاکتورها در این طراحی دارای دو سطح باشند تعداد اجرا آزمایش به صورت 2^K بدست می‌آید. در این مورد اگر تعداد پارامترها (K) زیاد باشد، نیاز به تعداد زیادی اجرا خواهیم داشت ($N=2^K$). بطور مثال اگر دارای سه پارامتر باشیم، ضرایب رگرسیون به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (۱-۳)$$

که در آن:

b_{123} : ضریب رگرسیون اثر متقابل سه‌گانه

b_{12}, b_{13}, b_{23} : ضرایب رگرسیون اثرات متقابل دوگانه

b_1, b_2, b_3 : ضرایب رگرسیون خطی

b_0 : عدد ثابت

مقدار b_i بیشتر در فرمول به این معنی است که آن پارامتر دارای ضریب بزرگتر بوده و بر پاسخ اثر بیشتری دارد. اگر ضریب b_i دارای علامت مثبت باشد، به این معنی است که افزایش مقدار پارامتر با ضریب مثبت، افزایش پاسخ را در بر خواهد داشت و علامت منفی ضریب، به این معنی است که افزایش مقدار پارامتر با ضریب منفی، کاهش مقدار پاسخ را به همراه خواهد داشت (MiniTab, 2012).

تعداد ضرایب رگرسیون خطی همان تعداد فاکتور k می‌باشد. جهت تعیین تعداد اثرات متقابل

فاکتورها از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$C_k^m = \frac{k(k-1)(k-2)\dots(k-m+1)}{1 \times 2 \times 3 \times \dots \times m} \quad (۲-۳)$$

که در آن: K تعداد پارامترها و m تعداد پارامترها در حالت متقابل می‌باشند.

1-Square effect

۳-۵-۲ طراحی سطح پاسخ

طراحی سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی می‌باشد و زمانی که پاسخ تحت تاثیر چندین عامل قرار می‌گیرد استفاده می‌شود. هدف در این طراحی بهینه کردن پاسخ می‌باشد. این طراحی برای بدست آوردن مدل رگرسیونی از درجه دوم استفاده می‌شود همچنین جهت مشخص کردن عامل‌های مختلف که با تغییر در آنها پاسخ تغییر چشم‌گیری می‌کند، بکار می‌رود. این روش اغلب زمانی بکار می‌رود که عوامل قابل کنترل را شناسایی کرده و قصد داریم برای پیدا کردن مقادیر (تنظیمات) این عامل‌ها برای بهینه ساختن پاسخ اقدام کنیم. این روش معمولاً برای این انتخاب می‌شوند که ما احتمال منحنی بودن (درجه دوم به بالا) سطح پاسخ را می‌دهیم. بطور کلی از کاربردهای این روش بشرح زیر است (MiniTab, 2012):

- پیدا کردن تنظیم عامل‌ها که نتیجه برای پاسخ بهترین شود.
- پیدا کردن تنظیم عامل‌ها که بتوان برآورد عمل یا مشخصات فرایند داشت.
- مشخص کردن حالات یا مقادیر جدید برای عملیات که در بازده پیشرفت داشته باشیم و حالات صحیح را بیابیم.
- ایجاد مدل بین مقادیر عامل‌ها و پاسخ.

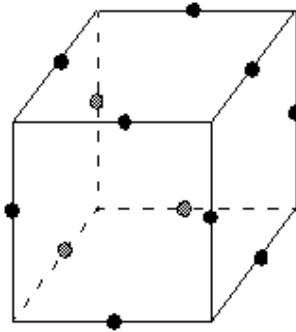
این تکنیک طراحی دارای دو روش است که به طراحی باکس-بنکن و طراحی عنصر مرکزی^۱ معروف هستند. طراحی آزمایش باکس-بنکن برای روش سطح پاسخ، توسط جورج باکس و دونالد بنکن در سال ۱۹۶۰ اختراع شد (Khosravi et al, 2011). شکل (۳-۳)، می‌تواند حالت ساده‌ای از این روش را به عنوان طراحی سه عامل در سه سطح معرفی کند.

در این طراحی می‌توان ضرایب موثر درجه اول و دوم را تخمین زد زیرا طراحی باکس-بنکن نقاط طراحی کمتری نسبت به روش طراحی عنصر مرکزی دارد پس دارای تعداد اجرای کمتر با تعداد فاکتور یکسان می‌باشد که این امر بسیار مفیدتر خواهد بود. یکی دیگر از دلایلی که سودمند بودن روش طراحی باکس-بنکن را اثبات می‌کند، نداشتن نقاط محوری^۲ است و این امر باعث می‌شود ناحیه طراحی ما

1- Central composite design

2- Axial points

کاملاً کاربردی و اصطلاحاً امن باشد. طراحی عنصر مرکزی دارای نقاط محوری خارج از مکعب می باشد که ممکن است این نقاط خارج ناحیه طراحی و مورد علاقه ما باشد پس بدلیل عدم وجود این نقطه در طراحی باکس- بنکن می توان اطمینان داشت که تمامی نقاط طراحی داخل ناحیه قابل اطمینان ما قرار می گیرد.



شکل ۳-۳ طراحی باکس- بنکن سه عامل در سه سطح (MiniTab, 2012)

فرم درجه دوم در این سیستم طراحی به صورت زیر است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3-3)$$

جایی که: β ضرایب معادله و x_i, x_j پارامترهای مورد استفاده در معادله و Y پاسخ و ϵ ترم خطا می باشند.

آنالیز سطح پاسخ در ترمهای ثابت شده انجام می شود. اگر ترمهای ثابت شده در سطح پاسخ تقریباً تابع پاسخ و درست باشند، آنگاه آنالیز این ترمها معادل آنالیز سیستم واقعی هستند. اساس تحلیل نتایج روش باکس- بنکن بر اساس مقدار عبارت P می باشد. این عبارت تعیین می کند که کدام پارامتر دارای اهمیت و تاثیرگذار بر پاسخ ما است. محدوده مقادیر P بین ۰ و ۱ می باشد. مقدار عبارت P احتمال بدست آوردن یک مقدار در حداقل کران مقدار واقعی محاسبه شده از یک تست آماری است که درستی فرضیات آنالیز واریانس را با قرار گرفتن در کمترین مقدار خود نشان می دهد. این مقدار را باید بر اساس مقدار سطح تعریف شده برای آلفا بررسی کرد. قبل از اینکه اثرات تکی هر پارامتر را بررسی کنیم، می بایست از طریق تحلیل واریانس مقادیر عبارت P را برای آزمون مختلط (F-TEST) در تمام عبارت های اثرات خطی، مربعات و متقابل جهت تعیین اثرات مهم بررسی کرد. برای این کار نیاز داریم

مقادیر P را با سطح آلفای تعریف شده مقایسه کنیم. سطح آلفا در واقع مقدار احتمال ایجاد خطا در تحلیل است که به عنوان سطح اهمیت پارامترها بطور معمول 0/05 تعریف می‌شود. تعیین سطح آلفا از این جهت صورت می‌گیرد که کوچکترین احتمال خطا را در تحلیل طراحی آزمایش را بتوان در نظر گرفت.

در تحلیل اگر مقدار P پارامتر مورد مطالعه کمتر یا مساوی سطح آلفای تعریف شده باشد به این معنی است که اثر پارامتر دارای اهمیت می‌باشد اما اگر مقدار P پارامتر مورد مطالعه بزرگتر از مقدار سطح آلفا باشد، نتیجه می‌گیریم که اثر آن پارامتر دارای اهمیت نیست و باید در صورت عدم نیاز حذف گردد.

در فصول بعدی از روش باکس- بنکن جهت تعیین پارامترهای موثر بر سرعت حفاری در روش حفاری با کف در قالب نرم افزار Minitab استفاده خواهد شد. علت عدم استفاده از روش فاکتوریل کامل نیز تعیین پارامترهای موثر بر سرعت حفاری است که در فصل مربوط بحث خواهد شد.

فصل چهارم

هیدرولیک حناری با هوا و انجام محاسبات لازم

۴-۱ مقدمه

در تمام روش‌های حفاری با هوا، از جمله حفاری با هوای خشک، حفاری با کف، حفاری با گل هوازده و حفاری با مه، هوا عامل اصلی می‌باشد که باید به حجم تزریقی آن بسیار توجه کرد. حجم هوای تزریقی در تمامی این روش‌ها متفاوت است، اما متأسفانه به این مورد توجه خیلی کمی می‌شود، که جلوتر به آن می‌پردازیم. از سوی دیگر عدم دانش در حجم هوای مورد نیاز در عملیات حفاری با هوا و زیر مجموعه‌های آن باعث شده است که استفاده از روش حفاری با هوا در اکثر مواقع به صورت روش‌های سعی و خطا و مبتنی بر تجربه باشد. به همین دلیل در بسیاری مواقع باعث تحمیل هزینه‌های اضافی و بی‌دلیل بر عملیات حفاری می‌گردد.

در این فصل ابتدا در خصوص سیال حفاری و نقش آن در عملیات حفاری مختصراً توضیحاتی ارائه می‌گردد. سپس فرمول‌های کلی روش حفاری با هوا ارائه خواهد شد. در پایان کاربرد عملی نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا (طاهری دهلری، ۱۳۹۱) در چاه شماره ۶ میدان شانول به عنوان نمونه توضیح داده می‌شود و راهکاری در طی توضیحات عملکرد هیدرولیکی این چاه ارائه خواهد شد. علت استفاده از نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا به دلیل محاسبات پیچیده و دشوارتر هیدرولیک حفاری با سیالات تراکم پذیر نسبت به سیالات تراکم‌ناپذیر و همچنین پیچیدگی محاسبات لازم جهت بدست آوردن حجم هوای بهینه برای حفاری با هوا و کف می‌باشد.

۴-۲ سیال و هیدرولیک حفاری

هدف از عملیات حفاری، حفر، ارزیابی و تکمیل چاه برای تولید گاز یا نفت می‌باشد که در این عملیات سیالات حفاری بکار رفته نقش مهمی بر عهده دارند. سیال حفاری (یا گل حفاری) می‌تواند مخلوطی از آب، نفت، رس و افزودنی‌های فیزیکی شیمیایی باشد. هوا و یا زیر مجموعه‌های آن در حفاری‌های فرو تعادلی نقش سیال حفاری را به جای گل بازی می‌کنند. این سیال وظایف مختلفی در عملیات حفاری بر عهده داشته و بخش قابل توجهی از هزینه‌های عملیات حفاری چاه را شامل می‌شود. به همین خاطر ترکیب و سیستم سیال حفاری (برنامه گل) باید به دقت طراحی شود تا یک پروژه حفاری موفق را تضمین کند. اهداف مختلف سیال حفاری ممکن است به طور همزمان در همه قسمت‌های چاه

برآورده نشوند. بنابراین باید ترتیب خاصی از اهداف دنبال شود. در زیر خلاصه ای از وظایف اصلی گل حفاری آورده شده است (Amoco, 2010):

- انتقال کننده های حفاری از ته چاه به سطح. برای این منظور، سرعت بالای گردش و ویسکوزیته بالاتر گل لازم است.
- ایجاد شرایط حفاری فراتعادلی برای کنترل فشار سازند. چگالی گل (وزن گل) با افزودنی هایی مانند باریت، اکسید آهن و غیره افزایش داده می شود تا فشار هیدرواستاتیک درون چاه را کمی بالاتر از فشار سازند نگهدارد. معمولاً حدود ۲۰۰ (پوند بر اینچ مربع^۱) فشار اضافه برای حفاری فراتعادلی ایمن کفایت می کند.
- کاهش برهم کنش شیمیایی و فیزیکی با سازند. این از تورم شیل^۲، فروریختگی سازند و مشکلات مربوط به سیمانکاری جلوگیری می کند. نفوذ سیال یا فیلتر آن و یا ذرات جامد به درون سازند می تواند زمینه تخریب سازند و نهایتاً کاهش تولید را فراهم نماید.
- ایجاد یک لایه نازک و ناتراوا (کیک گل) در امتداد سازند تراوا برای کاهش هرزروی گل و فیلتر آن به درون سازند و نتیجتاً کاهش پتانسیل تخریب سازند. این خاصیت گل حفاری با افزودن بنتونیت و برخی پلیمرها فراهم شده و توسط مواد شیمیایی اضافی به پراکندگی و توزیع آن کمک می شود.
- خنک کردن و روانسازی مته و رشته حفاری برای کاهش فرسایش آنها. بنتونیت، روغن، مواد امولسیونی مختلف، گرافیت و غیره در امر خنک سازی و روان کردن رشته حفاری نقش بسزایی دارند.
- ترخیص بهینه مواد وارد شده به گل (کننده های حفاری، گاز سازند و غیره) در سطح با استفاده از تجهیزات کنترل مواد جامد، به عنوان مثال برای سیستم گردش حداکثر ۲٪ ماسه مجاز است تا از فرسایش پمپ های گل و تجهیزات حفاری جلوگیری شود.

1- Pound per square inch (Psi)

2- Shale swelling

- نگهداری کنده‌های حفاری به صورت معلق هنگامی که گردش گل قطع می‌شود. نارسایی در این خاصیت گل حفاری موجب سقوط کنده‌های حفاری و ته نشین شدن آن بر روی رشته حفاری شده که ممکن است منجر به گیر کردن لوله‌های حفاری در چاه شود. رفتار تیکستروپی سیالات حفاری، ظرفیت آن را در نگهداری مواد جامد به صورت معلق نشان می‌دهد.
 - تولید نیروی شناوری برای تحمل بخشی از وزن رشته حفاری و لوله جداری. افزایش وزن گل موجب افزایش نیروی شناوری^۱ و در نتیجه کاهش نیروی کششی لازم خواهد شد.
 - گل حفاری نباید موجب تداخل در اندازه‌گیری‌های چاه‌نگاری شود.
 - انتقال نیروی هیدرولیکی به مته و ایجاد بالاترین سرعت نفوذ.
 - کاهش گشتاور و نیروی کشیدن^۲ لوله‌های حفاری و در نتیجه کاهش فرسایش و نارسایی رشته حفاری.
 - یک وسیله برای انتقال داده‌ها بین تجهیزات ته چاه و سطح.
- اما دربسیاری از سازندها به دلیل مشکلاتی نمی‌توان از سیالات حفاری معمولی جهت حفاری استفاده کرد. این سازندها شامل مخازن تخلیه شده، سازندهای شکافدار، سازندهای بلوغ یافته که معمولاً ارتفاع قابل توجهی از سطح دریا دارند، سازندهای با پیشرفت غیرمعمول گاز و سازندهای با فاصله کم بین گرادیان فشار سازند و شکست می‌باشند. به همین دلیل به نوعی سیال حفاری نیاز است که علاوه برداشتن رئولوژی مناسب دارای محدودهای از چگالی باشد که فشار هیدرواستاتیک لازم جهت رفع مشکلات یاد شده را دارا باشد. این مساله نیاز صنعت به استفاده از روش حفاری با هوا را بیان می‌کند.
- هیدرولیک حفاری عبارتست از تعیین دبی و فشار سیال تزریقی به داخل چاه در زمان عملیات به نحوی که انتقال کنده‌های حفاری از زیر مته به بهترین نحو و بالاترین راندمان ممکن صورت گیرد تا سرعت حفاری در حداکثر مقدار ممکن باشد، همچنین چاه نیز تحت کنترل ما باشد (Amoco, 2010).

1- Buoyancy

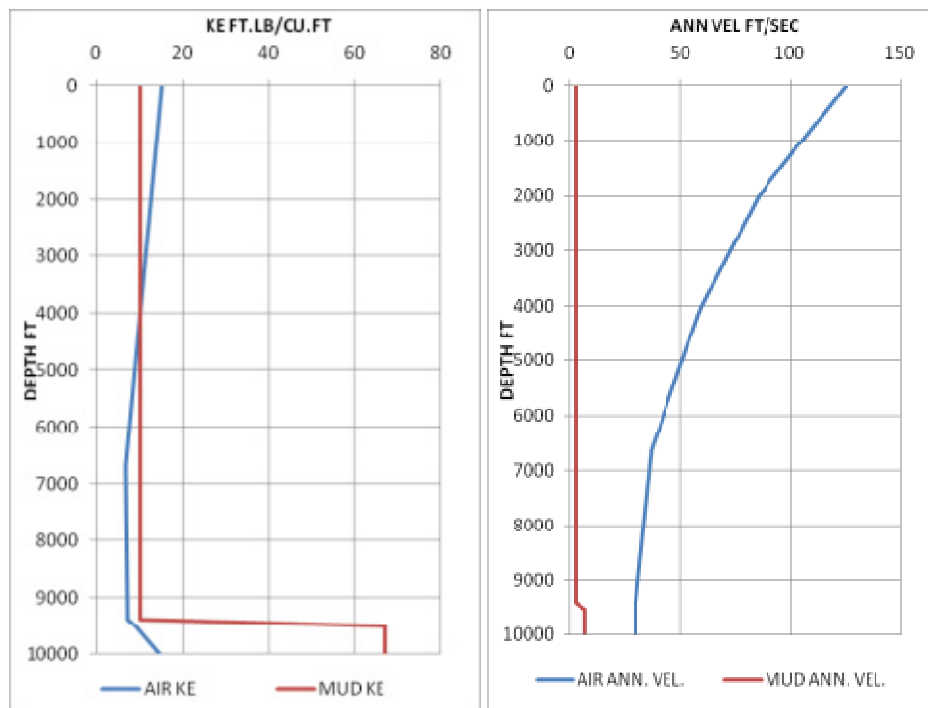
2- Drag

۳-۴ مبانی نظری نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا

برای روشن شدن بیشتر مطلب ابتدا مقایسه‌ای بین ویژگی‌های سیالات تراکم پذیر و تراکم ناپذیر ارائه می شود.

شکل (۱-۴) مقایسه محاسبات تمیزسازی چاه می باشد و مقایسه ای بین سرعت فضای حلقوی (دالیز) گل حفاری و هوا، تغییرات دانسیته انرژی گل حفاری و هوا را در این دو نوع عملیات حفاری نشان می دهد. KE انرژی جنبشی در واحد حجم $(lb - ft / ft^3, Nm / m^3)$ ، ρ دانسیته سیال (kg / m^3) و v سرعت میانگین سیال بر حسب (ft/sec) می باشد (William, 2009).

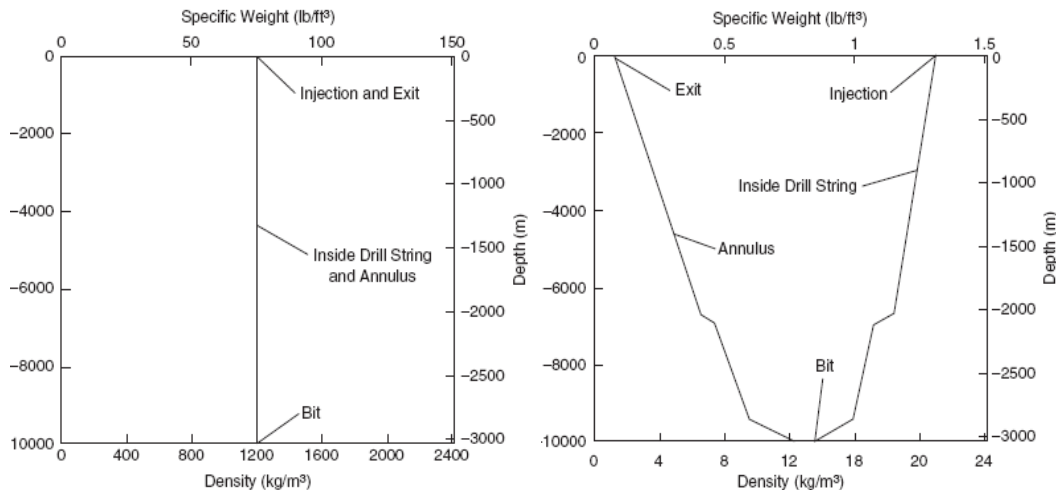
دانسیته انرژی همان نیرویی می باشد که کننده های حفاری را در درون سیال حفاری حفظ می کند و آنها را به سطح می رساند. همانطور که از نمودار سمت چپ شکل پیداست گل حفاری با سرعتی تقریباً معادل با ۵ فوت بر ثانیه در فضای حلقوی در اطراف لوله های وزنه حرکت می کند و این سرعت در اطراف لوله های حفاری حدود ۲ فوت بر ثانیه می باشد (William, 2009 ; Rovig, 1992).



شکل ۴-۱ مقایسه سرعت سیال حفاری و دانسیته انرژی جنبشی در فضای حلقوی در عملیات های حفاری با گل و هوا (William, 2009)

حداقل سرعت هوای لازم در فضای حلقوی چاه برای حفاری با هوا ۵۰ فوت بر ثانیه (۱۵ متر بر ثانیه) می‌باشد و در هنگام خروج از دالیز تا ۱۲۶ فوت بر ثانیه افزایش می‌یابد. حداقل سرعت هوای لازم در فضای حلقوی برای حمل کف و خرده‌ها در حفاری با کف بین ۲/۵ (۰/۷۶ متر بر ثانیه) و ۴/۱۶ (۱/۵ متر بر ثانیه) فوت بر ثانیه می‌باشد (سرعت بحرانی برای حمل‌کننده‌ها تقریباً همین مقدار می‌باشد)

همانطور که نمودار سمت راست شکل (۴-۱) نشان می‌دهد انرژی جنبشی جریان در واحد حجم گل حفاری، همزمان با صعود گل حفاری در دالیز (فضای حلقوی) تغییری نمی‌کند. (البته با فرض اینکه سطح مقطع در دالیز تغییری نکند). این پدیده به این دلیل است که هوای فشرده در طی فرایند تراکم، انرژی درونی ذخیره کرده است و با صعود در دالیز و کاهش مقاومت در برابر جریان انرژی درونی به سرعت تبدیل می‌شود. پارامتر انرژی جنبشی در واحد حجم عاملی می‌باشد که امکان حصول اطمینان از تمیز سازی چاه و حمل‌کننده‌های حفاری در هر دو سیستم گل و هوا را فراهم می‌کند. مقادیر انرژی جنبشی در واحد حجم در هر دو سیستم گل یا هوا در نقطه بحرانی (اطراف لوله‌های وزنه و لوله‌های حفاری و نقاط تغییر سایز لوله‌های جداری چاه) در دالیز از لحاظ مقدار تقریباً برابرند، همچنین ظرفیت حمل‌کننده‌ها در این نقطه از دالیز حداقل می‌باشد. شکل (۴-۲) مقایسه‌ای بین دانسیته سیال تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر را نشان می‌دهد.



Mud drilling specific weight versus depth.

Air drilling specific weight versus depth.

شکل ۴-۲ مقایسه نمودار دانسیته سیال حفاری در فضای حلقوی و داخل رشته حفاری بین عملیات های حفاری با گل و هوا (William, 2009)

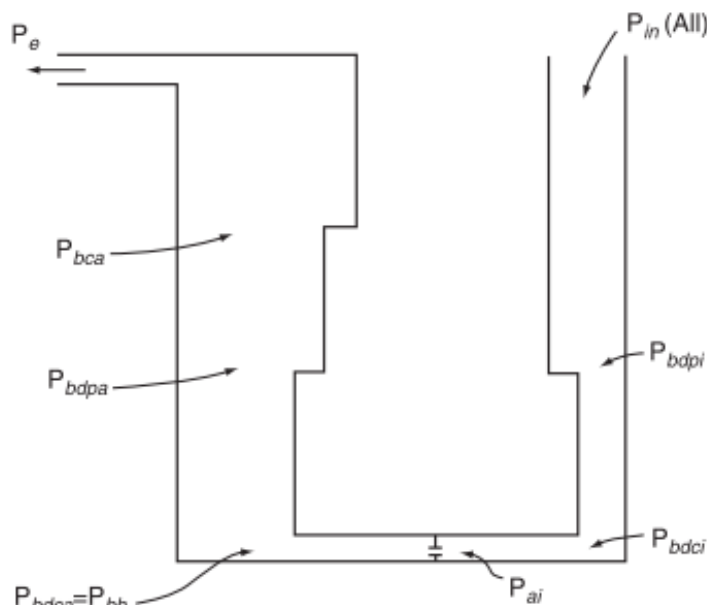
دانسیته سیال به شرح زیر می باشد:

که در آن $\rho = \gamma / g$ جرم ویژه سیال $(lb - ft / ft^3, Nm / m^3)$ و g شتاب جاذبه و برابر $(9.81 m / sec^2)$ می باشد. همانطور که مشخص است دانسیته گل با عمق تغییر چشم گیری نمی کند. اما دانسیته هوا یا گاز با عمق دائماً در حال تغییر است. که همین مورد باعث مشکل شدن در محاسبه آن می شود.

۴-۳-۱ ساختار کلی فرمولی سیالات تراکم پذیر

در این بخش هدف این است که چگونگی ساختار فرمولی نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا به طور کلی بیان شود. همانند همه مسائل مربوط به سیالات تراکم پذیر، فرایند حل مسئله از یک فشار و دمای معلوم شروع می شود و در این مسئله، فشار و دما در خروجی مشخص می باشد، بنابراین ساخت فرمول، از تحلیل جریان هوا و سیالات تراکم ناپذیر در فضای حلقوی شروع می شود و در درون سیستم گردش، گل راه خود را ادامه می دهد. بدان معنی که، فرایند محاسبات نرم افزار مربوطه از دالیز (فضای حلقوی) شروع، و پس از عبور از شکافها و نازل های مته در درون رشته حفاری تا سطح ادامه خواهد یافت. شکل ۴-۳

فشار را در موقعیتهای مختلف در دالیز که عمق آن با حرف b نشان داده می‌شود را مشخص می‌کند. عمق نهایی چاه H می‌باشد.



شکل ۴-۳ شماتیک گردش مستقیم گل (William, 2009)

که در آن:

$P(in)$: فشار تزریق در بالای رشته حفاری

$P(bdpi)$: فشار در انتهای لوله حفاری داخل رشته حفاری

$P(bdci)$: فشار در انتهای لوله‌های وزنه داخل رشته حفاری

$P(ai)$: فشار در بالای مته داخل رشته حفاری

$P(bdca)$: فشار در انتهای لوله‌های وزنه در فضای حلقوی

$P(bdpa)$: فشار در انتهای لوله‌های حفاری در فضای حلقوی

$P(bca)$: فشار در انتهای لوله جداری در فضای حلقوی

P_e : فشار در بالای فضای حلقوی

فشار دیفرانسیلی dp در مسیر جریان دالیزی به سمت بالا که سه فازی می‌باشد در db پدید می‌آید.

این فشار دیفرانسیلی را می‌توان با فرمول زیر تخمین زد:

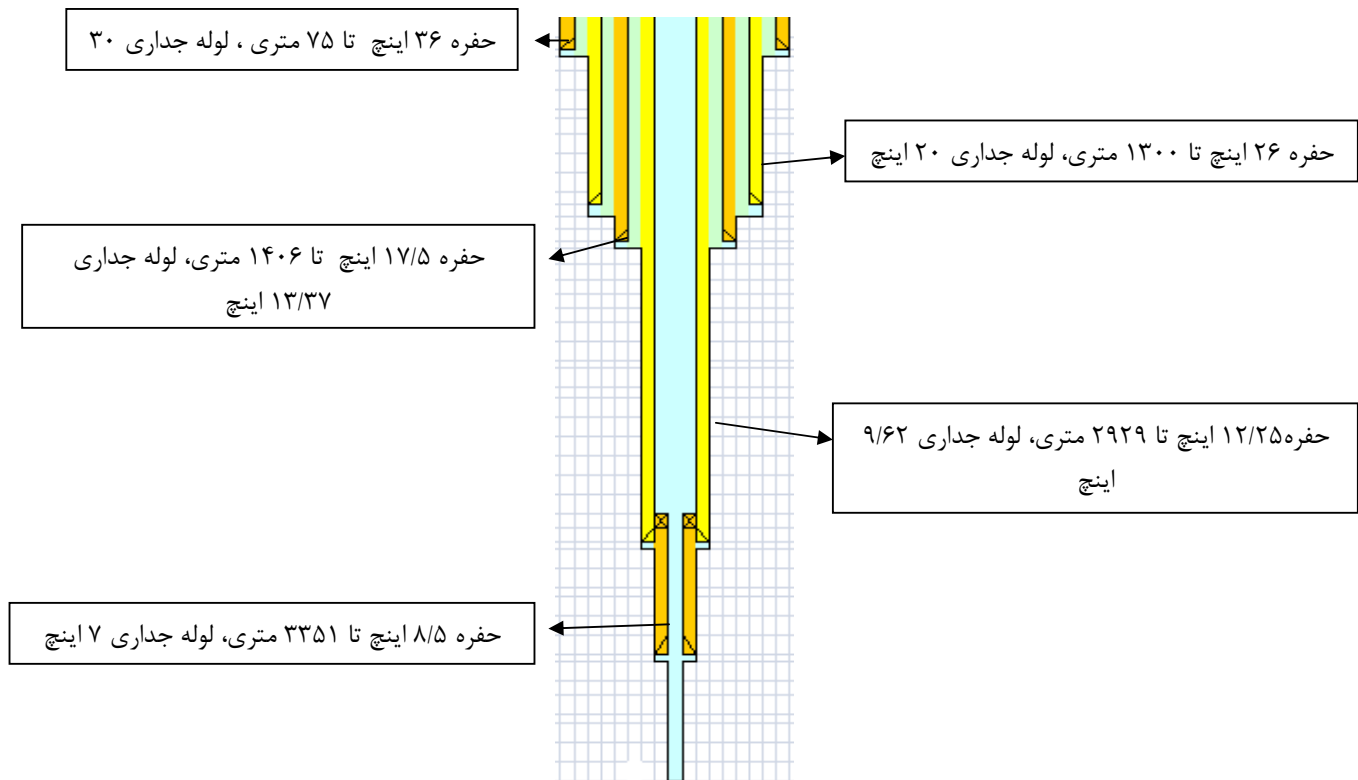
$$dp = y_{mix} \left[1 + \frac{fV^2}{2g(D_b - D_p)} \right] \quad (1-3)$$

که در آن p فشار سیال (lb/ft^2)، عمق اندازه گیری (ft) و H عمق نهایی چاه می باشد. y_{mix} چگالی ویژه مخلوط هوا، سیال متراکم ناپذیر و کنده های سنگ (lb/ft^3)، f ضریب اصطکاک، V سرعت میانگین دالیزی (ft/sec)، D_b و D_p به ترتیب قطر چاه و قطر خارجی لوله های حفاری (ft) و g شتاب جاذبه ($32.2 \frac{ft}{sec^2}$) می باشد (William, 2009).

عبارت اول در سمت راست معادله، تغییر فشار هیدروستاتیکی حاصل از تغییر عمق را نشان می دهد. عبارت دوم در سمت راست معادله افت فشار حاصل از افت اصطکاکی مسیر جریان را نشان می دهد.

۴-۴ شرح بکارگیری نرم افزار هیدرولیک حفاری با هوا

همانطور که در فصل های قبلی ذکر شد میدان شانول یکی از میداین حوضه زاگرس جنوبی بوده که به دلیل وجود شکستگی و تخلخل فراوان، در حفاری چاه های شماره ۶ و ۱۰ این میدان در حفره های ۲۶، ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ (اینچی) به عبارتی از عمق حدود هفتاد متری تا سه هزار متری از انواع عملیات حفاری با هوا بهره گیری شد (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴ شماتیک حفرات چاه شماره ۶ شانول (شرکت نفت مرکزی ایران، ۱۳۸۳)

در حفره ۲۶ اینچی به دلیل رودخانه‌های سطحی و به تبع آن وجود آب در چاه، عملیات حفاری با کف بکارگرفته شده است. حفاری در این حفره با مشکلات فراوانی روبرو بوده است. در اثر خیس شدن کنده‌ها و چسبیدن آنها به هم حمل آنها بسیار مشکل می‌باشد. البته هدف این است که با محاسبه دقیق میزان هوای لازم و همچنین افزایش کیفیت کف مشکل تا حد زیادی در چاه‌های آتی میدان شانول مرتفع گردد.

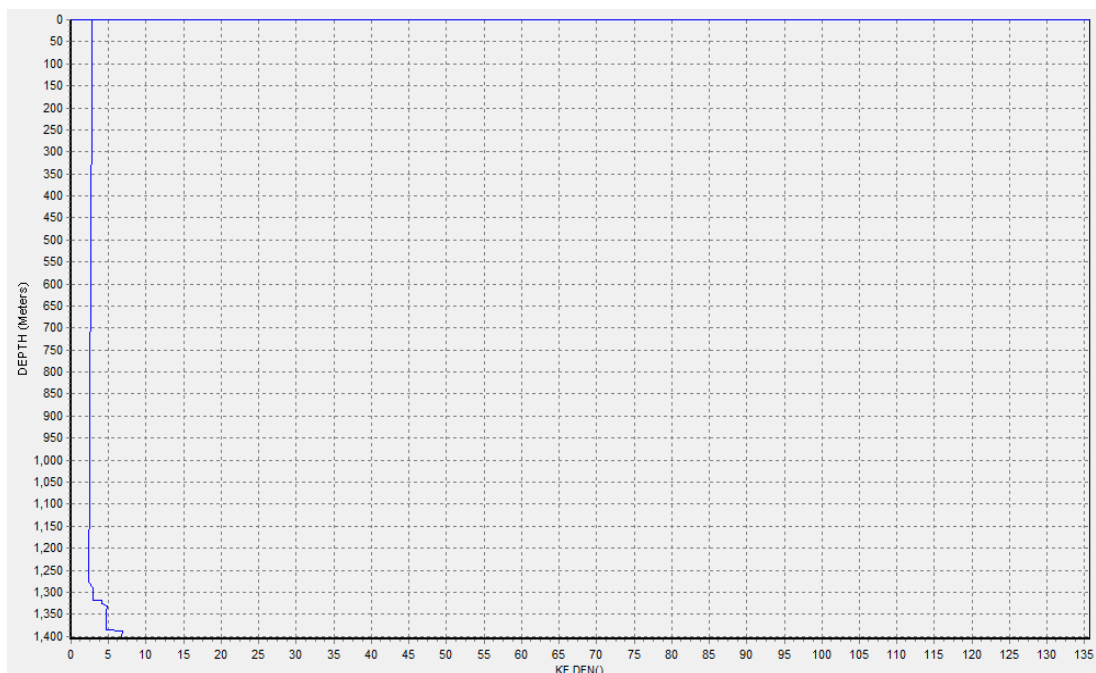
در حفره ۱۷/۵ اینچی از آنجا که پس از راندن لوله جداری ۲۰ اینچی مشکل آبهای سطحی از بین می‌رود، امکان حفاری با هوا برقرار می‌گردد. لذا در این فصل همانطور که ذکر شد به کمک نرم افزار موجود به بررسی هیدرولیک حفاری با هوا با توجه به اطلاعات میدانی چاه شماره ۶ شانول به عنوان نمونه برای این حفره می‌پردازیم و به بررسی و محاسبه دقیق حجم هوا، حجم هوای پیشنهادی برای افزایش سرعت حفاری و بهبود عملیات حفاری با هوا برای چاه‌های آتی این میدان پرداخته خواهد شد.

در حفره ۱۲/۲۵ اینچی و پس از حفاری سازند فهلیان به دلیل ورود آب سازندی در چاه از عملیات حفاری با کف و حفاری با گل هوازده استفاده شده است. به کمک فرمول‌های موجود در کتاب

کاربردی حفاری هوا و گاز (William, 2009)، و محاسبات نسبت هوا و گل مشکلات حفاری که مهم ترین آنها گیر لوله‌ها می‌باشد تا حد زیادی می‌تواند در چاه‌های آبی میدان شانول مرتفع گردد.

به این صورت در چاه شماره ۶ شانول که به عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد، در حفره ۱۷/۵ اینچ که از حفاری با هوای خشک استفاده گردیده حجم هوای تزریقی CFM ۵۹۰۰ می‌باشد که این حجم با توجه به اینکه حفاری با هوای خشک می‌باشد خوب است. اما مقداری می‌تواند بیشتر باشد زیرا در این حفره حفاری با هوای خشک به کار رفته لذا می‌بایست به حداقل سرعت لازم در فضای حلقوی (۱۵ متر بر ثانیه) چاه با قطر ۱۷/۵ اینچ جهت حمل کنده‌های حفاری دست یابیم که انرژی جنبشی لازم جهت حمل خرده‌های حفاری ایجاد گردد.

شکل (۴-۵) نمودار انرژی جنبشی به عمق را در دالیز حفره ۱۷/۵ اینچی برای این حجم هوای تزریقی نشان می‌دهد. علاوه بر آن جدول (۴-۱) محاسبات انرژی جنبشی به عمق را در دالیز حفره ۱۷/۵ اینچی که بحث اصلی ما می‌باشد نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد حداقل سرعت هوای لازم در تمام فضاهای حلقوی چاه‌ها برای حفاری با هوا ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد (Rovig, 1992).



شکل ۴-۵ نمودار انرژی جنبشی در دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی CFM ۵۹۰۰

در جدول زیر و جداول مشابه منظور از ANLS، فضای حلقوی در نقاط مختلف چاه می‌باشد (از مته تا سطح)، پارامتر DEL P افت فشار، KE Den دانسیته انرژی جنبشی، Velocity سرعت هوای تزریقی و Density هم دانسیته هوای تزریقی می‌باشد.

جدول ۴-۱ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی ۵۹۰۰ CFM

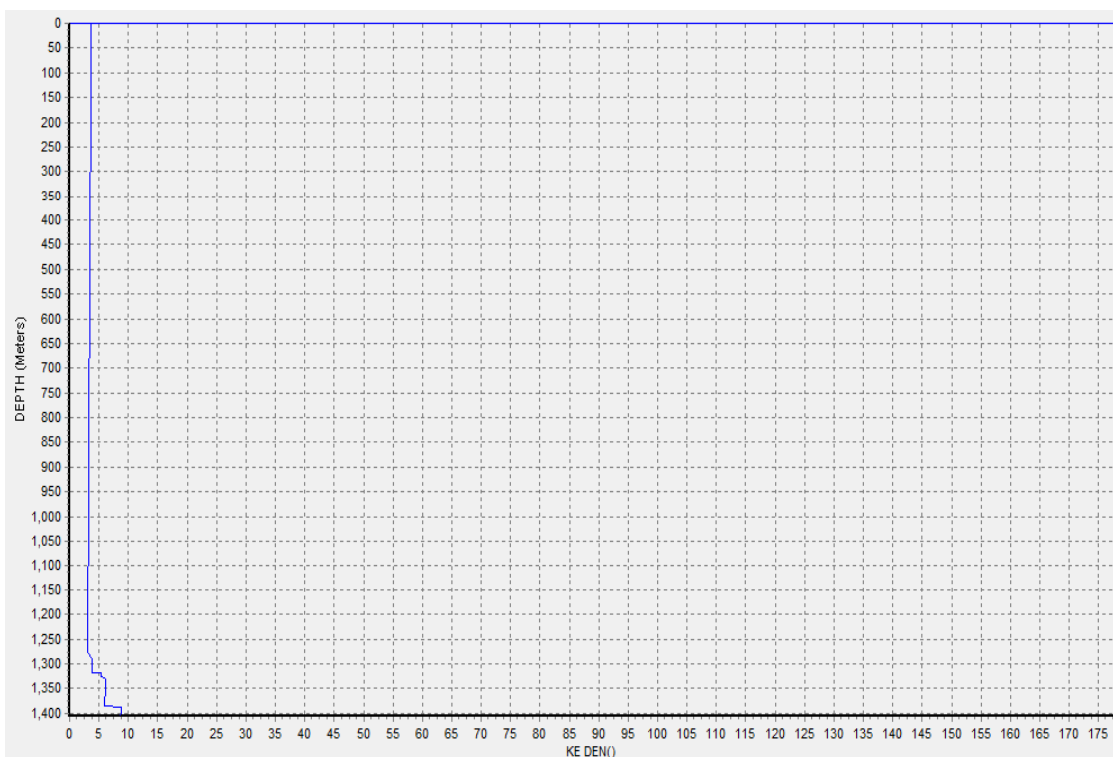
Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)	Density (lb/ft ³)	KE Den (lb.ft/ft ³)
Surface	0	12.439	12.439	5900	0	0.178	0
Blooeey	0	14.348	0	5115.169	72.668	0.154	135.668
ANLS (1)	1276	18.58	4.232	4278.121	12.43	0.092	2.373
ANLS (2)	1317	18.742	0.162	4251.674	13.807	0.092	2.946
ANLS (3)	1326	18.816	0.074	4237.149	16.291	0.093	4.116
ANLS (4)	1386	19.417	0.601	4120.767	17.039	0.095	4.629
ANLS (5)	1406	19.767	0.35	4052.646	20.376	0.097	6.731
Bit Nzl	1406	250.311	230.544	320.037	202.774	1.228	8442.07

در اینجا ما بر اساس سرعت هوای تزریقی و دانسیته انرژی جنبشی ایجاد شده به تحلیل می‌پردازیم. همانطور که گفته شد حداقل سرعت هوای لازم در دالیز برای حفاری با هوای خشک ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد و نباید بیشتر از ۲۵ متر بر ثانیه شود زیرا از کنده‌های حفاری جلو میزند و نمی‌تواند آنها را تا سطح حمل کند (Rovig, 1992). حداقل انرژی جنبشی برای حمل کنده‌ها نیز ۳ پوند فوت/فوت مکعب می‌باشد (William, 2009).

همانطور که در جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود با تزریق ۵۹۰۰ CFM هوا در نقاط حفره باز چاه که عمق‌های ۱۴۰۶ تا ۱۳۲۶ متری دالیز می‌باشد میزان سرعت هوا و انرژی جنبشی جهت حمل کنده‌ها فراهم شده است. اما در فضای حلقوی بین لوله جدار و لوله‌های حفاری در عمق‌های ۱۳۱۷ و ۱۲۷۶ متری که نقاط بحرانی می‌باشند میزان سرعت هوا و انرژی جنبشی کمتر از مقدار حداقل لازم جهت حمل کنده‌ها می‌باشند که می‌تواند باعث حالت گلوگیری و تشکیل حلقه‌های گلی^۱ حاصل از تجمع

1- MUD RINGS

کننده‌ها، گیر لوله‌ها و در شرایط پیچیده‌تر بریدن لوله‌ها در این نقاط شود. البته این کاهش مقدار انرژی جنبشی که در جدول (۴-۱) شاهد آن هستیم زیاد نمی‌باشد ولی می‌توان کمی وضعیت را بهتر کرد و از رخ دادن مشکلاتی که ذکر شد تا حدی جلوگیری کرد. بعد از بررسی‌های فراوان بهترین میزان حجم هوایی که وضعیت را در نقاط بحرانی ذکر شده برای حفره ۱۷/۵، بهتر کرد حجم هوای ۶۹۰۰ CFM می‌باشد. این مقدار حجم هوا کفایت تا حدی باشد که میزان سرعت لازم جهت حمل خرده‌ها به سطح را فراهم کند. شکل (۴-۶) نمودار انرژی جنبشی به عمق را در دالیز مورد نظر با این حجم هوای تزریقی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ نمودار انرژی جنبشی در دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی ۶۹۰۰ CFM

همانطور که از شکل فوق پیداست میزان انرژی جنبشی از بعد از مته تا نقاط بحرانی ذکر شده در مقایسه با شکل (۴-۵) مقداری افزایش یافته است، اما همانطور که ذکر شد در نقاط بحرانی عمق ۱۳۱۷ متری ورودی لوله جداری و عمق ۱۲۷۶ متری ورودی لوله حفاری، انرژی جنبشی کمی کاهش پیدا کرده است اما این کاهش بسیار اندک بوده طوری که حداقل انرژی جنبشی و سرعت هوای لازم جهت حمل

کننده‌ها را در این نقاط بحرانی دالیز ما فراهم می‌کند و نسبت به حجم هوای قبلی استفاده شده (۵۹۰۰ CFM) انرژی جنبشی ما در این نقاط به حد لازم افزایش یافته است.

جدول (۲-۴) نتایج حاصل از نرم‌افزار برای این حالت را به صورت واضح‌تر نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد، میزان سرعت هوا و انرژی جنبشی در نقاط بحرانی عمق‌های ۱۳۱۷ و ۱۲۷۶ متری افزایش یافته است که این حجم هوای پیشنهادی روند خوبی برای جلوگیری از تجمع کنده‌ها دارد. سرعت هوا در این حالت از ۱۳/۸ متر بر ثانیه قبلی به ۱۵/۳۲ متر بر ثانیه در عمق ۱۳۱۷ متر افزایش یافته و انرژی جنبشی از ۲/۹۴ به ۳/۸۲ افزایش یافته است. همچنین در عمق ۱۲۷۶ متری، سرعت هوا از ۱۲/۴۳ قبلی به ۱۳/۸۰ متر بر ثانیه و انرژی جنبشی از ۲/۳۷ قبلی به ۳/۰۸ افزایش یافته است. همانطور که گفته شد انرژی جنبشی جریان در واحد حجم هوای فشرده، با نزدیک شدن به شرایط جوی در خروجی دالیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این پدیده به این دلیل است که هوای فشرده در طی فرایند تراکم، انرژی درونی ذخیره کرده است و با صعود در دالیز و کاهش مقاومت در برابر جریان، انرژی درونی به سرعت تبدیل می‌شود. این امر در هر دو جدول (۱-۴) و (۲-۴) مشهود است. به طوری که انرژی جنبشی در نزدیکی شرایط جوی در خروجی دالیز برابر ۱۳۵/۶ و ۱۷۷/۶ شده است.

جدول ۲-۴ محاسبات پارامترهای خروجی نرم‌افزار برای دالیز ۱۷/۵ اینچ با حجم هوای تزریقی ۶۹۰۰ CFM

Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)	Density (lb/ft3)	KE Den (lb.ft/ft3)
Surface	0	12.439	12.439	6900	0	0.194	0
Blooey	0	14.989	0	5726.39	81.351	0.161	177.621
ANLS (1)	1276	19.556	4.577	4751.177	13.804	0.097	3.082
ANLS (2)	1317	19.743	0.177	4720.103	15.328	0.097	3.825
ANLS (3)	1326	19.831	0.088	4701.624	18.076	0.098	5.341
ANLS (4)	1386	20.551	0.72	4553.309	18.827	0.101	5.982
ANLS (5)	1406	20.978	0.427	4465.982	22.454	0.103	8.675
Bit Nzl	1406	292.737	271.759	320.037	202.774	1.436	9872.93

با توجه به حجم هوای پیش‌بینی شده، می‌توان توسط رابطه زیر میزان توان کمپرسور را بر حسب اسب بخار بدست آورد. همچنین می‌توان تعداد کمپرسور لازم جهت تامین هوای پیش‌بینی شده را بدست آورد.

$$(۲-۴) \quad N_s = \frac{Q}{(K-1)} \cdot \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{1/K} \cdot P_1 \cdot Q_1 \quad \text{نیروی (توان) مورد نیاز}$$

چنانچه $K=1.4$ ، $P_1=12.44$ PSI، $P_2=347.53$ PSI، 2083.62 HP = نیروی (توان) مورد نیاز

در رابطه فوق K نسبت گرمایش هوا، P فشار هوای خروجی از کمپرسور، Q دبی تزریقی هوا و NS تعداد کمپرسور موجود سیستم می‌باشند.

با توجه به نیروی مورد نیاز بدست آمده، می‌توان تعداد کمپرسورها را پیش‌بینی کرد. با تقسیم نیروی اسب بخار بدست آمده بر نیروی اسب بخار کمپرسورهای موجود می‌توان تعداد کمپرسورهای لازم جهت تأمین حجم هوای دلخواه را بدست آورد.

اما در حفاره‌های ۲۶ و ۱۲/۲۵ اینچی چاه شماره ۶ که حفاری با کف صورت گرفته است از حجم هوای بین ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ در عمل استفاده شده است که حجم بسیار زیادی می‌باشد. این حجم هوای استفاده گردیده برای حفاری با هوای خشک است. زیرا همانطور که گفته شد سرعت هوای لازم در دالیز برای حمل کف و خرده‌ها در حفاری با کف طبق مطالعات بین ۰/۷۶۲ و ۱/۵ متر بر ثانیه می‌باشد (Rovig, 1992). بیشتر از این سرعت هوای لازم برای حفاری با کف، باعث می‌شود که هوا کف را ببرد و خرده‌ها با سرعت کافی به سطح انتقال نیابند و این پدیده باعث کاهش سرعت حفاری و اغلب گیر لوله حفاری می‌شود.

لذا جهت پیش‌بینی حجم هوای لازم برای رسیدن به سرعت هوای ذکر شده در حفاری با کف، برای حفرات ۲۶ و ۱۲/۲۵ اینچی، می‌توان فقط برای محاسبه سرعت هوا صرف نظر از انرژی جنبشی لازم، از این نرم‌افزار استفاده کرد.

در حفره ۲۶ اینچ (از عمق ۷۶ تا ۱۳۰۰ متری) میانگین حجم هوای استفاده شده در حفاری با کف ۵۰۰۰ CFM می‌باشد. با این حجم هوا ما سرعتی بین ۵/۸ تا ۷/۴۲ متر بر ثانیه در دالیز برای هوا تولید می‌کنیم که این مسئله باعث بروز مشکلاتی که ذکر شده خواهد شد. جدول (۳-۴) این مقدار را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳ محاسبات پارامترهای خروجی نرم افزار برای دالیز ۲۶ اینچ با حجم هوای تزریقی ۵۰۰۰ CFM

Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)
Surface	0	12.439	12.439	5000	0
Blooney	0	13.837	0	4495.043	63.858
ANLS (1)	75	14.046	0.21	4449.503	7.423
ANLS (2)	1183	17.736	3.69	3776.749	5.447
ANLS (3)	1243	17.956	0.219	3744.154	5.698
ANLS (4)	1303	18.18	0.224	3711.415	5.81
ANLS (5)	1333	18.296	0.117	3694.361	6.2
Bit Nzl	1333	211.666	193.37	319.339	202.332

همانطور که در جدول فوق دیده می شود سرعت هوا در دالیز بیش از سرعت هوای مورد نیاز برای حفاری با کف (بین ۰/۷۶ تا ۱/۵) می باشد پس می توان نتیجه گرفت یکی از دلایلی که در حفره ۲۶ اینچ عملاً دارای سرعت حفاری پایین بوده ایم همین است. زیرا هوای تزریقی با این سرعت، از میان کف گذشته و کف را می بُرد و به همین جهت خرده های حفاری بطور کامل از چاه پاک نمی شود و در واقع هیدرولیک سیال عملکرد خوبی نخواهد داشت.

بنابراین دلایل فوق، سعی شده است تا با انجام بررسی های لازم به حجم هوای کمتر برسیم که در محدوده سرعت هوای صحیح برای حفاری با کف می باشد. این حجم هوای پیش بینی شده به ما سرعتی بین محدوده استاندارد سرعت هوا برای حفاری با کف خواهد داد. لذا حمل خرده های حفاری قطعاً با کیفیت بهتری صورت خواهد گرفت در نتیجه سرعت حفاری بیشتری خواهیم داشت و از مشکلاتی چون گیرلوله، تجمع کننده ها و فرسایش سریع مته جلوگیری کرد. جدول (۴-۴) نتیجه آنالیز را برای حجم هوای پیشنهادی که در آن سرعت هوای بدست آمده برای دالیز مشخص است، را برای حفره ۲۶ اینچ نشان می دهد.

جدول ۴-۴ محاسبات پارامترهای خروجی نرم افزار برای دالیز ۲۶ اینچ با حجم هوای تزریقی ۱۶۰۰ CFM

Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)
Surface	0	12.439	12.439	1600	0
Blooeuy	0	12.589	0	1580.908	22.459
ANLS (1)	75	13.304	0.714	1503.334	1.508
ANLS (2)	1183	32.116	18.812	667.444	0.963
ANLS (3)	1243	33.623	1.508	639.83	0.974
ANLS (4)	1303	35.196	1.573	613.449	0.96
ANLS (5)	1333	36.008	0.812	600.69	1.008
Bit Nzl	1333	75.804	39.795	285.34	180.79

همانطور که در جدول مشخص است دامنه تغییرات سرعت هوا در دالیز (فضای حلقوی) بین ۱ تا ۱/۵ متر بر ثانیه می باشد که در محدوده استاندارد ذکر شده، می باشد. میزان نیروی لازم برای کمپرسور جهت تامین این حجم هوا تنها ۲۲۵/۶۵ اسب بخار (HP) می باشد. پس بهترین میزان هوای لازم برای حفره ۲۶ اینچ در حفاری با کف ۱۶۰۰ CFM پیش بینی شد و می توان با استفاده از این حجم هوا و بالا بردن کیفیت کف به هیدرولیک بسیار خوبی در چاه های آبی میدان شانول دست یافت.

در حفره ۱۲/۲۵ اینچ (۱۴۰۶ تا ۲۹۲۹ متری) میزان حجم هوایی که عملاً در میدان شانول در چاه شماره ۶ به عنوان حجم هوای تزریقی در حفاری با کف استفاده شده به طور میانگین ۶۰۰۰ CFM بوده است. لذا در اینجا نیز همانند حفره ۲۶ اینچ آنالیز را جهت بدست آوردن حجم هوای مناسب برای این حفره در حفاری با کف انجام می دهیم. همانطور که گفته شد برای دو حفره ۲۶ و ۱۲/۲۵ اینچی فقط بر اساس سرعت هوا جهت بهتر حمل شدن خرده های حفاری تصمیم گیری می شود نه بر اساس انرژی جنبشی. جدول (۴-۵) نتایج آنالیز برای حفره ۱۲/۲۵ اینچی را با حجم هوای واقعی بکار برده شده در میدان شانول نشان می دهد.

جدول ۴-۵ محاسبات پارامترهای خروجی نرم افزار برای دالیز ۱۲/۲۵ اینچی با حجم هوای تزریقی ۶۰۰۰CFM

Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)
Surface	0	12.439	12.439	6000	0
Blooy	0	14.409	0	5179.925	73.588
ANLS (1)	1403	32.069	17.66	2539.907	18.587
ANLS (2)	2780	61.858	29.789	1424.921	10.612
ANLS (3)	2870	66.706	4.848	1327.907	14.371
ANLS (4)	2930	72.754	6.048	1221.532	16.474
Bit Nzl	2930	265.871	193.117	334.265	211.789

همانطور که مشاهده می شود میزان سرعت هوا برای حفاری با کف بسیار زیاد می باشد. لذا می بایست از حجم هوای کمتری استفاده کرد که سرعت هوا بین محدوده ذکر شده استاندارد برای حفاری با کف باشد تا مشکلات ذکر شده بوجود نیاید و کف توسط هوا بریده نشود. قابل ذکر است که این میزان حجم هوا، به نیروی کمپرسوری برابر ۱۸۱۸ اسب بخار نیاز خواهد داشت.

بعد از بررسی های انجام شده به بهترین میزان حجم هوای لازم جهت حفاری با کف در حفره ۱۲/۲۵ اینچی دست یافتیم. جدول (۴-۶) نتایج آنالیز برای حفره ۱۲/۲۵ اینچی را با حجم هوای ۱۲۰۰CFM نشان می دهد. میزان نیروی محوری کمپرسور برای این حجم هوا ۱۹۳ اسب بخار می باشد.

جدول ۴-۶ محاسبات پارامترهای خروجی نرم افزار برای دالیز ۱۲/۲۵ اینچی با حجم هوای تزریقی ۱۲۰۰CFM

Partdesc	Depth (m)	Press (psi)	Delta p (psi)	Air Flow rate (cfm)	Velocity (m/s)
Surface	0	12.439	12.439	1200	0
Blooy	0	12.454	0	1180.408	7.095
ANLS (1)	1403	29.532	17.078	1000.842	1.682
ANLS (2)	2780	63.46	33.928	675.746	0.862
ANLS (3)	2870	66.626	3.167	600.792	1.199
ANLS (4)	2930	68.892	2.266	507.501	1.45
Bit Nzl	2930	70.577	1.685	204.934	66.486

دلیل اینکه میزان حجم هوای لازم برای حفاری با کف برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ کمتر از حفره ۲۶ اینچ می‌باشد، این است که طبق بررسی‌های انجام شده عملیاتی (سوابق تجربی) در حفاری با هوا هرچه قطر حفره بیشتر می‌شود نیاز به حجم هوای بیشتر خواهیم داشت.

همانطور که مشاهده شد با کم کردن حجم هوا در حفره‌های حفاری با کف علاوه بر دست‌یابی به سرعت کمتر هوا و در نتیجه پایدار نگه‌داشتن کف، به هیدرولیک بهتری دست یافتیم. لذا با رعایت این اصول، قطعاً از رخدادن مشکلاتی چون بریده شدن کف توسط هوا، حمل ضعیف خرده‌های حفاری و در پی این‌ها تجمع خرده‌ها و گیر کردن لوله حفاری، که از مشکلات عمده میدان شانول بوده، می‌توان جلوگیری کرد و یا تا حدودی این مشکلات را کاهش داد و به سرعت حفاری بالایی دست یافت.

البته قابل ذکر است که این عوامل به پارامترهای مکانیکی مثل وزن روی مته و سرعت چرخش لوله نیز بستگی دارد. لذا این حدود حجم هوا با توجه به پارامترهای مکانیکی اعمال شده بر روی مته قابل تغییر خواهد بود. اما این قانون که برای حفاری با کف تنها نیاز به حجم هوای بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ CFM می‌باشد، پا برجا خواهد بود. چرا که استفاده بیش از حد حجم هوا اگر مشکلی هم ببار نیاورد قطعاً، با کاهش سرعت حفاری همراه است. قابل ذکر است که این موارد همراه با موارد دیگر در فصول بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل پنجم

پیش بینی سرعت جاری به کمک شبکه عصبی مصنوعی رگرسیون شعاعی

۵-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا نحوه جمع‌آوری اطلاعات را ذکر خواهیم کرد. سپس با استفاده از نرم‌افزار مطلب و استفاده شبکه عصبی رگرسیون عمومی یک مدل برای پیش‌بینی سرعت حفاری در میدان مورد مطالعه ارائه داده می‌شود. سپس در فصل بعدی از این مدل بدست آمده در طراحی آزمایشات که یکی از ابزارها کاربردی در بهینه‌سازی و ساده‌سازی روابط می‌باشد جهت پیش‌بینی سرعت حفاری برای حالات آزمایش استفاده می‌شود. در نهایت به بررسی چگونگی تاثیر این پارامترها بر نرخ نفوذ مته و معرفی بهترین حالت‌های سطوح (مقدار) پارامترها برای آوردن سرعت حفاری بهینه خواهیم پرداخت.

۵-۲ جمع‌آوری داده و ایجاد بانک اطلاعاتی

باید توجه داشته باشیم که پارامترهای زیادی بر روی سرعت حفاری تأثیر می‌گذارند که در اینجا ۷ پارامتر تأثیر گذار بررسی شده است. تشکیل پایگاه داده‌ها شامل مجموعه پارامترهای ورودی و خروجی جهت استفاده آنها در شبکه عصبی برای ارائه مدلی جهت پیش‌بینی سرعت حفاری می‌باشد. این اطلاعات پارامترهای استخراج شده از دو حلقه چاه ۶ و ۱۰ حفاری شده منطقه می‌باشند که از گزارشات روزانه حفاری حاصل شده‌اند و در قالب ۷ داده ورودی و یک داده خروجی (هدف) به شبکه داده می‌شوند (جدول ۲-۴ فصل دوم). در شبکه‌های عصبی مصنوعی برای محاسبه سرعت حفاری نیازی به یافتن تابع ریاضی معرف ارتباط متغیرها نیست، بلکه شبکه با استفاده از روابط درونی موجود بین داده‌ها، نگاشت میان آنها را شناسایی کرده و در وزن‌های خود حفظ می‌کند و سپس با اعمال داده‌های جدید می‌تواند یادگیری خود را به الگوی جدید تعمیم داده و پاسخ مناسبی را در برابر شرایط جدید از خود نشان دهد.

همانطور که در انتهای فصل دوم گفته شد پارامترهایی که به عنوان داده‌های ورودی در شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از: عمق حفاری، وزن روی مته، سرعت دوران مته، دبی جریان سیال، دبی جریان هوا، فرسایش دندان مته و سختی سازند، می‌باشند و پارامتر خروجی برای شبکه نیز سرعت حفاری ثبت شده در اعماق مختلف برای هر یک از چاه‌ها می‌باشد. در ادامه به شرح مختصر این پارامترها می‌پردازیم.

۵-۲-۱ پارامترهای ورودی

۱- عمق چاه

متراژ حفاری شده بر حسب متر است. در اینجا عمق عمودی چاه مد نظر است.

۲- وزن روی مته

این پارامتر اصلی بر حسب کیلوپوند بیان می شود.

۳- سرعت چرخش مته

این پارامتر بر حسب تعداد دوران مته در دقیقه (RPM) بیان می شود.

۴- فرسایش دندان مته

فاکتوری است که به طور خطی با عمق در نظر گرفته می شود و زمانی که مته سالم و جدید است آن را با عدد ۰ و زمانی که مته تعویض می شود بر اساس مقدار گزارش شده فرسودگی دندان مته، عدد گذاری می شود. کاهش نرخ نفوذ به دلیل فرسودگی مته در مته های دندان فولادی معمولاً به شدت مته های دکمه ای نیست.

۵- سختی سازند

جدول (۵-۱) میزان سختی سازندهای میدان شانول را نشان می دهد. در این مطالعه اطلاعات جدول زیر براساس مطالعه لیتولوژی و خصوصیات آنها و گزارش های روزانه زمین شناسی که در مورد سختی لیتولوژی و درصد حضور آنها از چاه های موجود در قسمت های مختلف میدان و بررسی لاگ زمین شناسی و در نهایت بررسی همزمان وزن روی مته، مقدار فرسایش دندان مته، نوع مته، زمان، متراژ کارکرد مته و همچنین نرخ نفوذ ارائه شده بدست آورده شد. همچنین باید توجه داشت در این میدان به علت اینکه در سه حفره ذکر شده که حفاری با هوا و کف داشته اند دارای شکستگی و تخلخل بالا می باشد پس تراکم لایه ها در اعماق بیشتر زیاد نمی باشد.

جدول ۵-۱ میزان سختی معرفی شده برای سازندهای میدان شانول

سازند	نرم- نرم متوسط	متوسط- سخت	سخت	بسیار سخت
میشان- پایه فلهیان	۴	-	-	-
فلهیان- دشتک C	-	۶	-	-
دشتک C- پایه کنگان	-	-	۸	-
پایه کنگان- دالان	-	-	-	۱۰

۶- دبی جریان سیال

حجم سیال حفاری خروجی از پمپ که بر حسب گالن بر دقیقه بیان می شود.

۷- دبی جریان هوا

مقدار حجم هوای خروجی کمپرسورهای هوا به درون چاه است. دبی جریان هوا بر حسب

استاندارد فوت مکعب در دقیقه (CFM) بیان می شود.

دو پارامتر آخر در حقیقت پارامترهای مربوط به هیدرولیک حفاری می باشد که تأثیر مستقیم در

تمیزسازی چاه دارد. در واقع ترکیب این دو پارامتر (دبی جریان سیال حفاری، دبی جریان هوا) به همراه

درصد سورفکتانت سیال حفاری ما را ایجاد کرده و نقش انتقال خرده ها از ته چاه به سطح و تمیزسازی

چاه را بر عهده دارند.

۵-۲-۲ پارامتر خروجی یا پاسخ شبکه

۱- سرعت حفاری

نسبت مقدار متراژ حفاری شده بر حسب متر به زمان مفیدی که مته حفاری کرده، سرعت نفوذ

مته یا همان سرعت حفاری تعریف می شود.

$$ROP = \frac{meterage(m)}{time(hr)}$$

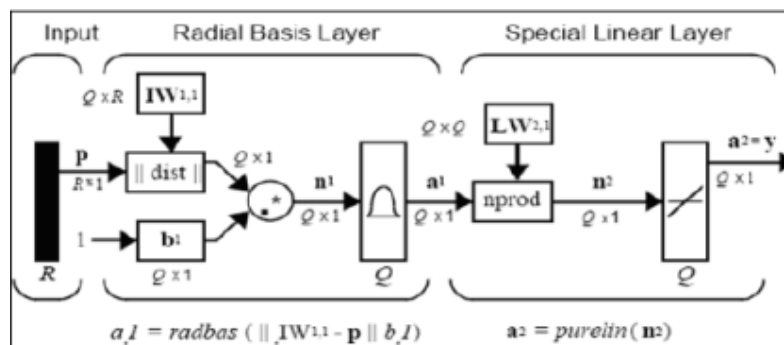
۵-۳ پیش بینی سرعت حفاری با شبکه عصبی

در ابتدا برای اینکه بتوانیم برای حالت های طراحی شده آزمایش که جلوتر به آن می پردازیم پاسخ

را بدست آوریم، می بایست مدلی را ایجاد کنیم، که بتوانیم سرعت حفاری را برای حالات طراحی شده

آزمایش پیش‌بینی کنیم. لذا در اینجا از قدرت شبکه عصبی رگرسیون عمومی^۱، جهت پیش‌بینی سرعت حفاری استفاده می‌شود.

شبکه عصبی رگرسیون عمومی را می‌توان به عنوان یک شبکه شعاعی نرمالیزه شده در نظر گرفت که برای هر الگوی آموزشی یک نرون در لایه پنهان دارد. این شبکه یک الگوریتم یادگیری تک گذر با ساختار موازی است که در سال ۱۹۹۰ توسط اسپچت^۲ اختراع شد. این شبکه بر اساس تابع چگالی احتمال^۳ پایه گذاری شده و از خصیصه‌های آن زمان آموزش سریع و مدل سازی توابع غیر خطی است. صورت الگوریتمی این شبکه را برای هر مسئله رگرسیونی در جایی که هیچگونه فرضیاتی برای قضاوت خطی بودن نباشد، می‌توان استفاده کرد. این شبکه پارامترهای شبکه پس انتشار خطا را ندارد ولی در عوض فاکتور تعدیلی (هموارساز)^۴ دارد که مقدار بهینه آن در طی آموزش با سعی و خطا با توجه به میانگین مربعات خطای مجموعه آموزش و آزمایش و همچنین بر اساس ضریب همبستگی^۵ هر مرحله بدست می‌آید (مرادزاده و همکاران، ۱۳۹۰). همانطور که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، ساختار این شبکه شبیه به ساختار کلی شبکه شعاعی است؛ فقط تفاوت جزئی در لایه دوم دارد.



شکل ۵-۱ ساختار شبکه عصبی رگرسیون عمومی (مرادزاده و همکاران، ۱۳۹۰)

- 1- General Regression Neural Network (GRNN)
- 2 - Specht
- 3 -Probability density function (PDF)
- 4 - Smooth factor
- 5- Correlation Coefficient

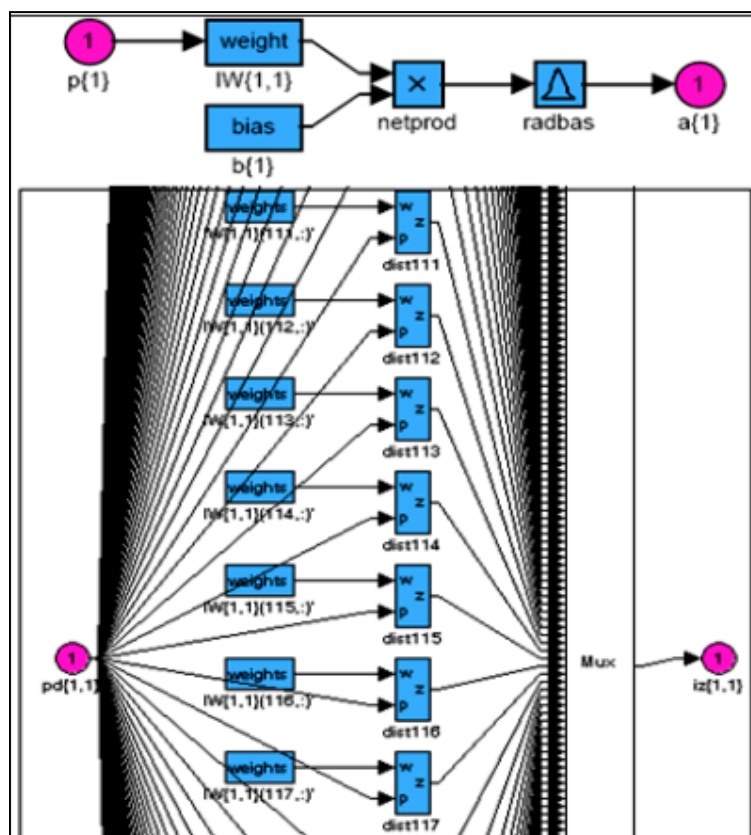
برای بالا بردن قابلیت شبکه، ورودی‌های شبکه (پارامترهای حفاری) در بازه ۱- و ۱ نرمال شدند. بعد از تشکیل پایگاه داده از ۵۵۰۵ داده، ۷۰ درصد داده‌ها را برای آموزش، ۲۰ درصد را برای تست و ۱۰ درصد را برای اعتبارسنجی شبکه استفاده نمودیم.

بعد از وارد کردن پارامترها، شبکه را اجرا می‌کنیم. با مقدار دهی به فاکتور تعدیل وزن‌های هر ورودی برای برآورد خروجی مشخص می‌شوند. مقدار بهینه این فاکتور، با چندین بار اجرای شبکه و سعی و خطا با توجه به کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMS) و بالاترین ضریب همبستگی برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش، انتخاب می‌شود. جدول (۵-۲) فاکتورهای تعدیلی مختلف را برای مجموعه‌های آموزش و آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که از جدول مشخص است با افزایش فاکتور هموارساز مقدار ضریب همبستگی در داده‌های آموزش با توجه به اساس روش شبکه عصبی رگرسیونی، به آرامی کاهش ولی داده‌های آزمون تا مرحله‌ای افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در نتیجه بر اساس ضریب همبستگی آزمایش و آموزش و همچنین کمترین خطای مرحله آزمایش فاکتور تعدیلی بهینه انتخاب می‌شود.

جدول ۵-۲ مقادیر ضرایب همبستگی (R) و جذر میانگین مربعات خطا (RMS) با فاکتورهای تعدیلی متفاوت در دو سری داده آموزش و آزمایش

SF (فاکتور تعدیلی)	R (آزمایش)	R (آموزش)	RMS (آزمایش)	RMS (آموزش)
۰/۰۲	۰/۹۷۹۳	۰/۹۹۹۸	۰/۰۳۱	۰/۰۰۲۴
۰/۰۴	۰/۹۸۰۶	۰/۹۹۹۸	۰/۰۳۰۲	۰/۰۰۳۱
۰/۰۶	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴
۰/۰۸	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۹۱	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۶۹
۰/۱	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۸۵	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۸۹
۰/۲	۰/۹۸۶۸	۰/۹۸۹۴	۰/۰۱۵	۰/۰۲۴۳
۰/۳	۰/۹۶۸۹	۰/۹۷۵۵	۰/۰۳۸۲	۰/۰۳۶۹

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول (۵-۲)، مدل نهایی با توجه به ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در دو مرحله آموزش و آزمایش انتخاب شد. مدل نهایی شبکه‌ای است که از فاکتور تعدیلی ۰/۰۶ برای آموزش استفاده می‌کند. این شبکه برای پیش‌بینی سرعت حفاری دارای یک لایه ورودی با هفت نرون، یک لایه پنهان با تعداد ۳۸۵۳ نرون (داده‌های آموزش) و تابع محرک شعاعی و یک لایه خروجی با یک نرون و تابع محرک خطی در آن می‌باشد. نمای کلی شبکه عصبی بهینه رگرسیون عمومی و بخشی از لایه پنهان آن در شکل (۵-۲) آورده شده است.

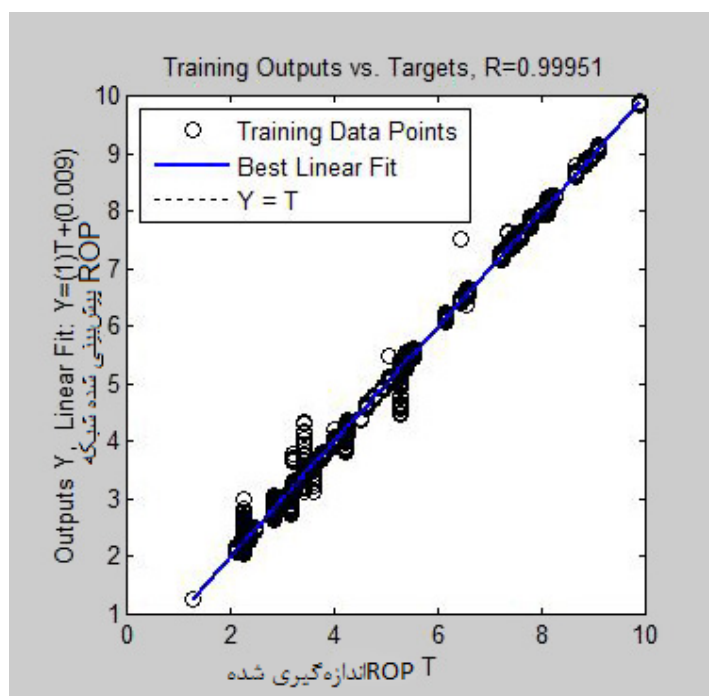


شکل ۵-۲ نمای کلی از شبکه عصبی رگرسیون عمومی و بخشی از لایه پنهان آن

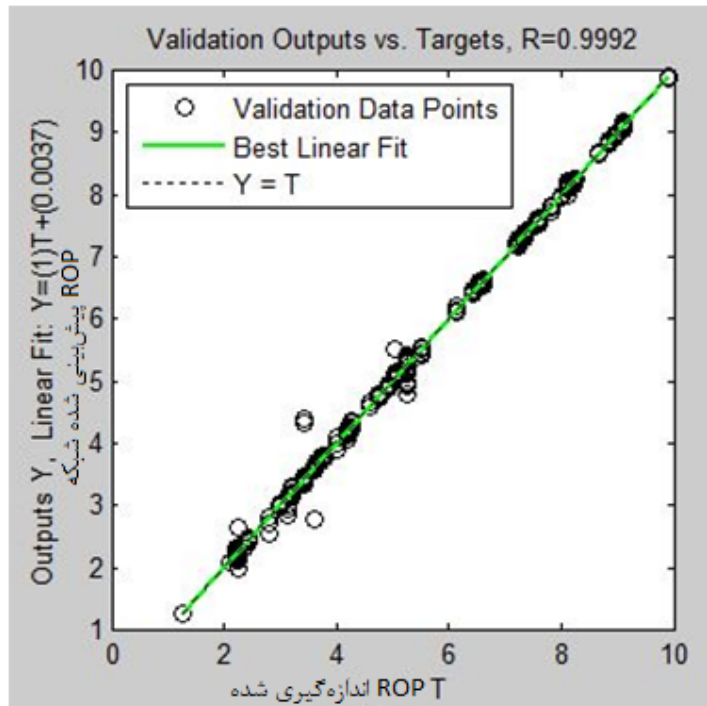
میزان ضریب همبستگی که با R نشان داده می‌شود یک ملاک مناسب برای میزان کارایی شبکه می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد یک ارتباط خوب و کامل بین خروجی‌ها و هدف به وجود آمده است. برای ارزیابی توانمندی شبکه طراحی شده رگرسیون عمومی در پیش‌بینی سرعت حفاری برای حالات طراحی آزمایش، نمودار همبستگی موجود بین مقادیر سرعت

حفاری پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر سرعت حفاری اندازه‌گیری شده (واقعی) در مرحله آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به ترتیب در شکل‌های (۳-۵)، (۴-۵) و (۵-۵) آمده است. می‌دانیم که زاویه شیب بهترین خط برازش شده (خط قرمز رنگ در شکل‌های (۳-۵)، (۴-۵)، (۵-۵)) کیفیت برازش مدل حاصل از شبکه را با داده نشان می‌دهد.

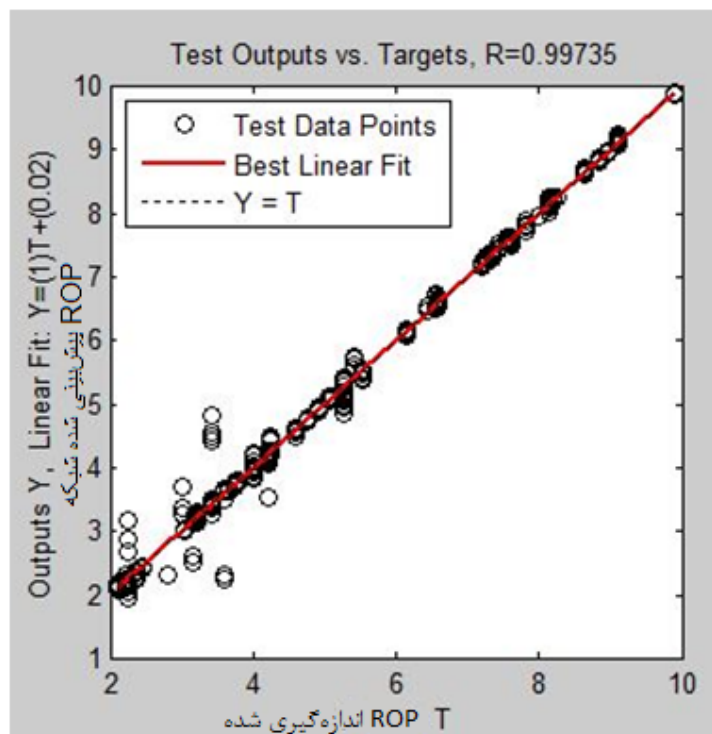
همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود مقادیر ضرائب همبستگی برای مجموعه داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به ترتیب ۰/۹۹۹۵۱، ۰/۹۹۹۲، ۰/۹۹۷۳۵ می‌باشد که مقدارهای قابل قبولی برای این مدل و حاکی از عملکرد خوب این شبکه می‌باشند.



شکل ۳-۵ سرعت حفاری اندازه‌گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده‌های آموزش



شکل ۴-۵ سرعت حفاری اندازه گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده های اعتبارسنجی



شکل ۵-۵ سرعت حفاری اندازه گیری شده (واقعی) در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای داده های تست (آزمایش)

پس از اطمینان از عملکرد شبکه حال باید برای طراحی آزمایشات، روش مناسبی را انتخاب کرد. در ابتدا قابل ذکر است که پارامترهای گشتاور و فشار پمپ نیز همراه با پارامترهای جدول (۲-۴ فصل دوم) در نظر گرفته شد، اما بدلیل همبستگی بالای فشار پمپ و دبی تزریق سیال و بی تاثیر شناخته شدن گشتاور بر نرخ نفوذ مته، این دو پارامتر حذف گردید. در ادامه در فصل بعدی برای بررسی کامل تر فاکتورهای مهم و اثرگذار بر سرعت حفاری از روش باکس- بنکن، استفاده خواهد شد و همچنین دلیل عدم استفاده از روش فاکتوریال کامل، در فصل بعد ارائه می گردد.

فصل ششم

مدل سازی نرخ نفوذ متده حناری با کف بلمک روش طراحى آزمایشات

۶-۱ مقدمه

در این فصل از روش طراحی آزمایشات جهت تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر خروجی سیستم دارند استفاده می‌شود. در این خصوص از همان ۷ پارامتری که در فصل‌های قبل ذکر شد استفاده شده است. این امر با آنالیز حساسیت^۱ نیز امکان‌پذیر است، اما این روش تنها نرخ نفوذ مته (سرعت حفاری) را بر اساس اثرات تکی پارامترها ارزیابی می‌کند و اثرات متقابل بین پارامترهای مختلف را وارد معادله نمی‌کند. لذا استفاده از طراحی آزمایشات بهترین روش برای ساده کردن و ملموس کردن ارتباط ایجاد شده بین پارامترهای مختلف حفاری و سرعت حفاری می‌باشد. در آخر با بدست آوردن بهترین ترکیب پارامترهای قابل کنترل، سرعت حفاری را بهینه خواهیم کرد.

۶-۲ طراحی سطح پاسخ (باکس - بنکن)

همانطور که در فصل سوم ذکر شد در روش طراحی آزمایشات بعد از مشخص کردن پارامترها و روش مورد نظر باید برای پارامترها (عامل‌ها) تعیین سطح شود. در مطالعه حاضر در بکارگیری روش باکس- بنکن از سه سطح برای طراحی انتخاب شده است. دانش لازم برای فهم بهتر در مورد اثرات مستقل و محدودیت درجه آزادی در اجراهای طراحی بسیار مهم می‌باشد. در جدول (۶-۱) پارامترهای مورد نظر با سطح‌های انتخاب شده برای طراحی، نشان داده شده است. محدوده بالا و پایین برای طراحی با توجه به اطلاعات واقعی میدان شانول انتخاب شده‌اند.

جدول ۶-۱ سطح تعیین شده پارامترها جهت طراحی به روش باکس- بنکن

پارامتر	(-۱) پایین	(۰) متوسط	(۱) بالا
عمق (متر)	۷۶	۱۵۰۲	۲۹۲۹
وزن روی مته (کیلوپوند)	۹	۱۷	۲۵
سرعت چرخش (RPM)	۸۰	۹۳	۱۰۵
دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	۹۰	۱۲۵	۱۶۰
دبی تزریق هوا (CFM)	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰
فرسودگی دندان مته	۰	۴	۸
سختی سازند	۴	۶	۸

1 - Sensitivity analysis

بعد از تعیین سطوح برای هر پارامتر، حالت‌های طراحی شده را برای پیش‌بینی متغیر پاسخ که همان سرعت حفاری می‌باشد به مدلی که با شبکه عصبی در فصل پنجم به عنوان شبیه‌ساز عملیات حفاری ایجاد کردیم، می‌دهیم. همانطور که در فصل سوم ذکر شد یکی از اهداف استفاده از این روش تعداد اجرای کم و مفیدتر می‌باشد. در طراحی باکس- بنکن بر اساس تعداد پارامتر انتخابی، تعداد اجرا مشخص است. این روش برای تعداد پارامتر ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۵ تعداد اجرا را تعریف می‌کند. در اینجا با هفت پارامتر ورودی تنها ۶۲ اجرا خواهیم داشت. جدول (۶-۲) نمونه حالات طراحی شده به روش باکس- بنکن را نشان می‌دهد. تعیین سطوح برای هر پارامتر همانطور که در فصل سوم توضیح داده شد بر اساس شناخت پارامترها و هدف مورد نظر باید انتخاب گردد. در این طراحی نیز بر اساس داده‌های واقعی چاه‌های ۶ و ۱۰ میدان شانول و چگونگی محدوده تغییرات پارامترها سطوح مورد نظر انتخاب گردید. کدهای ۱، ۰ و ۱- با توجه به جدول (۶-۱) به ترتیب معرف سطوح بالا، متوسط و پائین هستند.

جدول ۶-۲ نمونه حالات طراحی شده به روش باکس- بنکن و سرعت حفاری پیش‌بینی شده از شبکه عصبی

عمق	وزن روی مته	سرعت چرخش	دبی سیال	دبی هوا	فرسایش دندانه مته	سختی سازند	سرعت حفاری تخمینی (متر بر ساعت)
۱	۰	۰	۰	۰	-۱	۱	۵/۰۸۵۸
۰	۰	۱	۱	۰	۰	-۱	۹/۹۰۹۵
۰	۱	-۱	۰	۰	۱	۰	۲/۱۴۷۴
۰	۰	۰	-۱	۱	-۱	۰	۶/۴۹۱۲
۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۱	۹/۸۸۸۴
۰	۰	-۱	۱	۰	۰	-۱	۲/۸۹۷۱
۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۹/۲۲۲۹
-۱	۰	۱	۰	-۱	۰	۰	۹/۸۷۷۳
۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۹/۹۰۹۴
۱	۰	۱	۰	-۱	۰	۰	۹/۶۲۶۲
۱	۱	۰	-۱	۰	۰	۰	۸/۴۶۲۰
-۱	۰	۰	۰	۰	-۱	-۱	۵/۱۸۸۰
-۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۹/۸۹۹۴
-۱	۰	۰	۰	۰	-۱	۱	۹/۸۳۸۹
۰	۰	-۱	-۱	۰	۰	۱	۲/۲۷۹۴
۰	-۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱۱/۲۷۹

قابل ذکر است که تمامی پارامترها قبل از ورود به شبکه عصبی برای پیش‌بینی سرعت حفاری باید بین (۱ و -۱) نرمالایز شوند. برای این کار می‌توان از دستور NORMC در فضای نرم‌افزار متلب و یا دستور NORMDIST در فضای نرم‌افزار اکسل استفاده کرد. هنگامی که شبکه عصبی رگرسیون عمومی سرعت حفاری را پیش‌بینی می‌کند به صورت کد، می‌باشد که توسط فرمول زیر تبدیل به سرعت حفاری واقعی (غیر کد) می‌شود. در واقع فرمول زیر برای تبدیل عدد از حالت نرمالایز شده (۱، -۱) به غیر نرمالایز می‌باشد.

$$ROP = \frac{Simulation+1}{2} \times (\max rop - \min rop) + \min rop \quad (1-6)$$

Simulation، منظور سرعت حفاری پیش‌بینی شده به صورت نرمالایز می‌باشد و ماکزیمم، مینیوموم سرعت حفاری (ROP) منظور کمترین و بیشترین سرعت حفاری که به عنوان آموزش در شبکه استفاده کردیم، می‌باشد. جدول (۶-۲) سرعت حفاری تخمین زده شده از شبکه عصبی رگرسیون عمومی، برای حالات‌های طراحی را نشان می‌دهد.

بعد از تبدیل سرعت حفاری نرمالایز پیش‌بینی شده توسط شبکه با فرمول (۶-۱)، آنالیز سطح پاسخ را انجام می‌دهیم. برای انجام تحلیل نتایج در این روش ابتدا باید نوع مدلی که می‌خواهیم را انتخاب کنیم. نرم افزار مینی‌تب به ما برای روش سطح پاسخ چهار گزینه انتخاب می‌دهد. جدول ۶-۳ مدل‌های تحلیل طراحی سطح پاسخ را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۳ نوع مدل طراحی سطح پاسخ توسط نرم‌افزار مینی‌تب

This model type	fits these terms
1) linear	A B C D
2) linear and squares	A B C D A*A B*B C*C D*D
3) linear and two-way interactions	A B C D A*B A*C A*D B*C B*D C*D
4) full quadratic	A B C D A*A B*B C*C D*D A*B A*C A*D B*C B*D C*D

سپس در این مرحله بر اساس نیازمان مدل را جهت تحلیل انتخاب می‌نماییم. بر این اساس مدل درجه دوم کامل^۱ انتخاب شد. زیرا پارامترهای حفاری علاوه بر اثر تقابل با دیگر پارامترها با خودشان نیز اثر تقابل دارند و اگر اینها با یکدیگر دیده شوند باعث ایجاد اثرات چشم‌گیری بر پاسخ که همان سرعت حفاری است، می‌شوند. بعد از اجرای برنامه، نرم‌افزار دو نوع جدول (۴-۶ و ۵-۶) را جهت تحلیل نتایج به ما می‌دهد. همانطور که در فصل سوم توضیح داده شد، باید بر اساس مقدار عبارت P که از لحاظ آماری باید با سطح آلفا مقایسه شود تحلیل را انجام می‌دهیم. مقدار عبارت P احتمال بدست آوردن یک مقدار در حداقل کران مقدار واقعی محاسبه شده از یک تست آماری است و سطح آلفا در واقع مقدار احتمال ایجاد خطا در تحلیل است که به عنوان سطح اهمیت پارامترها بطور معمول ۰/۰۵ تعریف می‌شود. سطح آلفا طبق تعریف ۰/۰۵ مشخص شده است، سپس پارامترهایی که دارای $p > 0.05$ هستند را یک به یک باید حذف و دوباره برنامه را اجرا کنیم. این امر تا جایی ادامه دارد که تنها عامل‌هایی با مقدار $p < 0.05$ باقی بماند. که این عامل‌های باقی مانده با $p < 0.05$ پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر پاسخ ما هستند (MiniTab, 2012). در جدول (۴-۶) نتایج را می‌توان مشاهده کرد. این جدول آنالیز انجام شده را برای واحد کد شده (پارامترهای نرمالایز شده در جدول (۲-۶)، جهت تخمین ضرایب (Coef) پارامترها نشان می‌دهد.

مقادیر مندرج در جدول (۴-۶) از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند (MiniTab, 2012):

$$coefficients(b) = (X \cdot X)^{-1} (X \cdot Y) \quad (۲-۶)$$

که در آن X ماتریس طراحی، شامل یک مقدار ثابت موجود در معادله بدست آمده (constant) و Y بردار پاسخ است.

هر پارامتر در جدول (۴-۶) دارای یک ضریب می‌باشد که با استفاده از این ضریب می‌توان معادله ارتباط بین پارامترها و سرعت حفاری را بدست آورد. باید دقت داشت که ضرایب جدول (۴-۶) با داده‌های نرمالایز شده (کد شده) بدست آمده پس هنگام استفاده از معادله باید پارامترهای ورودی را به صورت نرمالایز استفاده کرد.

1-Full quadratic

جدول ۴-۶ تخمین ضرایب رگرسیون در واحد نرمالایز شده طراحی باکس- بنکن

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6.05118	0.08165	74.107	0.000
md	0.01909	0.06236	0.306	0.761
wob	-0.76225	0.06236	-12.222	0.000
rpm	2.23684	0.06236	35.867	0.000
gpm	0.95418	0.06236	15.300	0.000
air	1.60378	0.06236	25.716	0.000
tooth wear	-0.29654	0.06236	-4.755	0.000
Hardness	-0.29556	0.06236	-4.739	0.000
md*md	0.89886	0.08080	11.125	0.000
wob*wob	0.49165	0.08080	6.085	0.000
air*air	0.74295	0.08080	9.195	0.000
hardness*hardness	0.43532	0.08080	5.388	0.000
md*wob	-0.46699	0.10802	-4.323	0.000
md*gpm	-2.44699	0.10802	-22.653	0.000
md*hardness	-2.34652	0.10802	-21.723	0.000
wob*rpm	0.69634	0.10802	6.446	0.000
wob*gpm	-0.46124	0.10802	-4.270	0.000
wob*air	-0.69786	0.10802	-6.461	0.000
wob*tooth wear	0.45119	0.10802	4.177	0.000
rpm*gpm	-0.37198	0.10802	-3.444	0.002
rpm*air	-1.71293	0.10802	-15.858	0.000
rpm*tooth wear	0.55259	0.10802	5.116	0.000
rpm*hardness	-1.49677	0.10802	-13.857	0.000
gpm*air	3.09791	0.10802	28.679	0.000
gpm*tooth wear	0.76339	0.10802	7.067	0.000
gpm*hardness	1.51756	0.10802	14.049	0.000
air*tooth wear	-0.55414	0.10802	-5.130	0.000
air*hardness	1.15889	0.10802	10.729	0.000
tooth wear*hardness	-0.28929	0.10802	-2.678	0.011
S = 0.305522 PRESS = 13.0596				
R-Sq = 99.39% R-Sq(pred) = 97.43% R-Sq(adj) = 98.88%				

$$\text{standard error of the coefficient (SE Coff)} = \text{Sqrt}((X'X^{-1}) S^2) \quad (۳-۶)$$

در رابطه فوق S و S² به ترتیب انحراف معیار ضرایب و میانگین مربع خطا (MSE) تخمین زده

شده است.

$$t. \text{value } (T) = \frac{\text{Estimated coefficient}}{\text{Standard error of coefficient}} \quad (۴-۶)$$

مقدار T نیز مانند عبارت P پارامترهای مهم را مشخص می‌کند. به این صورت که هر چه مقدار

عبارت T بیشتر باشد، اهمیت آن پارامتر بیشتر است. همانطور که از جدول (۴-۶) پیداست پارامترهایی

که بر اساس مقدار P دارای اهمیت شناخته شده اند همچنان دارای مقدار T بزرگ هستند. البته با بزرگی این مقدار می توان ترتیب اهمیت پارامترها را مشخص کرد.

برای تعیین ضرایب و نشان دادن اینکه چقدر تغییرات در پاسخ توسط مدل قابل توضیح است از کمیت R^2 یا ضریب تعیین استفاده می شود. مجذور R بیشتر، نشان دهنده تناسب خوب و بالای مدل با داده ها می باشد (MiniTab, 2012). در این تحلیل مقدار $R^2 = 99/39$ درصد شده است که تناسب بالای مدل ایجاد شده با داده ها را نشان می دهد.

$$R^2 = 1 - \frac{SS Error}{SS Total} \quad (5-6)$$

روش دیگری که می توان این فرمول را ارائه کرد:

$$R^2 = \frac{SS Regression}{SS Total} \quad (6-6)$$

تعداد پارامترها در مدل و مقایسه مدل ها با پارامترهای متفاوت را با R^2 اصلاح شده¹ می توان

بدست آورد.

$$R^2 Adjusted = 1 - \frac{MS Error}{SS Total / DF Total} \quad (7-6)$$

مقدار R^2 اصلاح شده در جدول (4-6) برابر 98/88٪ است. این مقدار همانطور که گفته شد به تعداد پارامتر در مدل بستگی دارد. با توجه به مقدار بدست آمده و تعداد پارامتری که در مدل بکار برده شده است تناسب بالای مدل با داده ها مشهود است.

برای ارزیابی توانایی پیش بینی مدل برای کمیت مورد نظر، از عبارت PRESS استفاده می کنیم.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{1-h_i} \right)^2 \quad (8-6)$$

که در آن n تعداد مشاهدات، e_i باقی مانده ها، و h_i عناصر قطری ماتریس $(X(X'X)^{-1}X')$ می باشند.

X ماتریس طراحی و X' معکوس ماتریس طراحی است.

برای این که بدانیم مدل ما چطور پاسخ را برای داده های جدید پیش بینی می کند، باید به مجذور

R پیش بینی شده² توجه کرد. مقدار بالای R^2 بدست آمده در جدول فوق نشان دهنده این است که مدل

قابلیت بالایی در پیش بینی دارد.

1-R- Square Adjusted

2- predicted R2

$$R^2(PRED) = 1 - PRESS/SS Total = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{e_i}{1-h_i})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (9-6)$$

در رابطه بالا y_i مقدار پاسخ مشاهده شده، \bar{y} میانگین پاسخ، n تعداد مشاهدات، e_i باقی مانده‌ها، h_i عناصر قطری $(X(X'X)^{-1}X')$ ، و X ماتریس پیش‌بینی هستند (MiniTab, 2012).

با توجه به جدول (۴-۶) پارامتر عمق (md) دارای مقدار $P=0.76 > 0.05$ است علاوه بر آن دارای مقدار T بسیار کوچک است پس نتیجه می‌شود این پارامتر به صورت تکی اثر ناچیزی بر سرعت حفاری دارد، اما ترکیب پارامتر عمق با دیگر پارامترها به صورت اثرات مربعات و متقابل بر اساس مقدار P آنها دارای اهمیت است پس نمی‌توان با اینکه به صورت تکی بر سرعت حفاری اثر ندارد آنرا از پارامترها حذف گردد. با توجه به مقدار بزرگی عبارت T برای هر پارامتر در قسمت اثرات خطی، پارامتر سرعت چرخش (RPM) بیشترین تاثیر و پارامتر عمق کمترین تاثیر را بر سرعت حفاری دارند. در قسمت اثرات مربعات، عبارت مربع عمق (md^2) بیشترین تاثیر و عبارت سختی سازند ($Hardness^2$) کمترین تاثیر را بر سرعت حفاری دارا می‌باشند. همچنین در قسمت اثرات متقابل، عبارت هیدرولیک ما یعنی دبی تزریقی سیال در تقابل با دبی تزریقی هوا ($gpm*air$) بیشترین و عبارت فرسایش دندانته مته در تقابل با سختی سازند ($Tooth\ wear*Hardness$) کمترین تاثیر را بر سرعت حفاری دارند. مشهود است که با کنترل پارامترهای قابل کنترل می‌توان اثرات پارامترهای غیر قابل کنترل و محیطی (عمق، فرسایش دندانته مته، سختی سازند) را به حداقل رساند.

جدول (۵-۶) آنالیز واریانس انجام شده برای طراحی با روش باکس-بنکن را نشان می‌دهد.

مقادیر مندرج در جدول ذیل از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند (MiniTab, 2012):

$$Sum\ of\ squares\ (SS)\ regression = b \cdot X \cdot Y - (1/n) Y \cdot JY \quad (10-6)$$

$$SS\ Error = Y \cdot Y - b \cdot X \cdot Y \quad (11-6)$$

$$SS\ Total = Y \cdot Y - (1/n) Y \cdot JY \quad (12-6)$$

جایی که J ماتریس $n \times n$ از یک S (انحراف معیار خطای تخمین زده شده) و n تعداد مشاهدات یا همان تعداد اجزای آزمایش است. مجموع مربعات کل، تمام تغییرات در داده‌ها را نشان می‌دهد در

حالی که مجموع مربعات رگرسیون، بخشی از تغییراتی که توسط فاکتورها توضیح داده شده باشد را نشان می دهد.

جدول ۶-۵ آنالیز واریانس برای طراحی باکس-بنکن

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	28	505.448	505.448	18.052	193.39	0.000
Linear	7	221.824	221.824	31.689	339.49	0.000
md	1	0.009	0.009	0.009	0.09	0.761
wob	1	13.944	13.944	13.944	149.39	0.000
rpm	1	120.082	120.082	120.082	1286.46	0.000
gpm	1	21.851	21.851	21.851	234.09	0.000
air	1	61.730	61.730	61.730	661.32	0.000
tooth wear	1	2.111	2.111	2.111	22.61	0.000
hardness	1	2.097	2.097	2.097	22.46	0.000
Square	4	20.144	20.144	5.036	53.95	0.000
md*md	1	8.327	11.552	11.552	123.76	0.000
wob*wob	1	2.090	3.456	3.456	37.03	0.000
air*air	1	7.018	7.892	7.892	84.55	0.000
hardness*hardness	1	2.709	2.709	2.709	29.03	0.000
Interaction	17	263.480	263.480	15.499	166.04	0.000
md*wob	1	1.745	1.745	1.745	18.69	0.000
md*gpm	1	47.902	47.902	47.902	513.18	0.000
md*hardness	1	44.049	44.049	44.049	471.91	0.000
wob*rpm	1	3.879	3.879	3.879	41.56	0.000
wob*gpm	1	1.702	1.702	1.702	18.23	0.000
wob*air	1	3.896	3.896	3.896	41.74	0.000
wob*tooth wear	1	1.629	1.629	1.629	17.45	0.000
rpm*gpm	1	1.107	1.107	1.107	11.86	0.002
rpm*air	1	23.473	23.473	23.473	251.47	0.000
rpm*tooth wear	1	2.443	2.443	2.443	26.17	0.000
rpm*hardness	1	17.922	17.922	17.922	192.01	0.000
gpm*air	1	76.776	76.776	76.776	822.51	0.000
gpm*tooth wear	1	4.662	4.662	4.662	49.95	0.000
gpm*hardness	1	18.424	18.424	18.424	197.38	0.000
air*tooth wear	1	2.457	2.457	2.457	26.32	0.000
air*hardness	1	10.744	10.744	10.744	115.10	0.000
tooth wear*hardness	1	0.670	0.670	0.670	7.17	0.011
Residual Error	33	3.080	3.080	0.093		
Lack-of-Fit	28	3.080	3.080	0.110	1.183	0.079
Total	61	508.528				

اجزای واریانس مجموع مربعات رگرسیون به دو بخش زیر تقسیم می‌شود:

۱- مجموع مربعات متوالی^۱ (Seq SS)، یک بخش منحصر بفرد از مجموع مربعات رگرسیون می‌باشد که توسط یک فاکتور با توجه به فاکتورهای قبلی وارد شده در مدل توضیح داده شده است. مجموع مربعات متوالی وابسته به ترتیب وارد شدن فاکتورها به مدل می‌باشد.

۲- مجموع مربعات اصلاح شده^۲ (adj SS)، همان مجموع مربعات متوالی است با این تفاوت که به ترتیب ورود فاکتورها به مدل بستگی ندارد. در واقع یک بخش منحصر بفرد از مجموع مربعات رگرسیون توضیح داده شده توسط یک فاکتور با توجه به دیگر فاکتورهای وارد شده در مدل، بدون در نظر گرفتن ترتیب ورود آنها به مدل است.

بطور مثال محاسبه مجموع مربعات اصلاح شده برای حالت هفت فاکتور که در طراحی استفاده کردیم به صورت زیر است :

$$SSR(X7|X6, X5, X4, X3, X2, X1) = SSE(X6, X5, X4, X3, X2, X1) - SSE(X1: X7) \quad (۱۳-۶)$$

که در آن SSR مجموع مربعات اصلاح شده و Xi پارامترهای ورودی به مدل هستند. در این مثال SSR برای X7 (پارامتر هفتم) است، با توجه به اینکه X1:X6 (پارامترهای اول تا ششم) قبلا در مدل وارد شده‌اند.

میانگین مربعات اصلاح شده^۳ (adj MS)، از تقسیم مجموع مربعات اصلاح شده بر درجه آزادی (DF) هر فاکتور بدست می‌آید.

$$Adj MS = Adj SS / DF \quad (۱۴-۶)$$

پارامتر دیگر آنالیز واریانس، F می‌باشد. این پارامتر هم نشان می‌دهد آیا عبارتهای موجود در مدل مهم هستند یا خیر. این پارامتر از فرمول زیر بدست می‌آید (MiniTab, 2012):

$$F = Adj MS(term) / MS Error \quad (۱۵-۶)$$

1- Sequential sum of squares

2- Adjusted sum of squares

3- Adjusted mean square

اگر فاکتورها به طور تصادفی در مدل وارد شوند، F با استفاده از میانگین مربعات مورد نظر برای هر عبارت ساخته می‌شود.

تخمین انحراف معیار خطا در مدل توسط پارامتر S نشان داده می‌شود. باید توجه داشت که میانگین مربع خطا برابر با مجذور S می‌باشد (MiniTab, 2012).

$$S^2 = MS Error \quad (16-6)$$

هرچه مقدار S پایین‌تر باشد مقدار خطای ما در معادله کمتر است. در اینجا با توجه به جدول (4-6) مقدار ترم خطا، $s=0.305$ ، کوچک است زیرا مقدار تغییرپذیری برای خطا کاهش یافته است که با توجه به تعریف مقدار قابل قبولی برای مدل است.

علاوه بر آن در جداول (4-6) و (5-6) پارامترهای ورودی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

عمق = md ، وزن روی مته = wob ، سرعت چرخش = rpm ، دبی تزریق سیال = gpm

دبی تزریق هوا = air ، فرسایش دندان مته = $tooth\ wear$ ، سختی سازند = $hardness$

3-6 تفسیر آنالیز واریانس

بر اساس مقدار p جدول آنالیز واریانس (5-6) ترم‌های مربع سرعت چرخش (rpm^2)، مربع دبی سیال (gpm^2)، مربع فرسایش دندان مته ($tooth\ wear^2$)، و همچنین اثرات متقابل عمق*سرعت چرخش ($md*rpm$)، عمق*دبی هوا ($md*air$)، عمق*فرسایش دندان مته ($md*tooth\ wear$)، وزن روی مته*سختی سازند ($wob*hardness$)، به علت اینکه دارای مقدار P بزرگتر از 0.05 (سطح آلفا) بودند لذا از لحاظ آماری تاثیر چندانی بر روی نرخ نفوذ مته ندارند و در طول آنالیز حذف گردیدند.

همانطور که در جدول (5-6) مشاهده می‌شود تمامی عبارات‌های باقی مانده به جزء پارامتر عمق، دارای P کمتر از 0.05 هستند. پارامتر عمق دارای $P=0.761$ می‌باشد که طبق تعریفی که کردیم باید از معادله حذف گردد. اما به علت اینکه ترم مربعات عمق (md^2) و همچنین اثرات متقابل آن با دیگر پارامترها، دارای p کمتر از 0.05 می‌باشند پس دارای اهمیت بوده و نمی‌توان آن را از معادله (رابطه) بدست آمده توسط طراحی باکس-بنکن حذف کرد.

رگرسیون: این تست‌ها جهت تعیین چگونگی اثر پارامترهای ورودی بر پاسخ در مدل انجام می‌شوند. عبارت رگرسیون در جدول (۵-۶) بر اساس مقدار P مهم شناخته شده است. رگرسیون در سه درجه مختلف خطی، مربعات و متقابل در مدل تقسیم بندی می‌شود.

اثرات متقابل: همانطور که از جدول (۵-۶) پیداست، مقدار P برای اثرات متقابل کمتر از ۰/۰۵ است پس واضح است که این بخش از رگرسیون دارای اهمیت می‌باشد. این اثرات به این معنی هستند که اثر هر پارامتر بر روی سرعت حفاری (پاسخ) وابسته به چگونگی تغییر پارامتر متقابل خود می‌باشد. بطور مثال در عبارت $WOB * RPM$ ، اثر وزن روی مته بر روی سرعت حفاری وابسته به سرعت چرخش مته است. برای تمامی عبارت در این بخش نیز به همین صورت می‌باشد.

اثرات مربعات: عبارت اثر مربعات جهت ارزیابی منحنی بودن یا نبودن سطح پاسخ استفاده می‌شوند. همانطور که از جدول بالا قابل مشاهده است اثر این عبارت با مقدار P کمتر از ۰/۰۵ اهمیت پیدا کرده است. بطور مثال عبارت WOB^2 ، بیان کننده این است که ارتباط بین پارامتر وزن روی مته و سرعت حفاری از رابطه غیر خطی پیروی می‌کند.

اثرات خطی: در این قسمت از رگرسیون باید دقت کرد که تفسیر اثرات خطی در حضور اثرات مهم مربعات و متقابل، صورت گیرد. در این قسمت همانطور که در بالا ذکر شد تمامی فاکتورها به غیر از عمق دارای اثر خطی مهم بر سرعت حفاری می‌باشند.

خطای باقی مانده‌ها: این عبارت مقدار تغییرپذیری پاسخ که توسط مدل مشخص نشده را اندازه‌گیری می‌کند. تغییرپذیری مشخص نشده را می‌توان در قسمت Lack of fit در جدول (۵-۶) بررسی کرد. مقدار P عبارت عدم برازش (تناسب)^۱ در انتهای جدول نشان می‌دهد که مدل با داده‌ها تناسب قابل قبولی دارد. به این صورت که در این مورد اگر مقدار P بیشتر از ۰/۰۵ باشد نشان دهنده این است که مدل ما قابلیت توضیح در مورد اختلافات در پاسخ را دارد، اما اگر این عبارت مهم شود و مقداری کمتر از ۰/۰۵ بگیرد نشان دهنده این است که ممکن است پارامتر مهمی را از معادله حذف کرده باشیم و یا مدل نتواند توضیح خوبی برای مقادیر باقی مانده داشته باشد. همانطور که در انتهای جدول (۵-۶)

1-Lack of fit

پیدا است مقدار p برای عبارت lake of fit برابر $0/079$ شده است، که بیانگر این است که هیچ شواهدی وجود ندارد که مدل ما نتواند تغییرات در پاسخ را توضیح دهد. با توجه به جدول (۶-۵) همانطور که دیده شد مقادیر P برای عبارت‌های مربعات و متقابل‌ها، پارامترها کمتر از $0/05$ هستند پس می‌توان نتیجه گرفت که بین سرعت حفاری و دیگر پارامترها رابطه غیر خطی برقرار است.

۶-۴ تعیین اعتبار نتایج طراحی آزمایش

به طور معمول اعتبار نتایج طراحی آزمایش‌ها را با آنالیز باقیمانده‌ها تعیین می‌کنند. در آنالیز واریانس فرض می‌شود که حالت‌های طراحی (مشاهدات) دارای توزیع نرمال مستقل با واریانس یکسان برای هر سطح پارامتر مورد مطالعه هستند. این مفروضات را باید با بررسی باقی‌مانده‌ها ارزیابی نمود.

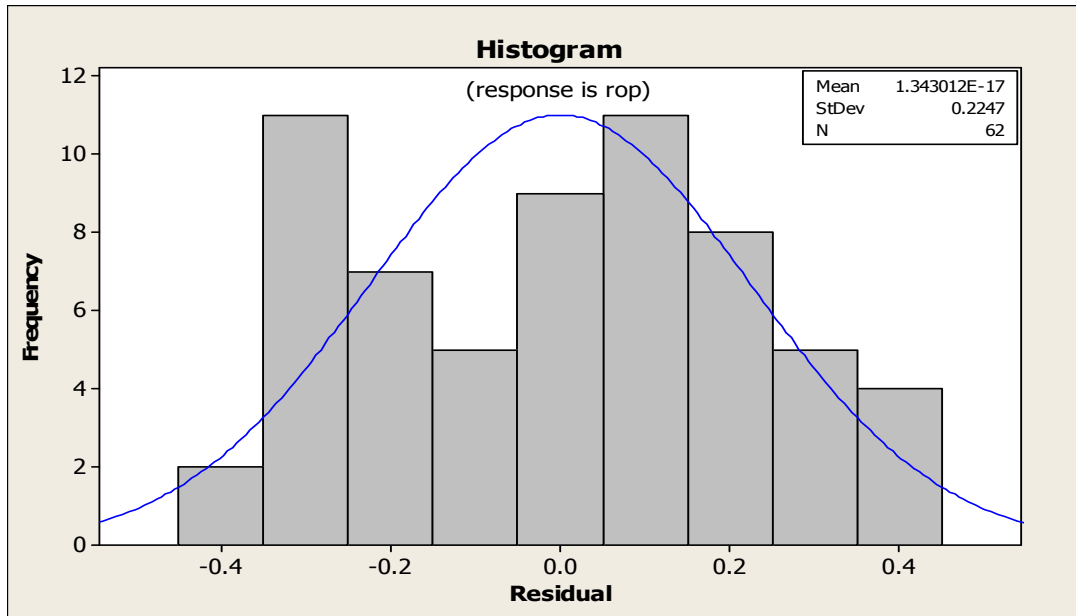
۶-۴-۱ آنالیز باقی‌مانده‌ها

مقادیر باقی‌مانده e_i ، اختلاف بین مقادیر مشاهده (Y_i) و پیش‌بینی شده (\hat{Y}_i) می‌باشد که از فرمول زیر قابل محاسبه است. مقادیر باقی‌مانده قسمتی از مشاهدات است که توسط مدل بدست آمده از طراحی آزمایش قابل توصیف نمی‌باشد.

$$e_i = (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (17-6)$$

فرض نرمال را می‌توان با رسم مقادیر باقی‌مانده به درصد، بررسی کرد. همچنین فرض مستقل بودن را می‌توان با رسم مقادیر باقی‌مانده بر حسب ترتیبی که آزمایش تکرار شده است، بررسی نمود. علاوه بر آن با استفاده از نمودارهایی همچون هیستوگرام مقادیر باقی‌مانده و رسم نمودار باقی‌مانده بر مقادیر پیش‌بینی شده، می‌توان به تعیین اعتبار برای نتایج آنالیز طراحی آزمایشات حاصل نمود.

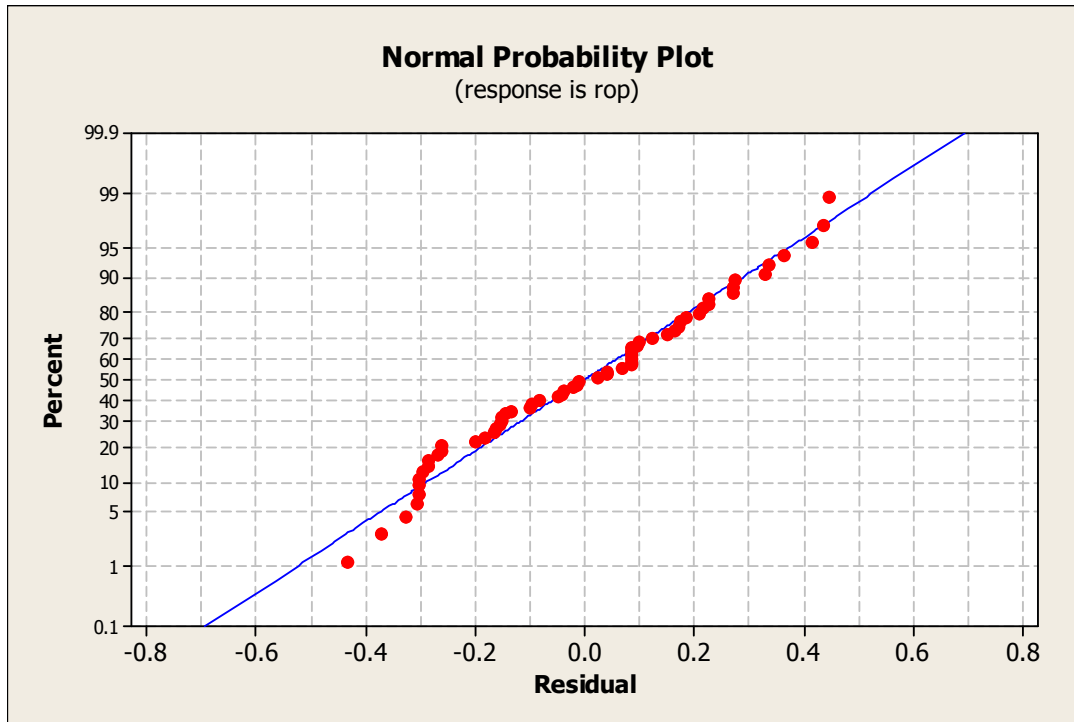
شکل (۶-۱) نمودار هیستوگرام را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار پیدا است هیستوگرام با میانگین صفر توزیع نرمال را برای مقادیر باقی‌مانده نشان می‌دهد، که این مسئله به خوبی برازش مناسب مدل را تایید می‌کند. قابل ذکر است که ظاهر هیستوگرام می‌تواند وابسته به تعداد فواصل استفاده شده در گروه داده‌ها تغییر کند. پس استفاده از نمودار احتمال توزیع نرمال برای این که متوجه بشویم باقی‌مانده‌ها نرمال هستند یا خیر می‌تواند بهتر باشد.



شکل ۶-۱ نمودار هیستوگرام مقادیر باقی مانده طراحی باکس-بنکن

همانطور که در بالا ذکر شد توزیع نرمال را از نمودار احتمال داده‌های باقی مانده نیز می‌توان متوجه شد (شکل ۶-۲). در این نمودار اگر باقی مانده‌ها توزیع نرمالی داشته باشند بطور کلی باید نقاط به صورت یک خط راست حضور پیدا کنند.

اگر نقاط در نمودار از یک خط مستقیم جدا بی‌افتند فرض نرمال بودن ممکن است نامعتبر باشد. اگر خط توزیع به صورت منحنی باشد نشان دهنده نامتقارنی می‌باشد و اگر شیب تغییر کند، وجود متغیرهای نامشخص را بیان می‌کند. اگر تعداد مشاهدات کمتر از ۵۰ تا باشد، حتی اگر داده‌ها به صورت نرمال توزیع شده باشند نیز نمودار ممکن است به صورت منحنی و غیر خطی در صفحه نمایش داده شود. همانطور که از شکل پیداست خط توزیع به صورت خط مستقیم بوده و داده‌ها نیز در نزدیکی خط آبی رنگ قرار گرفته اند؛ پس صحت توزیع نرمال داده‌ها دوباره تایید می‌شود. خط آبی رنگ خط مرجع توزیع داده‌ها می‌باشد.



شکل ۶-۲ نمودار احتمال توزیع داده‌های باقی مانده طراحی باکس- بنکن

شکل (۶-۳) نمودار باقی مانده‌ها را در مقابل سرعت حفاری پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود نمونه‌ها یا همان باقی مانده‌ها باید به صورت تصادفی اطراف خط صفر (۰) پراکنده باشند. توسط این نمودار چهار مسئله را می‌توان یافت (MiniTab, 2012):

۱. غیر ثابت بودن واریانس: یکی از فرضیات آنالیز واریانس و رگرسیون برای باقی مانده‌ها این است که واریانس ترم خطا ثابت باشد، در این نمودار نیز همین فرضیه بکار برده شده است. حال اگر ناهموازی گسترش باقی مانده‌ها را برای تمامی مقادیر پیش‌بینی شده سرعت حفاری داشته باشیم، این فرض رد خواهد شد و واریانس خطا ممکن است ثابت نباشد.
۲. منحنی بودن: اگر مدل منحنی در این نمودار بوجود آید می‌تواند نشان دهد که ما در مدل مورد استفاده نیاز به عبارت با رتبه بالاتر از خطی بودن داریم. اگر نمودار هر متغیر را بر اساس باقی مانده‌ها رسم کنیم، می‌توان متوجه شد که کدام متغیر با پاسخ ارتباط غیر خطی دارد.

۳. نقاط از نقطه ۰ دور بیافتند: در واقع مشاهداتی با مقادیر بالای باقی مانده که می تواند علت

آن ورود خطا یا داده های ورودی نامناسب باشد که باید کنترل شود.

۴. نقطه ای دور از نقاط دیگر در راستای بردار X (مقادیر پیش بینی شده) بی افتد: یعنی نقطه

مشاهده شده با تاثیر بیشتر بر مدل در مقایسه با دیگر نقاط مشاهده شده می باشد.

همانطور که از شکل (۳-۶) پیداست و بر اساس توضیحات بالا، باقی مانده به طور تصادفی اطراف

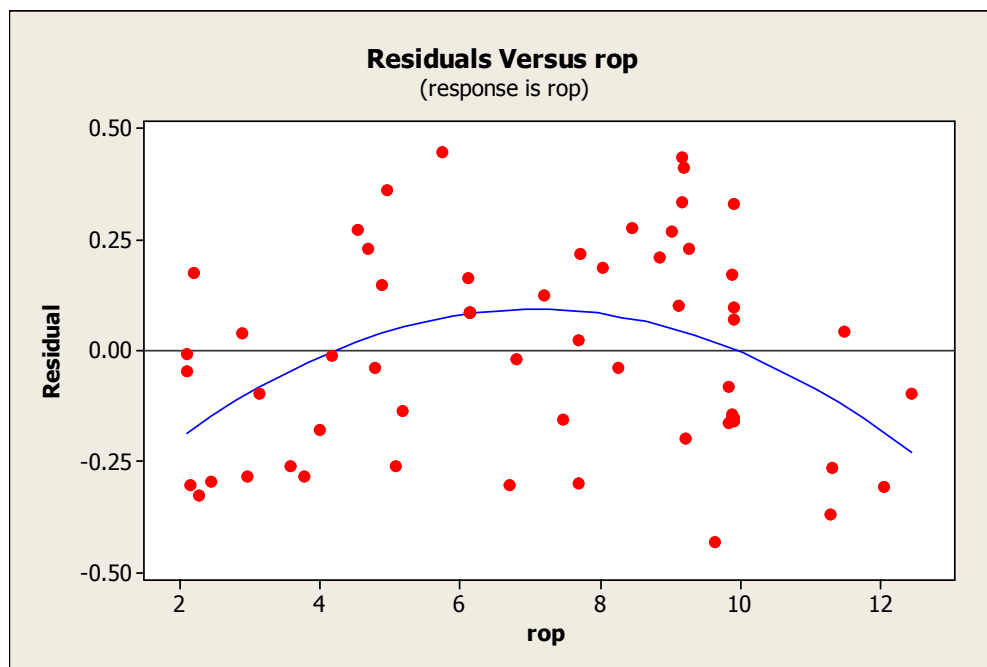
صفر پراکنده هستند و هیچ شواهدی دال بر اینکه واریانس غیر ثابت است دیده نمی شود و هیچ نقطه ای

وجود ندارد که از حول صفر یا دیگر نقاط دور افتاده باشد. در این خصوص می توان با کمک ابزار نرم افزار

MiniTab چگونگی تغییر مقادیر پاسخ را نشان داد. منحنی آبی رنگ چگونگی تغییر مقادیر پاسخ را

نماین می کند. از این منحنی آبی رنگ که پاسخ به صورت غیر خطی بوده است پس این حالت نشان

می دهد که آنالیز و معادله ما که دارای جملات با مرتبه بالاتر از خطی است، درست است.



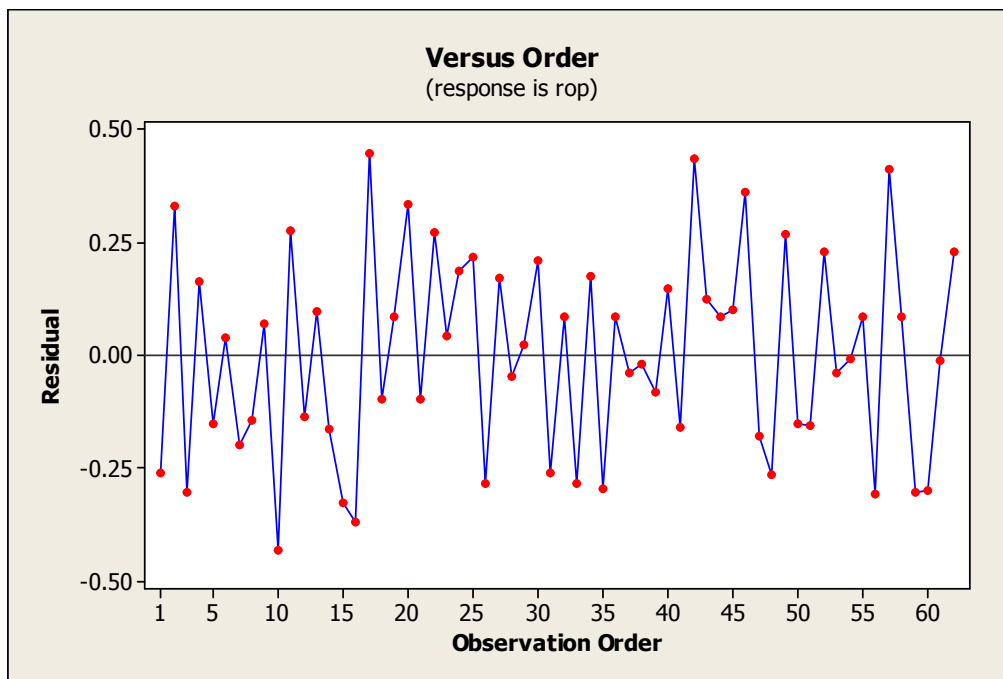
شکل ۳-۶ نمودار باقی مانده در مقابل سرعت حفاری پیش بینی شده

شکل (۴-۶) نمودار مقادیر باقی مانده را بر حسب ترتیب حالت های طراحی شده نشان می دهد. از

این شکل می توان متوجه شد که ترم های خطا با یکدیگر ارتباطی ندارند، یعنی نمودار فرضیه مستقل

بودن عبارت‌های خطا را برای مدل ما نیز تایید می‌کند. در دو صورت است که این فرضیه نقض می‌شود (MiniTab, 2012):

- باقی مانده‌ها به طور سیستماتیک با افزایش مشاهدات، کاهش یابد.
 - تغییر ناگهانی در مقادیر باقی مانده دیده شود. (بطور مثال، مقادیر باقی مانده از سمت چپ پایین خط صفر به سمت راست بالای خط صفر افزایش یابد).
- در این نمودار نیز مانند نمودار شکل (۳-۶) باید نمونه‌های باقی مانده اطراف خط آبی رنگ به طور منظم پراکنده باشند. در این نمودار نیز هیچ شواهدی از نقض فرضیه مستقل بودن ترم‌های خطا و ارتباط ترم‌های خطا با یکدیگر وجود ندارد.



شکل ۴-۶ نمودار باقی مانده بر حسب ترتیب حالات مشاهده آزمایش شده

بعد از آنالیز و بررسی مهم‌ترین پارامترها با توجه به جداول (۴-۶) و (۵-۶) رابطه‌ای که چگونگی ارتباط سرعت حفاری با پارامترهای حفاری با کف را بیان می‌کند به صورت زیر خواهد بود:

(۲۰-۵)

$$\begin{aligned}
 ROP = & (6.05118) + 0.01909 * (md) - 0.76225 * (wob) + 2.23684 * (rpm) + 0.95418 * (gpm) + \\
 & 1.60378 * (air) - 0.29654 * (tooth\ wear) - 0.29556 * (hardness) + 0.89886 * (md^2) + \\
 & 0.49165 * (wob^2) + 0.74295 * (air^2) + 0.43532 * (hardness^2) - 0.46699 * (md * wob) - \\
 & 2.44699 * (md * gpm) - 2.34652 * (md * hardness) + 0.69634 * (wob * rpm) - 0.46124 * (wob * gpm) - \\
 & 0.69786 * (wob * air) + 0.45119 * (wob * tooth\ wear) - 0.37198 * (rpm * gpm) - \\
 & 1.71293 * (rpm * air) + 0.55259 * (rpm * tooth\ wear) - 1.49677 * (rpm * hardness) + \\
 & 3.09791 * (gpm * air) + 0.76339 * (gpm * tooth\ wear) + 1.51756 * (gpm * hardness) \\
 & 0.55414 * (air * tooth\ wear) + 1.15889 * (air * hardness) - 0.28929 * (tooth \\
 & wear * hardness)
 \end{aligned}$$

باید توجه داشت که این رابطه با استفاده از ضرایب کد شده می‌باشد و ورودی‌ها به صورت (۱، ۰، ۱) نرمالایز شده هستند.

۵-۶ طراحی فاکتوریال

در این طراحی تمامی مراحل همانند طراحی سطح پاسخ می‌باشد. تنها تفاوتی که قابل ذکر است در نحوه محاسبه و آنالیز این روش است. این روش بر خلاف روش سطح پاسخ ترم‌های مربعی پارامترها را بررسی نمی‌کند و تنها به صورت فاکتوریال با ضرب پارامترها در یکدیگر محاسبه را انجام می‌دهد. یعنی تنها اثرات متقابل را می‌بیند. به طور مثال برای این حالت که دارای هفت پارامتر ورودی هستیم می‌توان تا درجه ۷ اثرات متقابل را با ضرب فاکتوریلی در یکدیگر مشاهده کرد.

حالات طراحی در صورت استفاده از روش فاکتوریال کامل در سه سطح با هفت پارامتر برابر $3^7 = 2187$ اجرا خواهد بود که تحلیل آن زمان‌بر و معادله بدست آمده پیچیده می‌شود. بنابراین در این مطالعه روش طراحی سطح پاسخ به دلیل سرعت در تحلیل و سادگی روابط نسبت به روش فاکتوریال انتخاب شد.

البته روش فاکتوریال کسری نیز که زیر مجموعه روش فاکتوریال کامل است نیز قابل بکار بردن است که در آن می‌توان با تعداد اجرای خیلی کمتر از طراحی فاکتوریال کامل این کار را انجام داد، اما چون این روش فقط در دو سطح پارامترها را می‌بیند و از آنجا که پارامترهای حفاری دارای بیش از دو سطح هستند، لذا احتمال وقوع خطای زیاد در رابطه بسیار بالا می‌رود.

روش فاکتوریال کامل نسبت به روش‌های دیگر کامل تر می‌باشد اما اگر تعداد پارامتر زیاد باشد همانطور که قبلاً ذکر شد به علت تعداد اجرای بالا و پیچیدگی زیاد، طراحی ما عملاً به علت زیادی ترم‌های مدل و ضرایب برای کاربر استفاده‌ای ندارد و غیر مفید خواهد بود.

۶-۶ بررسی تأثیر پارامترهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ متده

در این مرحله به بررسی تأثیر پارامترهای حفاری بر روی سرعت حفاری پرداخته می‌شود. بدین منظور از مدل بدست آمده از طراحی آزمایشات استفاده شده است. باید توجه شود که تأثیر پارامترها به صورت منفرد (اصلی) و اثر متقابل دیده شده است.

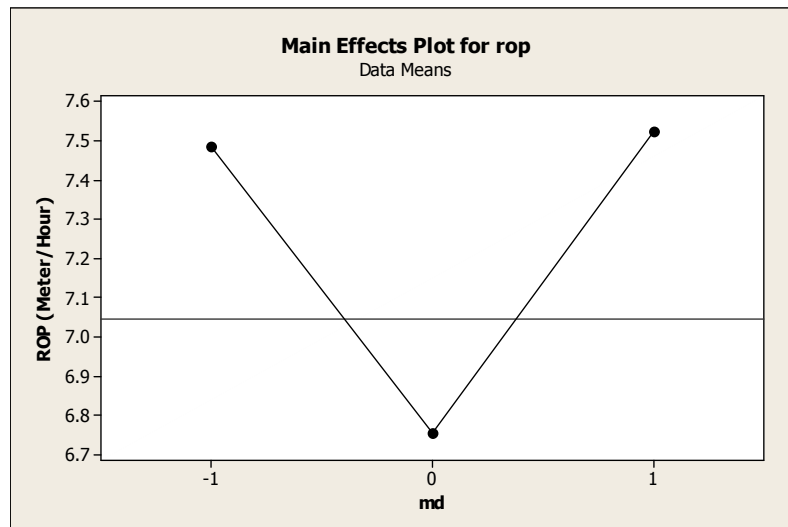
همانطور که گفته شد حفاری با کف تا عمق حدود ۲۸۵۳ متری و با متدهای ۲۶، ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ اینچی انجام شده است. به همین منظور بررسی ما در این بخش‌ها صورت می‌گیرد.

برای حفاری حفره ۲۶ اینچ در بیشتر موارد از متده با کد GTX ۴۱۵ استفاده شده است که از عمق‌های سطحی ۷۶ متری شروع شده و تا عمق ۱۳۰۰ متری ادامه داشته است. در حفاری حفره ۱۷/۵ اینچی از متده ۵۱۷ استفاده شده که تا عمق ۱۴۰۶ متری ادامه داشته و حفره ۱۲/۲۵ اینچی با متده نوع ۵۱۷ حفاری شده است که تا عمق ۲۹۳۰ متری در این حفره از حفاری با کف استفاده شده است.

۶-۶-۱ اثرات منفرد (اصلی)

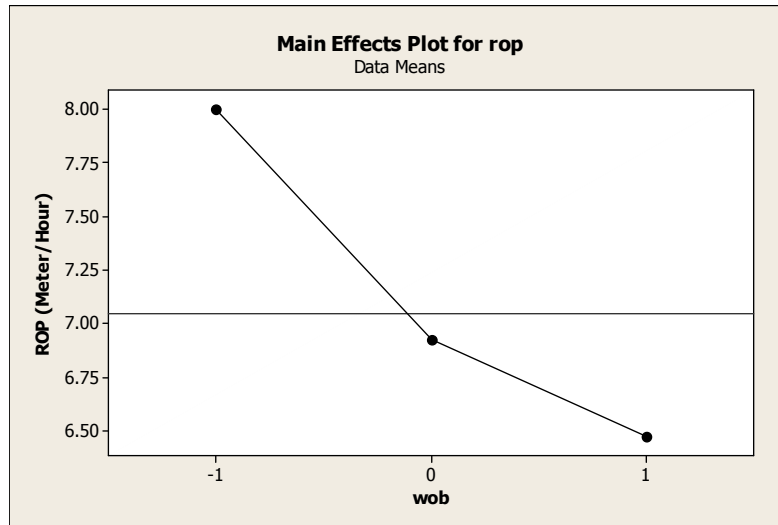
تأثیر این پارامترها بر سرعت حفاری با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها بررسی شده‌اند. شکل (۶-۵) تأثیر پارامتر عمق بر روی سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق، سرعت حفاری یک روند کاهشی دارد، که این به علت بالا رفتن سختی سنگ می‌باشد. البته قابل ذکر است که اگر چاه دارای فشار نرمال باشد (که طبق گزارش واحد mud logging شانول دارای سازندهایی با فشار نرمال است)، با افزایش عمق سرعت حفاری می‌بایست کم شود. باید توجه داشت که مقادیر ۱- و ۰ در این شکل و دیگر شکل‌ها با توجه به تعریف سطوح به ترتیب مربوط به حفرات ۲۶ و ۱۷/۵ اینچی می‌باشند و مقدار سطح ۱ مربوط به حفره ۱۲/۲۵ اینچی است. بعد از سطح متوسط در حفره ۱۲/۲۵ اینچ دلیل افزایش سرعت حفاری با افزایش عمق تنها سعی حفار بر بارگذاری بر روی متده و کنترل پارامترها جهت افزایش سرعت حفاری و کنترل آن می‌باشد. اثر پارامتر عمق در دیگر پارامترها نهفته

است لذا توضیح اثر منفرد آن بسیار مشکل است. خط افقی مرجع در تمامی میانگین تغییرات سرعت حفاری نسبت به هر پارامتر را نشان می‌دهد.



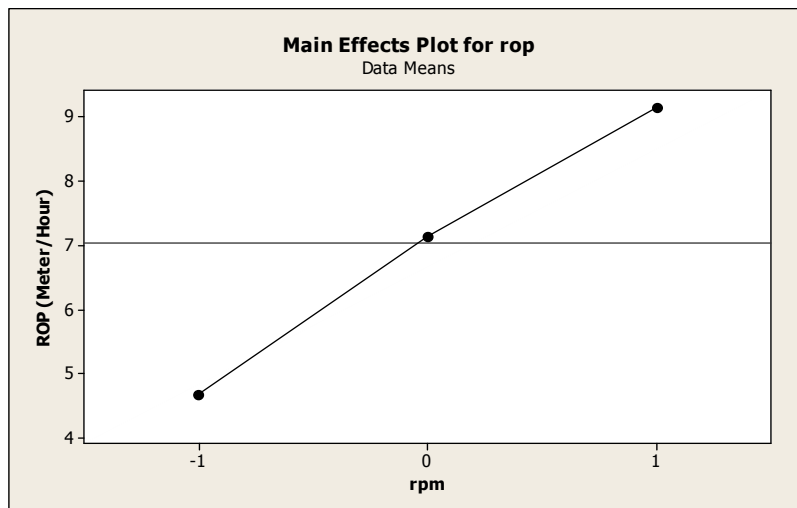
شکل ۶-۵ تاثیر پارامتر عمق بر سرعت حفاری

شکل (۶-۶) تاثیر پارامتر وزن روی مته بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در حفره‌های ۲۶ و ۱۷/۵ اینچی با افزایش وزن روی مته یک روند کاهشی در سرعت حفاری را داریم و در حفره ۱۲/۲۵ اینچی با افزایش بیش از حد وزن روی مته همانطور که قبلا در تعاریف گفته شد، این روند کاهش در سرعت حفاری ادامه دارد و باعث کاهش چشم‌گیر سرعت حفاری و حتی گیر کردن لوله حفاری ممکن است بشود. بنابراین هرچه وزن روی مته بیشتر شود میزان تولید خرده‌های حفاری افزایش یافته و در پی آن فرسایش دندان‌ها مته بیشتر شده و در صورت عملکرد ضعیف هیدرولیک سیال، سرعت حفاری کاهش می‌یابد.



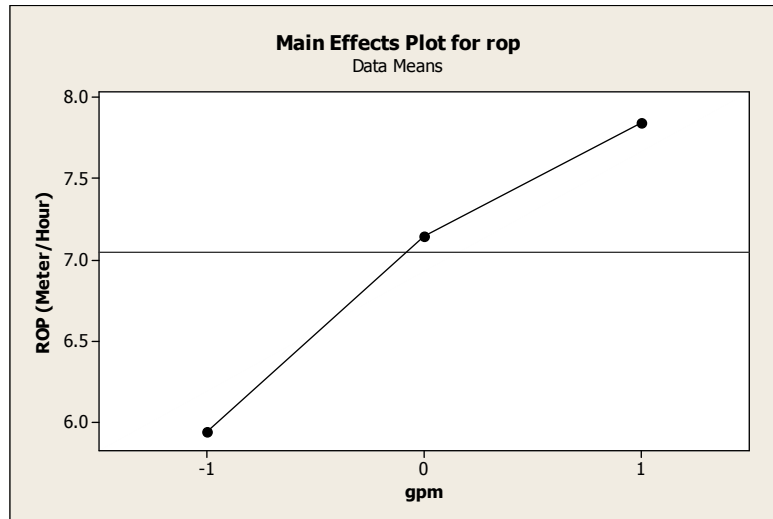
شکل ۶-۶ تاثیر پارامتر وزن روی مته بر سرعت حفاری

شکل (۶-۷) تاثیر پارامتر سرعت چرخش مته بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش (دوران)، سرعت حفاری یک روند افزایشی دارد.



شکل ۶-۷ تاثیر پارامتر سرعت چرخش مته بر سرعت حفاری

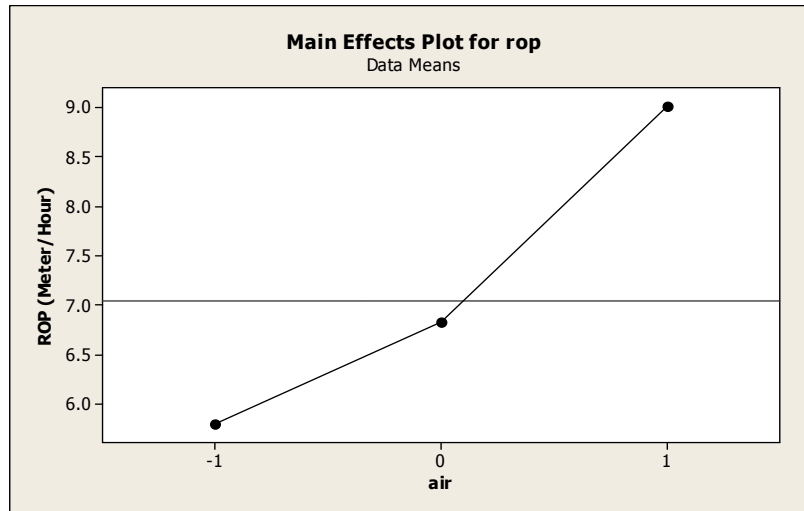
شکل (۶-۸) تاثیر پارامتر دبی سیال تزریقی بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه عمق زیاد می‌شود و از حفره ۲۶ اینچ به سمت حفره ۱۲/۲۵ اینچ می‌رویم با افزایش تزریق سیال، سرعت حفاری نیز روند افزایشی دارد. اما باید توجه داشت که اگر این مقدار از حد نرمال زیادتر تزریق شود باعث کم کردن کیفیت کف می‌شود.



شکل ۶-۸ تاثیر پارامتر دبی سیال تزریقی بر سرعت حفاری

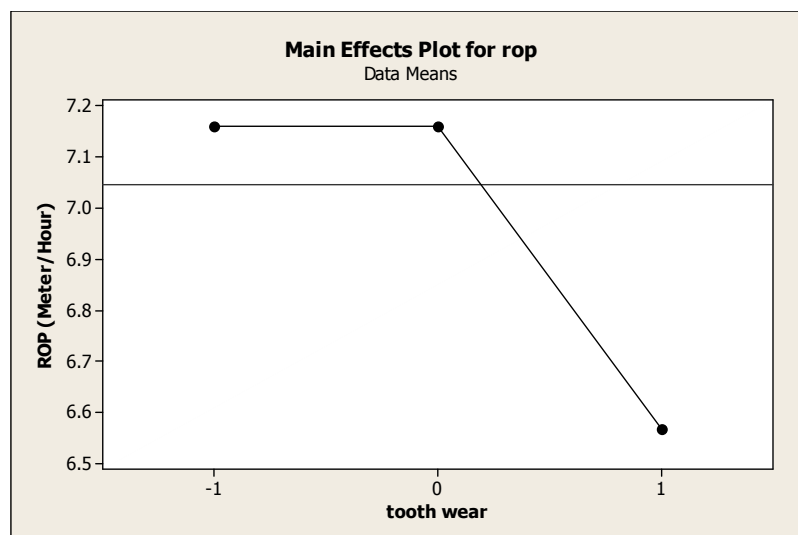
شکل (۶-۹) تاثیر پارامتر دبی تزریق هوا بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش حجم هوای تزریقی با توجه به عمق سرعت حفاری روند افزایشی دارد. این پارامتر هم مانند پارامتر دبی سیال تزریقی باید متناسب به یکدیگر تزریق شوند که کیفیت کف پایین نیاید. باید توجه داشت که اگر حجم هوای تزریقی بیش از مقدار متناسب باشد به علت اینکه سرعت سیال هوا بیشتر از سیال مایع تزریقی است، سیال کف را می‌برد^۱ و انتقال خرده‌های حفاری به سطح ضعیف‌تر صورت می‌گیرد. باید توجه داشت دو پارامتر ذکر شده دبی تزریق هوا و دبی تزریق سیال تأثیر مستقیم بر روی سرعت حفاری ندارند بلکه با تمیزسازی چاه و انتقال به موقع خرده‌ها به سطح باعث افزایش سرعت حفاری می‌شوند.

1-Shear



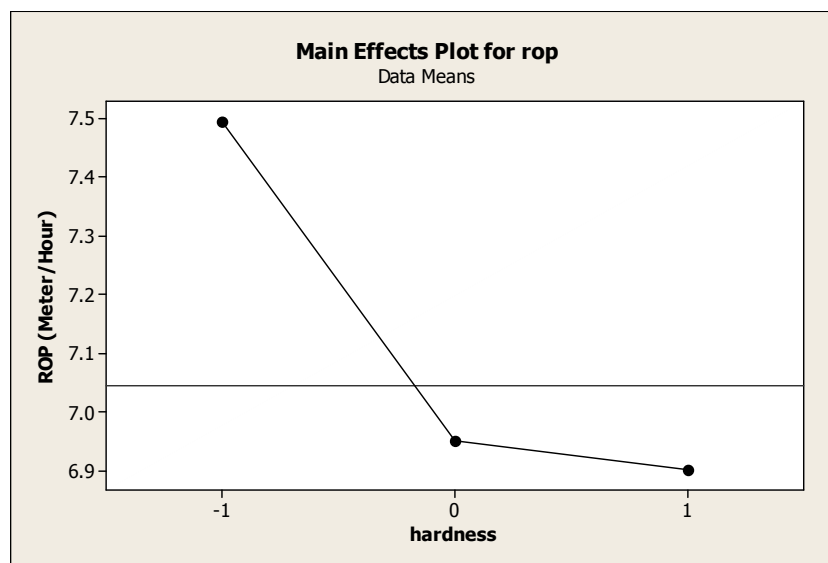
شکل ۶-۹ تاثیر پارامتر دبی هوای تزریقی بر سرعت حفاری

شکل (۶-۱۰) تاثیر پارامتر فرسایش دندان مته بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که می‌دانیم هر چه فرسایش دندان مته بیشتر شود سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت. در اینجا نیز مشهود است که از زمانی که مته نو بوده (سطح ۱-) تا حد متوسط (سطح ۰) خوردگی برسد، سرعت حفاری روند کاهشی داشته اما شیب آن بسیار کم است می‌توان نتیجه گرفت که تا این حد خوردگی مته هنوز قابل استفاده بوده و زیاد باعث کاهش سرعت حفاری نمی‌شود. اما وقتی از حد وسط خوردگی آن بیشتر می‌شود باعث کاهش سرعت حفاری و می‌بایست مته تعویض شود.



شکل ۶-۱۰ تاثیر پارامتر فرسایش دندان مته بر سرعت حفاری

شکل (۶-۱۱) تاثیر پارامتر سختی سنگ بر سرعت حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که می‌دانیم با افزایش سختی سنگ سرعت حفاری باید کاهش یابد. در اینجا نیز با افزایش سختی سرعت حفاری روند کاهشی دارد. اما مشاهده می‌شود که از حد سختی متوسط (۰) که بالا می‌رویم این روند کاهشی ادامه دارد اما شیب آن کمتر شده است، این تنها به این علت است که در اینجا احتمال می‌رود که با کنترل دیگر پارامترها از جمله وزن روی مته و تعویض مته، توانسته اند شیب روند کاهشی سرعت حفاری را کم کنند.



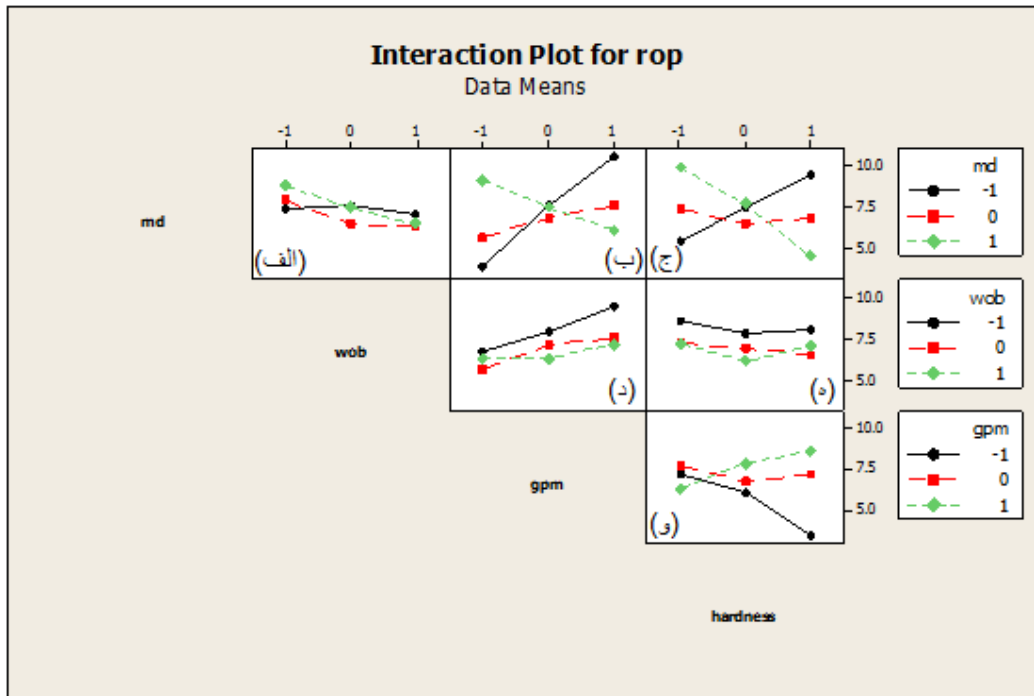
شکل ۶-۱۱ تاثیر پارامتر سختی سازند بر سرعت حفاری

۶-۶-۲ اثرات متقابل پارامترها

در اثرات متقابل می‌توان بررسی کرد که پارامترها چگونه با هم تغییر می‌کنند و چه اثری با یکدیگر بر سرعت حفاری دارند. در اینجا ۱۷ عبارت اثر متقابل که در جدول (۶-۴) مشخص شده را بررسی می‌کنیم. منظور از کدهای (۱، ۰، -۱) در اینجا، همان سطوح تعیین شده برای هر پارامتر در جدول (۶-۱) است. این اشکال را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار MiniTab بدست آورد.

شکل (۶-۱۲) اثر متقابل بین پارامترهای عمق، وزن روی مته، دبی تزریق سیال، و سختی سنگ را بر سرعت حفاری نشان می‌دهد. همانطور که پیداست در این شکل ۶ اثر متقابل پارامترها را روی سرعت

حفاری بررسی می‌کنیم. در اینجا خط سیاه رنگ (دایره شکل) نماد سطح پایین، خط قرمز رنگ (مربع شکل) نماد سطح متوسط، و خط سبز رنگ (لوزی شکل) نماد سطح بالا می‌باشد.



شکل ۶-۱۲ تاثیرات متقابل عمق و وزن روی مته، (ب) عمق و دبی تزریقی سیال، (ج) عمق و سختی سنگ، (د) وزن روی مته و دبی تزریقی سیال، (ه) وزن روی مته و سختی سنگ، (و) دبی تزریقی سیال و سختی سنگ بر سرعت حفاری

۱- اثر متقابل عمق و وزن روی مته: همانطور که از شکل (۶-۱۲-الف) پیداست تمامی سطوح عمق با وزن روی مته در گیر بوده که نشان دهنده مهم بودن اثر متقابل بین این دو پارامتر بر سرعت حفاری می‌باشد. اگر عمق در سطح پایین باشد با افزایش وزن روی مته سرعت حفاری روند افزایشی تا آستانه کمی بعد از حد متوسط وزن روی مته خواهد داشت اما از آن نقطه به بعد روند نسبتاً کاهشی دارد. اگر عمق به سطح متوسط خود برسد با افزایش وزن روی مته سرعت حفاری روند کاهشی دارد همچنین وقتی به اعماق بالا می‌رسیم اگر وزن روی مته را زیاد کنیم (خط سبز رنگ) به علت افزایش حجم خرده‌های حفاری و افزایش فرسایش دندانه مته، باعث کاهش در سرعت حفاری خواهیم شد.

۲- اثر متقابل عمق و دبی تزریق سیال: در شکل (۶-۱۲-ب) نیز در اعماق کم تا سطح متوسط، با افزایش دبی تزریقی سیال، سرعت حفاری افزایش می‌یابد اما وقتی به اعماق بالاتر می‌رسیم با افزایش

دبی تزریق سیال سرعت حفاری روند کاهش (خط سبز رنگ لوزی شکل) خواهد داشت، که این می‌تواند به دلیل استفاده بیش از حد سیال و پایین آمدن کیفیت کف باشد و سیال نمی‌تواند خوب چاه را تمیز کند.

۳- اثر متقابل عمق و سختی سنگ: در اعماق کم به این علت که دارای سازندهای نرم و نرم-متوسط هستیم سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت (شکل ۶-۱۲-ج). اما وقتی به اعماق متوسط و بالا یعنی حفره ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ اینچی می‌رسیم به این علت که سازندهای ما دارای سختی متوسط-سخت و سخت هستند سرعت حفاری دارای روند کاهش خواهد بود. در نتیجه همانطور که مشهود است با افزایش سختی سازند در اعماق مختلف، سرعت حفاری کاهش می‌یابد.

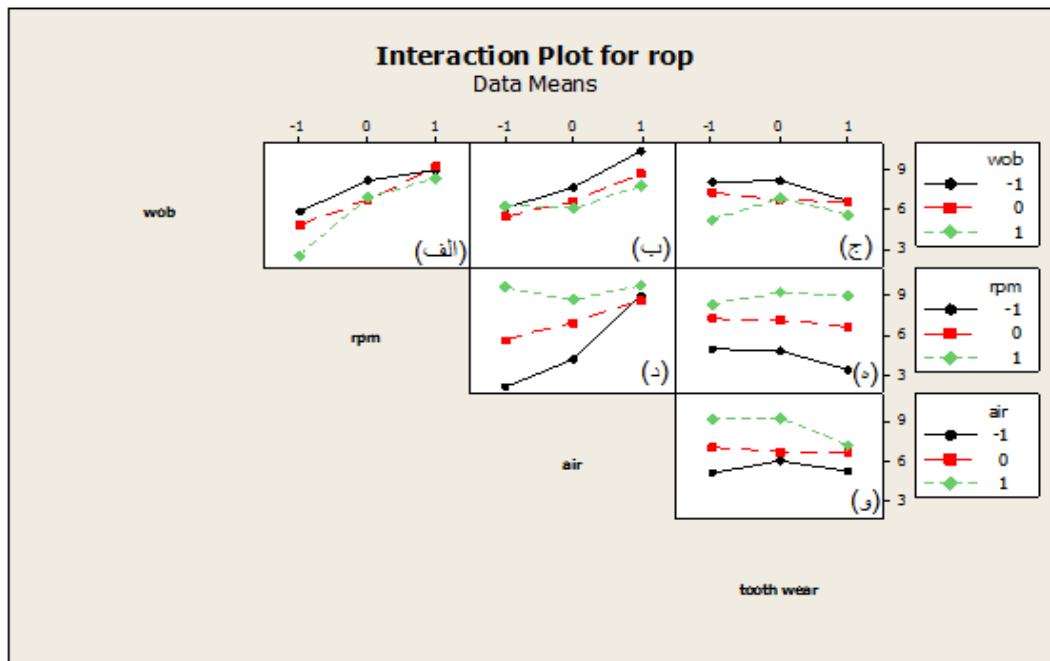
۴- اثر متقابل وزن روی مته و دبی سیال تزریقی: در شکل (۶-۱۲-د) جایی که از وزن روی مته کمتر استفاده کنیم اگر دبی سیال را بالا ببریم سرعت حفاری به این علت که سریعتر چاه از خرده‌های حفاری پاک می‌شود روند افزایشی چشم‌گیری خواهد داشت. در ایجاد متوسط وزن روی مته خرده‌ها نسبتاً زیادتر شده‌اند و وقتی دبی سیال را از سطح کم به سطح زیاد تغییر دهیم به علت اینکه سیال درون چاهی ما هنوز دارای کیفیت مطلوبی است سرعت حفاری روند افزایشی دارد اما وقتی وزن روی مته زیاد شود مجبور به زیاد کردن دبی سیال برای تمیز سازی بهتر هستیم که این امر به علت این که ممکن است به کیفیت کف لطمه وارد کند و کیفیت کف را پایین بیاورد در نتیجه با سرعت حفاری تقریباً ثابتی روبه‌رو می‌شویم. پس نتیجه می‌شود که اگر وزن روی مته متناسب یا دبی سیال باشد می‌توان دارای سرعت حفاری مطلوب بود.

۵- اثر متقابل وزن روی مته و سختی سنگ: همانطور که در شکل (۶-۱۲-ه) پیداست اگر وزن روی مته در سطح پایین خود باشد و سختی سنگ افزایش یابد سرعت حفاری روند کاهش دارد و سپس ثابت می‌شود ولی وقتی وزن روی مته را در سطح متوسط خود قرار می‌دهیم و سختی زیاد می‌شود دارای یک سرعت حفاری تقریباً ثابت خواهیم بود. زمانی که سختی به سطح بالای خود می‌رسد آنوقت این مقدار متوسط وزن کافی نمی‌باشد و سرعت حفاری کمی کاهش می‌یابد (خط قرمز رنگ، مربعی شکل). اما در جایی که از ابتدا وزن روی مته زیاد باشد، تا وقتی که مقدار سختی متوسط (۰) برسیم سرعت حفاری به این علت که در سازندهای نرم‌تر وزن بیش از حد روی مته اعمال شده کاهش می‌یابد ولی

وقتی به سازند سخت تر می‌رسیم به این علت که مته زیاد در سنگ فرو نمی‌رود و خرده بیش از حد تولید نمی‌شود با تمیز سازی خوب چاه، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت.

۶- اثر متقابل دبی سیال تزریقی و سختی سنگ: همانطور که در شکل (۶-۱۲) دیده می‌شود وقتی سختی زیاد می‌شود وزن روی مته کمی بیشتر می‌شود که این باعث ایجاد خرده‌های بیشتر خواهد شد، پس وقتی دبی سیال تزریقی ما کم باشد و سختی سنگ زیاد شود به این علت که ته چاه کامل تمیز نمی‌شود سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت. اما وقتی دبی تزریق سیال را به سطح بالای خود می‌رسانیم (خط سبز رنگ، لوزی شکل) هرچه سختی زیاد شود سرعت حفاری به این علت که سیال قادر به تمیز کردن چاه می‌باشد، دارای روند افزایشی می‌گردد.

شکل (۶-۱۳) اثر متقابل بین پارامترهای وزن روی مته، سرعت دوران مته، دبی تزریق هوا و فرسایش دندان مته بر سرعت حفاری نشان داده شده است. در این شکل نیز ۶ اثر متقابل بین پارامترها بر سرعت حفاری بررسی می‌شود.



شکل ۶-۱۳ اثرات متقابل پارامترهای (الف) وزن روی مته و سرعت دوران، (ب) وزن روی مته و دبی تزریق هوا، (ج) وزن روی مته و فرسایش مته، (د) سرعت دوران مته و دبی تزریق هوا، (ه) سرعت دوران مته و فرسایش مته، (و) دبی تزریق هوا و فرسایش مته بر سرعت حفاری

۱- اثر متقابل وزن روی مته و سرعت دوران: همانطور که در شکل (۶-۱۳-الف) مشاهده می‌شود در هر سه سطح وزن روی مته، اگر سرعت دوران افزایش یابد سرعت حفاری نیز افزایش خواهد یافت. که این امر از لحاظ مهندسی نیز قابل تایید است.

۲- اثر متقابل وزن روی مته و دبی تزریق هوا: در دو حالتی که وزن روی مته را کم (خط مشکی، دایره شکل) و متوسط (خط قرمز، مربع شکل) قرار می‌دهیم به این علت که خرده‌های حفاری در وضع متعادلی قرار دارند با افزایش دبی تزریق هوا، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت. اما وقتی وزن روی مته را در سطح بالای خود قرار می‌دهیم (خط سبز رنگ) میزان حجم خرده‌ها افزایش می‌یابد و به نسبت باید هیدرولیک خوب عمل کند. همانطور که در شکل (۶-۱۳-ب) دیده می‌شود وقتی حجم هوا را تا حد متوسط خود زیاد می‌کنیم فقط سرعت حفاری کنترل شده است و البته کمی روند کاهشی دارد، اما وقتی از حد متوسط به سطح بالای تزریق می‌رسد به این علت که قابلیت حمل خرده‌ها به سطح بیشتر شده است پس طبیعی است که سرعت حفاری روند افزایشی پیدا کند.

۳- اثر متقابل وزن روی مته و فرسایش دندان مته: در هر سه حالت شکل (۶-۱۳-ج) می‌توان مشاهده کرد که وزن روی مته تا زمانی سرعت حفاری را کنترل می‌کند که فرسایش دندان مته از حد سطح متوسط خود نگذشته باشد. از سطح متوسط به بعد به علت افزایش فرسایش دندان مته، سرعت حفاری روند نزولی خواهد داشت.

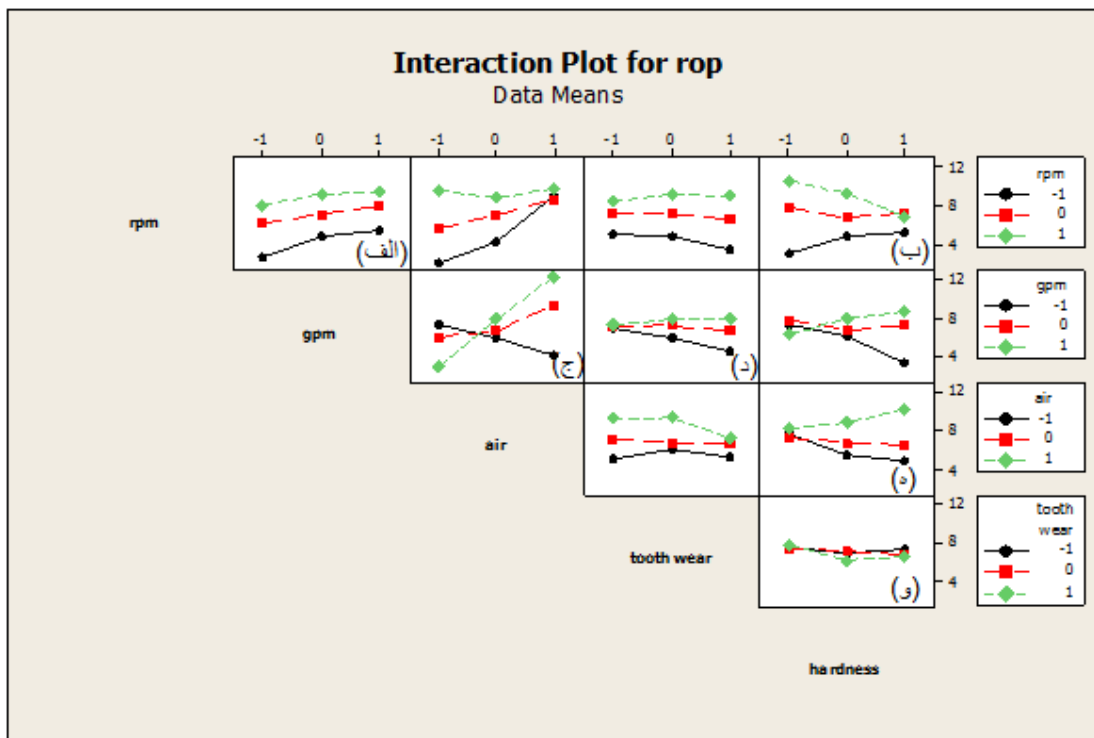
۴- اثر متقابل سرعت دوران مته و دبی تزریق هوا: همانطور که از شکل (۶-۱۳-د) می‌توان مشاهده کرد هرچه سرعت دوران مته را بیشتر کنیم و همزمان مقدار دبی تزریق هوا بالا رود، سرعت حفاری دارای روند افزایشی خواهد شد. این امر به این علت است که با افزایش سرعت دوران مته مقدار حجم خرده‌های حفاری بیشتر می‌شود، بنابراین نیاز به هیدرولیک بهتر جهت حمل خرده‌ها به سطح داریم لذا همانطور که در شکل مشهود است با افزایش سطح دبی هوای تزریقی تاثیر مثبتی در روند تمیزسازی چاه و در نهایت افزایش سرعت حفاری خواهیم داشت.

۵- اثر متقابل سرعت دوران مته و فرسایش دندان مته: در شکل (۶-۱۳-ه) با افزایش سطح سرعت دوران مته، هرچه فرسایش دندان مته به حد متوسط خود نزدیک می‌شود سرعت حفاری تغییرات

چندانی ندارد اما وقتی فرسایش دندانها بیشتر شود حتی با افزایش سرعت دوران مته هم، سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت.

۶- اثر متقابل دبی تزریق هوا و فرسایش دندان مته: در این حالت هم مطابق شکل (۶-۱۳) (و) وقتی فرسایش دندانها بیشتر شود، با افزایش حجم هوا، که وظیفه هیدرولیک را در بر دارد هم نمی توان به سرعت حفاری بالاتری دست یافت و قطعاً سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت.

شکل (۶-۱۴) اثر متقابل بین پارامترهای سرعت دوران مته، دبی تزریق سیال، دبی تزریق هوا، فرسایش دندان مته، و سختی سازند را نشان می دهد. در این شکل ۶ اثر متقابل باقی مانده بررسی خواهد شد.



شکل ۶-۱۴ تاثیر اثرات متقابل پارامترهای (الف) سرعت دوران و دبی تزریق سیال، (ب) سرعت دوران و سختی سنگ، (ج) دبی تزریق سیال و دبی تزریق هوا، (د) دبی تزریق سیال و فرسایش مته، (ه) دبی تزریق هوا و سختی سنگ، (و) فرسایش مته و سختی سنگ بر سرعت حفاری

قابل ذکر است که پارامترهایی که با حروف مشخص نشده اند اثرات متقابل آنها بر سرعت حفاری قبلاً بررسی شده است.

- ۱- اثر متقابل سرعت دوران مته و دبی تزریق سیال: همانطور که قبلاً گفته شد دبی تزریق سیال و دبی تزریق هوا با تمیزسازی چاه بر سرعت حفاری تاثیر می گذارند. در این مورد اثر متقابل پارامترهای فوق هم مشهود است طوری که مطابق شکل (۶-۱۴-الف) هرچه سرعت دوران مته بالا می رود اگر دبی تزریق سیال را به سطح بالای خود ببریم، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت.
- ۲- اثر متقابل سرعت دوران مته و سختی سنگ: همانطور که شکل (۶-۱۴-ب) نشان می دهد در افزایش سختی سنگ، وقتی سرعت دوران ما در سطح پایین خود باشد (خط مشکی، دایره شکل) می توان سرعت حفاری را به سمت روند افزایشی کنترل کرد. اما با افزایش سرعت دوران هر چه سختی سنگ از سطح کم به سطح زیاد خود می رود، سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت.
- ۳- اثر متقابل دبی تزریق سیال و دبی تزریق هوا: این دو پارامتر با یکدیگر وظیفه تأمین هیدرولیک سیال را جهت حمل خرده ها دارند. این سیال با ترکیب درصدی فوم تشکیل کف را می دهند. اگر دبی تزریق سیال را در سطح پایین نگه داریم و دبی تزریق هوا را زیاد کنیم، به علت اینکه سرعت سیال هوا زیاد است، از سیال ما جلو می زند و کف را می برد و در نتیجه خرده های حفاری خوب حمل نمی شوند و سرعت حفاری همانطور که در شکل (۶-۱۴-ج) دیده می شود کاهش می یابد. اما اگر دبی تزریق سیال را در سطوح متوسط (خط قرمز، مربع شکل) و بالاتر (خط سبز) قرار دهیم، با افزایش دبی تزریق هوا به علت اینکه ترکیب کف و کیفیت آن حفظ می شود، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت.
- ۴- اثر متقابل دبی تزریق سیال و فرسایش دندان مته: برای این پارامتر هم همانند پارامتر دبی تزریق هوا، تا قبل از فرسایش متوسط دندان مته، با افزایش دبی تزریق سیال سرعت حفاری قابل کنترل است اما وقتی فرسایش دندان بیشتر شود قاعدتاً قدرت حفر مته کمتر شده و سرعت حفاری مطابق شکل (۶-۱۴-د) روند کاهشی دارد. پس در اینجا می توان نتیجه گرفت که پارامترهای هیدرولیکی در اثر متقابل با فرسایش دندان مته با افزایش فرسایش به علت اینکه مته قابلیت حفر کمتر پیدا می کند سرعت حفاری را کاهش می دهد و همانطور که قبلاً ذکر شد این دو پارامتر به طور مستقیم بر سرعت حفاری تاثیر نخواهند داشت و با تمیز سازی چاه باعث افزایش سرعت حفاری خواهند شد که وقتی مته خوب حفر نکند لذا تمیز سازی چاه هم نتیجه ای نخواهد داد.

۵- اثر متقابل دبی تزریق هوا و سختی سنگ: همانطور که در شکل (۶-۱۴-ه) مشاهده می شود اگر دبی تزریق هوا را در سطح پایین خود نگه داریم هرچه سختی سنگ زیاد می شود وزن روی مته برای حفاری بالاتر رفته و در نتیجه حجم خرده های حفاری بیشتر شده است، پس تزریق حجم کم هوا قابلیت حمل خرده ها را نداشته لذا باعث کاهش سرعت حفاری می شود. اما وقتی دبی تزریق هوا به سطح بالای خود برسد (خط سبز، لوزی شکل) با افزایش سختی سنگ و حجم خرده های حفاری، به علت عملکرد بهتر هیدرولیک سیال، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت.

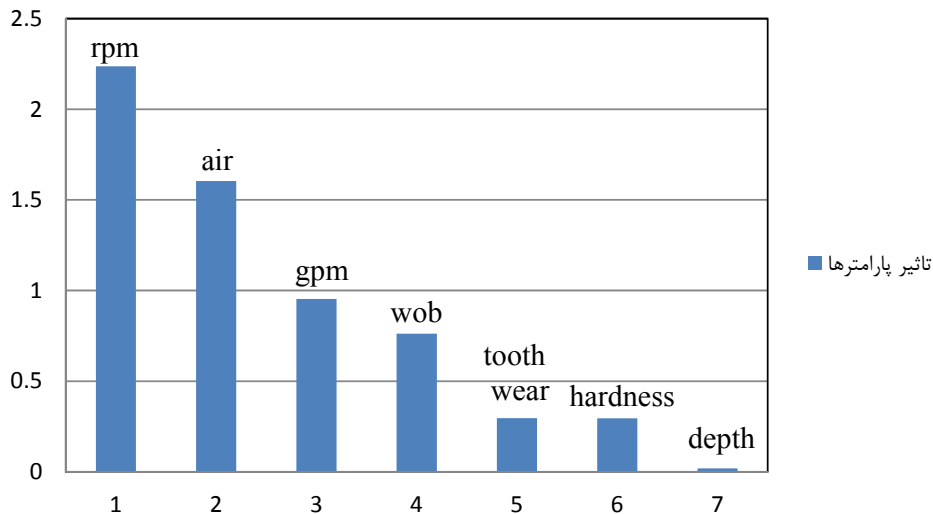
۶- اثر متقابل فرسایش دندان مته و سختی سنگ: در شکل (۶-۱۴-و) وقتی وضعیت فرسایش دندان مته در سطح پایین خود قرار دارد و در واقع مته نو است، هرچه سختی سنگ زیاد شود به این علت که مته قابلیت حفاری بالاتری پیدا کرده است، سرعت حفاری روند افزایشی خواهد داشت. اما هرچه فرسایش دندانها بیشتر شود (سطح متوسط و بالای فرسایش دندان مته) با افزایش سختی سنگ، به علت کم شدن قابلیت حفاری مته، سرعت حفاری روند کاهشی خواهد داشت (خط سبز، لوزی شکل). می توان نتیجه گرفت که اگر مته را بموقع تعویض کنیم می توانیم در سختی های بالا نیز سرعت حفاری را رو به روند افزایشی کنترل کنیم.

شکل (۶-۱۵) تاثیرات پارامترهای اصلی را بر سرعت حفاری نشان می دهد. همانطور که از شکل و ضرایب جدول (۶-۴) پیداست سرعت دوران مته بیشترین تاثیر را بر سرعت حفاری دارد. بعد از آن دو پارامتر هیدرولیک سیال بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ مته دارند که دبی تزریق هوا که حامل سیال کف به سطح می باشد از دبی تزریق سیال تاثیرش بر سرعت حفاری بیشتر می باشد لذا همانطور که در فصل چهارم ذکر شد باید میزان دبی تزریق هوا بر اساس نوع حفاری بهینه انتخاب شود. چهارمین پارامتر تاثیرگذار از نظر بزرگی، وزن روی مته می باشد. فرسایش دندان مته و سختی که بعد از وزن روی مته قرار گرفته اند، تأثیر یکسانی بر روی سرعت حفاری دارند.

اما کمترین اثر را پارامتر عمق می گذارد، این امر می تواند به این علت باشد که تاثیر عمق به طور اثر متقابل در پارامترهای دیگر نهفته است و به این صورت بر سرعت حفاری تاثیر می گذارد اما به صورت منفرد تاثیر خیلی کمی بر نرخ نفوذ مته دارد. مشخص است که پارامترهای غیر قابل کنترل تاثیر کمتری

نسبت به پارامترهای قابل کنترل دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که در حفاری، با ترکیب مناسب پارامترهای قابل کنترل، می‌توان اثر پارامترهای محیطی را بر سرعت حفاری کمتر کرد.

تاثیر پارامترها



شکل ۶-۱۵ چگونگی تاثیر پارامترهای اصلی بر سرعت حفاری

۶-۷ بهینه سازی سرعت حفاری

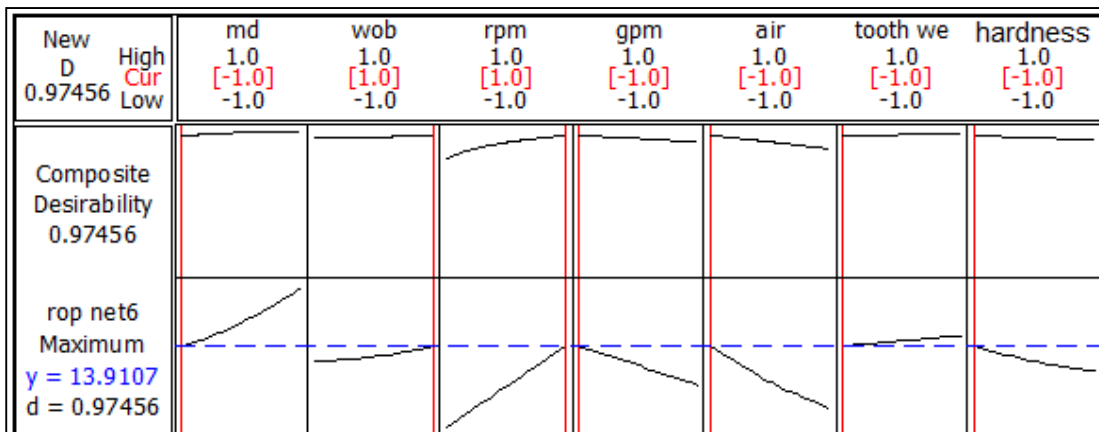
همیشه در بهینه‌سازی هدف رسیدن به بیشترین سرعت حفاری بوده است. الگوریتم بهینه‌سازی بکار رفته در بهینه‌سازی سطح پاسخ، تابع مطلوبیت^۱ می‌باشد. این تابع مقیاس مقادیر پاسخ را به مقیاس مطلوبیت بین ۰ تا ۱ جهت رسیدن به مقدار پاسخ مناسب، انتقال می‌دهد.

در اینجا منظور از بهینه‌سازی، بدست آوردن ترکیب بهترین حالت و سطح پارامترهای قابل کنترل برای رسیدن به سرعت حفاری بالا می‌باشد. در واقع هدف اصلی این است که با ثابت نگه داشتن پارامترهای محیطی که تغییر آنها دست ما نمی‌باشد و همزمان با تغییر پارامترهای قابل کنترل، به بهترین سطح پاسخ که همان سرعت حفاری است برسیم. پارامترهایی که تغییر آنها در کنترل ما نمی‌باشد شامل عمق، فرسایش دندانه متده، و سختی سنگ می‌باشد. لذا در سه حالت این سه پارامتر را

1- Desirability function

ثابت نگه می‌داریم و بهترین سطح را برای پارامترهای قابل کنترل جهت رسیدن به بالاترین سرعت حفاری تعیین می‌کنیم. لازم به ذکر است که این سطوح بر اساس سطوح طراحی ما می‌باشند.

۱- حالت اول : سه پارامتر عمق، فرسایش دندانته و سختی سازند را در سطح پایین خود قرار می‌دهیم. باید توجه داشت که این سطوح به صورت کد شده و طبق طراحی آزمایش که تعریف کردیم می‌باشد. شکل (۶-۱۶) نحوه تغییرات سطوح را برای این حالت نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۶ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل حالت اول (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی شنگ در سطح پایین قرار گیرند)

همانطور که از شکل (۶-۱۶) مشخص می‌باشد سه پارامتر ذکر شده در سطح پایین (خط قائم قرمز رنگ سطوح پایین این سه پارامتر را نشان می‌دهد) قرار داده شد و با تغییر پارامترهای قابل کنترل، در نهایت به بالاترین سرعت حفاری ممکن در این حالت دست یافتیم. خط چین در شکل (۶-۱۶) سرعت حفاری بهینه را نشان می‌دهد. مقادیر بهینه پارامترهای قابل کنترل با تغییر سطوح تعریف شده (جدول ۶-۱) هر پارامتر توسط خط قائم قرمز رنگ بدست می‌آیند و سپس با استفاده از جدول (۶-۱) مقادیر واقعی آن مشخص می‌شود.

کمیتی که به ما نشان می‌دهد ترکیب ما مطلوبیت قابل قبولی دارد یا خیر، ترکیب مطلوبیت^۱ می‌باشد که هر چه مقدارش به ۱ نزدیکتر باشد میزان مطلوبیت ترکیب ما بالاتر می‌رود. همانطور که

1- Composite desirability

پیدااست ترکیب دارای مطلوبیت قابل قبول و برابر $D=0.97456$ می باشد. جدول (۶-۶) نتیجه بررسی و سطح مورد نظر را برای هر پارامتر قابل کنترل در این حالت نشان می دهد. ترم قرمز رنگ در بالای شکل (۶-۱۶) مقدار صحت (درستی) ^۱ و بهترین ترکیب پارامترها را به صورت عددی نشان می دهد.

جدول ۶-۶ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت اول

دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۴۰۰۰	۹۰	۱۰۵	۲۵	۱۳/۹۱

قابل ذکر است که منظور از سطح پایین عمق فقط عمق ۷۶ متر نمی باشد، بلکه عمق های تا ۱۳۳۳ متری درون حفره ۲۶ اینچ می باشد که البته با بالا رفتن عمق از ۷۶ متر تا ۱۳۳۳ متر وزن روی مته و سرعت چرخش کمتر از حالت متوسط و پارامترهای هیدرولیک ما کمی بیشتر خواهد شد. که جلوتر به آن می پردازیم.

در این حالت میانگین مقادیری که به صورت واقعی برای هر پارامتر در چاه شماره ۶ شانول استفاده شده است در جدول (۶-۷) آمده است.

جدول ۶-۷ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت اول در چاه ۶ شانول

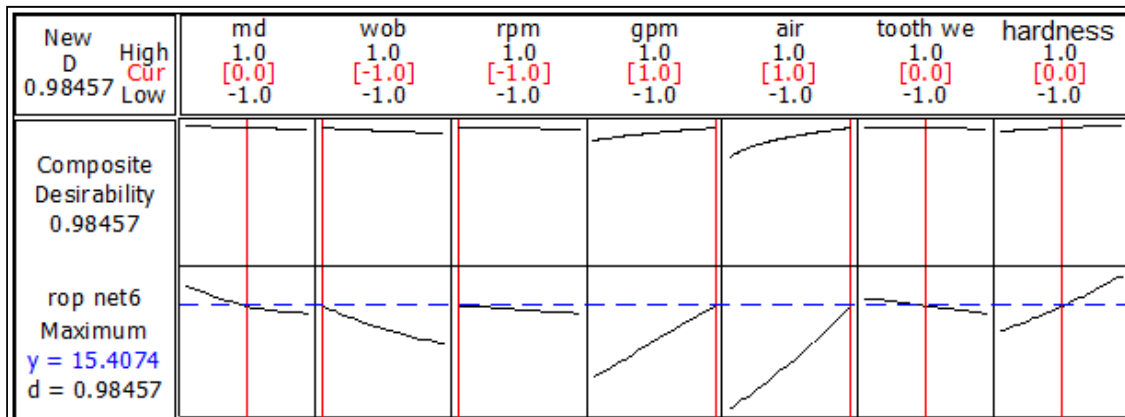
دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۵۰۰۰	۱۱۰	۱۰۵	۲۳	۸/۱۴

همانطور که دیده می شود در حالت واقعی انجام شده در میدان شانول مقدار پارامترهای وزن روی مته و سرعت چرخش تقریباً با حالت بهینه ما جدول (۶-۶) یکی می باشد اما مقادیر هیدرولیک ما زیادتر می باشند که همین امر سبب سرعت حفاری کمتر شده است. زیرا به علت زیاد بودن حجم هوا و متناسب نبودن آن با دبی تزریقی باعث کاهش کیفیت کف و البته حمل کندتر کنده های حفاری می شود. همانطور که در فصول قبلی توضیح داده شد سرعت هوا در این حالت از کنده ها و دبی سیال تزریقی بیشتر بوده و

1-Accuracy

خوب نمی تواند کف را به سطح حمل کند، لذا باید در عمق های کمتر از هیدرولیک با سیال کمتر استفاده کرد.

۲- حالت دوم : عمق، فرسایش دندانته مته و سختی سازند را در سطح متوسط قرار می دهیم. شکل (۶-۱۷) نحوه تغییرات سطوح را برای این حالت نشان می دهد.



شکل ۶-۱۷ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت دوم (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی سازند در سطح متوسط (خطوط قائم قرمز) قرار گیرند)

همانطور که از شکل فوق پیداست با افزایش عمق قاعدتاً سختی سازند (سختی سنگ) نیز افزایش می یابد و اگر مته به موقع تعویض نشود خوردگی دندانته های آن نیز بیشتر می شود. به همین دلیل می باشد که سطح هر سه پارامتر محیطی و غیر قابل کنترل فوق الذکر را با هم تغییر دادیم.

در این حالت با تغییر سطح پارامترهای قابل کنترل، بهترین سطح با ترکیب مطلوبیت قابل قبول برای بیشترین سرعت حفاری ممکن بدست آمد. جدول (۶-۸) سطوح بدست آمده هر پارامتر را برای کسب سرعت حفاری مطلوب نشان می دهد. می توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق و سختی سنگ، اگر سطوح پارامترهای قابل کنترل را درست و با هدف تغییر دهیم، می توانیم به سرعت حفاری بالایی دست یابیم.

جدول ۶-۸ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت دوم

دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۶۰۰۰	۱۶۰	۸۰	۹	۱۵/۴۰

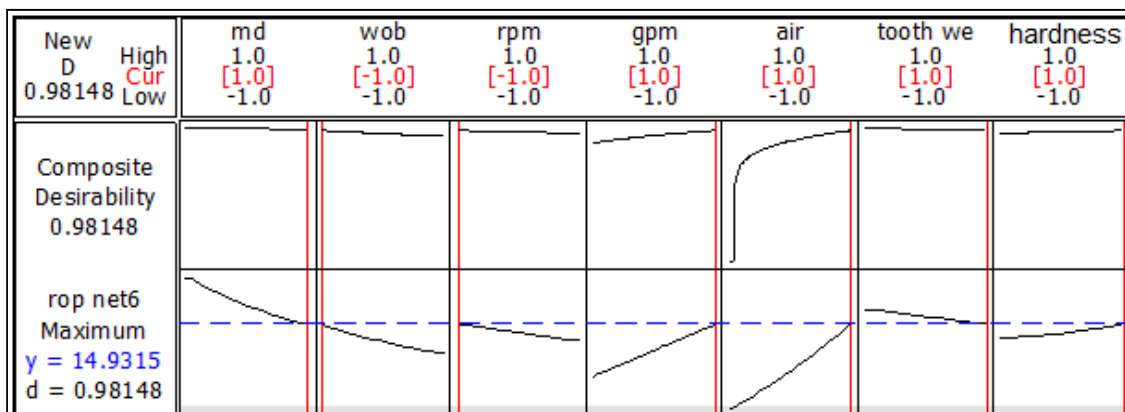
برای این حالت در داده‌های واقعی چاه شماره ۶ شانول، میانگین مقادیر واقعی استفاده شده برای هر پارامتر به صورت ارقام جدول (۶-۹) بوده است.

جدول ۶-۹ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت دوم در چاه ۶ شانول

سرعت حفاری (متر بر ساعت)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	دبی تزریق هوا (CFM)
۶/۵۶	۱۱	۹۵	۱۱۰	۴۵۰۰

همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز مقادیر پارامترهای مکانیکی (وزن روی مته و سرعت دوران) ما نزدیک به حالت بهینه هستند، اما میزان هیدرولیک ما نسبت به عمق موجود کمتر است. البته باید توجه داشت که میزان خوردگی دندانان مته در این حالت یکی از دلایل افت سرعت حفاری است که ما با بالا بردن سطح پارامترهای هیدرولیک این افت را جبران نمودیم.

۳- حالت سوم: سه پارامتر عمق، فرسایش دندانان مته و سختی سازند را در سطح بالای خود قرار می‌دهیم. شکل (۶-۱۸) نحوه تغییرات سطوح را برای این حالت نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۸ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت سوم (حالتی که سه پارامتر عمق، فرسایش مته و سختی سازند در سطح بالا قرار گیرند)

در حالت سوم با افزایش عمق سختی سنگ نیز افزایش می‌یابد، اما به علت وجود فرسایش بالای دندانان مته در داده‌های واقعی سطح فرسودگی دندانان مته را به سطح بالای خود رساندیم و در این حالت

فرض بر این می‌باشد که تا آخرین فرسایش دندان مته که عدد ۸ به آن تعلق می‌گیرد از مته استفاده شده است که در واقعیت نیز چنین می‌باشد.

در این حالت با تغییر سطح پارامترهای قابل کنترل، بهترین سطح با مطلوبیت ترکیب قابل قبول $D=0.98148$ برای بیشترین سرعت حفاری ممکن بدست آمد. جدول (۶-۱۰) سطوح بدست آمده هر پارامتر را برای کسب سرعت حفاری مطلوب نشان می‌دهد.

جدول ۶-۱۰ سطوح بدست آمده هر پارامتر قابل کنترل برای سرعت حفاری بهینه در حالت سوم

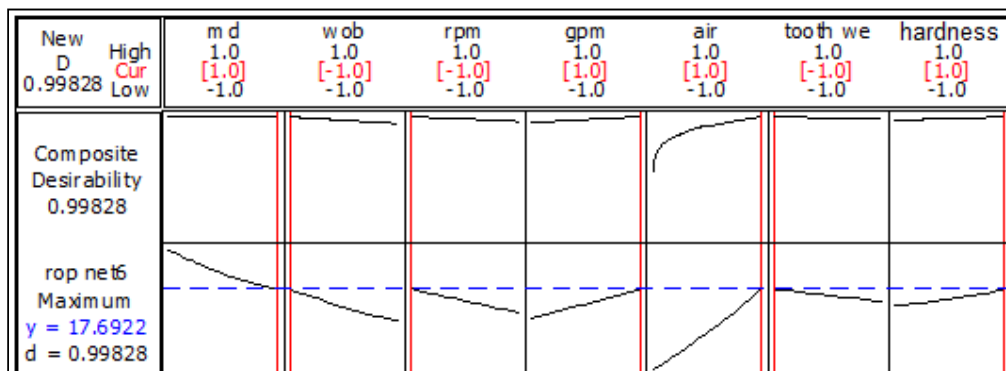
دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۶۰۰۰	۱۶۰	۸۰	۹	۱۴/۹۳

همانطور که از جدول پیدا می‌باشد با همان سطوح یکسان حالت دوم برای متغیرهای قابل کنترل بهترین سرعت حفاری بدست آمده کمتر از حالت دوم شده است، که این تنها به دلیل افزایش سختی سنگ و فرسایش دندان مته می‌باشد که باعث کاهش در سرعت حفاری شده است. البته قابل ذکر است که یکی از دلایلی که در اینجا با توجه به سختی سنگ، وزن روی مته کمتر استفاده شده است، فرسایش بالای دندان مته می‌باشد.

حال این سوال پیش می‌آید که چرا وقتی سختی سنگ بیشتر شده با وزن روی مته کم و سرعت چرخش کم، سرعت حفاری خوب بدست آوردیم؟ در اینجا قابل ذکر است که منظور از ۱- (در بالای شکل ۶-۱۸) بطور مثال برای وزن روی مته فقط عدد ۹ نمی‌باشد، عدد ۹ برای مجموعه داده‌های واقعی موجود بوده (جدول ۶-۱) و صرفاً برای ملموس تر شدن هدف تعریف شده است. اما اگر دارای مجموعه داده وسیع تر باشیم این عدد قابل تغییر است. لذا منظور از ۱- صرفاً گذاشتن مقدار وزن کم بر روی مته می‌باشد.

اما باید در نظر داشت همیشه وقتی سنگ سخت تر می‌شود برای خرد کردن سنگ نیاز به وزن روی مته زیاد داریم، این کار را در عمل می‌توان انجام داد اما از طرفی هم خرده‌های حفاری زیاده‌تر می‌شود و اگر هیدرولیک خوب عمل نکند حمل آنها طولانی‌تر و ممکن است کمتر باشد و سرعت حفاری کمتر می‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود که با اعمال وزن کمتر بر روی مته و تمیزسازی سریع‌تر و بهتر چاه

با هیدرولیک مناسب می‌توان سرعت حفاری را بالا برد. این مورد نیز به نوع مته‌ای که استفاده می‌شود بستگی دارد که در این حالت پیشنهادی مته نوع ۵۱۷ و GTX 415 که در چاه شماره ۶ و ۱۰ میدان شانول استفاده شده است، قابل استفاده می‌باشد. زیرا وقتی مته از نظر سختی، قدرت حفاری بیشتر در برابر مقاومت سنگ را داشته باشد، لذا با اعمال وزن کم هم روی آن حفاری با مشکل روبه‌رو نخواهد شد. حال اگر در همین حالت مته را بموقع تعویض کنیم می‌توان سرعت حفاری بیشتر با همین سختی سنگ بدست آوریم. لذا در این حالت فرض می‌شود که مته تعویض شده و در سطح پائین خود که ۱- (خط قرمز قائم در ستون هفتم شکل ۶-۱۹) می‌باشد برای مته سالم قرار می‌دهیم. با همین سطوح همانطور که از شکل (۶-۱۹) پیداست توانستیم با تعویض مته به سرعت حفاری ۱۷/۷ متر بر ساعت با مطلوبیت ترکیب $D=0.9982$ دست یابیم.



شکل ۶-۱۹ تغییرات سطوح پارامترهای قابل کنترل در حالت چهارم (حالتی که سطح دو پارامتر عمق و سختی سازند بالا بوده ولی سطح فرسایش مته پائین است)

می‌توان نتیجه گرفت که اگر مته بموقع تعویض شود می‌توان با کنترل پارامترهای قابل تغییر به سرعت حفاری بالایی دست یافت. حالات‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آنها را بررسی کرد اما در اینجا مهمترین و مشهودترین حالات بررسی شد. در حالت واقعی نیز برای حالت سوم میانگین مقادیر پارامترهای استفاده شده با توجه به خوردگی کمتر دندانه مته بشرح مقادیر جدول (۶-۱۱) بوده است.

جدول ۶-۱۱ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت سوم در چاه ۶ شانول

دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۵۰۰۰	۱۰۰	۹۵	۱۰	۶/۵۵

همانطور که ملاحظه می شود برای حالت واقعی در چاه ۶ شانول، حالت وزن روی مته کم و سرعت چرخش کم که در حالت بهینه نیز بدست آمد بکار برده شده است. این نتایج نشان می دهد سطح بدست آمده برای هر پارامتر قابل کنترل در قسمت بهینه سازی برای این حالت فقط تعوری نمی باشد و در واقعیت نیز بکار رفته است. اما پارامتر دبی تزریق سیال در سطح تقریباً کم خود و دبی تزریق هوا در سطح متوسط خود قرار دارد. با توجه به اینکه در این عمق، حفاری با کف صورت می گیرد لذا ترکیب این دو پارامتر مربوط به هیدرولیک درست نمی باشد و به علت نسبت خیلی بیشتر حجم هوا به دبی تزریقی سیال، یکی از دلایل کاهش سرعت حفاری می تواند همین باشد. اما حالت دیگری در داده های واقعی برای حالت شماره سه وجود دارد که در جدول (۶-۱۲) آورده شده است.

جدول ۶-۱۲ مقادیر واقعی استفاده شده هر پارامتر برای حالت سوم در چاه ۶ شانول

دبی تزریق هوا (CFM)	دبی تزریق سیال (گالن بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت حفاری (متر بر ساعت)
۶۰۰۰	۱۶۰	۹۵	۲۳	۵/۵۳

همانطور که در جدول (۶-۱۲) مشاهده می شود تنها فرق مقادیر پارامترهای استفاده شده با حالت بهینه، استفاده وزن روی مته در سطح بالای خود می باشد. یکی از دلایل کاهش سرعت حفاری با وجود استفاده مته جدید می تواند سختی زیاد سنگ باشد. دلیل دیگر آن نیز می تواند استفاده از ایجاد وزن زیاد روی مته در این حالت باشد. بطوریکه با ایجاد وزن زیاد روی مته، کنده های حفاری زیاد خواهد شد و به دلیل حجم زیاد کنده ها و فاصله عمقی زیاد تا سطح، با این سطوح بکار رفته برای پارامترهای هیدرولیک، سرعت حمل کنده ها پایین خواهد بود. اما اگر وزن روی مته کم باشد در نتیجه مقدار کمتری از حجم کنده ها ایجاد می شود، پس هیدرولیک ما راحت تر و سریع تر می تواند این کنده ها را از جلوی مته به سطح انتقال دهد، در نتیجه سرعت حفاری بیشتری خواهیم داشت.

فصل، مضمون

نتیجہ گیری و پیشہاوا

۷-۱ نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه بدست آوردن چگونگی اثر پارامترهای موثر حفاری با کف بر سرعت حفاری با استفاده از مدل سرعت حفاری می‌باشد. به همین منظور ابتدا از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی سرعت حفاری استفاده گردید و سپس از طراحی آزمایشات باکس- بنکن با نرم‌افزار MiniTab جهت مدل‌سازی حفاری و بدست آوردن پارامترهای موثر حفاری با کف بر سرعت حفاری استفاده گردید. در نهایت با بدست آوردن ترکیب مناسب پارامترهای قابل کنترل، سرعت حفاری بهینه گردید و نتایج ذیل حاصل شد:

(۱) ضرایب رگرسیون بالای بدست آمده از داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش، به ترتیب ۰/۹۹۹۵، ۰/۹۹۹۲ و ۰/۹۹۷۳ کارایی خوبی برای مدل ارائه شده توسط شبکه عصبی برای تخمین سرعت حفاری را نشان می‌دهد. به این معنی که از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی‌های آتی سرعت حفاری استفاده کرد.

(۲) ضریب تعیین بالای ($R^2 = ۰.۹۹/۳۹$) بدست آمده از تحلیل طراحی باکس- بنکن قابلیت تخمین خوب این روش را جهت ایجاد رابطه بین پارامترهای حفاری با کف و سرعت حفاری نشان می‌دهد. همچنین تفسیر آنالیز واریانس برای طراحی، فرضیه‌های مستقل بودن عبارت خطا، واریانس ثابت و توزیع نرمال داده‌های باقی‌مانده را تایید نمود.

(۳) مطالعه نشان داد که رابطه بین پارامترهای حفاری و سرعت حفاری به صورت معادله درجه دوم می‌باشد. همچنین پارامترهایی که بیشترین و کمترین تأثیر را بر سرعت حفاری دارند به ترتیب سرعت چرخش مته (rpm)، دبی تزریق هوا، دبی تزریق سیال، وزن روی مته، فرسایش دندان مته، سختی سازند و عمق می‌باشند.

(۴) با بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیک حفاری (دبی تزریقی سیال و دبی تزریقی هوا) مشخص شد که دبی تزریقی هوا که در واقع عامل اصلی حمل سیال کف در فضای حلقوی می‌باشد، نسبت به دبی تزریقی سیال بر روی سرعت حفاری بیشتر تأثیر دارد. پس نتیجه می‌شود که با تعیین بهینه و مناسب حجم هوای تزریقی برای حفاری با کف بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ CFM و برای حفاری با هوا ۶۹۰۰ CFM،

می‌توان عملکرد بهتر هیدرولیک را در جهت افزایش سرعت حفاری و کاهش مشکلات میدان شانول از قبیل گیر لوله‌های حفاری دربر داشت.

(۵) با استفاده از بهینه‌سازی پاسخ به روش طراحی آزمایش سطح پاسخ می‌توان بهترین ترکیب دبی تزریق هوا و سیال (گل حفاری) را برای بدست آوردن بهترین سرعت حفاری در منطقه بدست آورد. در قسمت بهینه‌سازی بر اساس داده‌های موجود مشاهده شد که در هر حفره (با قطر ثابت) برای حفظ کیفیت کف و افزایش ظرفیت انتقال خرده‌های حفاری با افزایش عمق، دبی هوا و سیال تزریقی باید تا ۶۰۰۰ CFM و ۱۶۰ گالن بر دقیقه افزایش یابد.

۲-۷ پیشنهادها

- (۱) استفاده از مدل بدست آمده از این مطالعه و بدست آوردن بهینه پارامترهای قابل کنترل حفاری با طراحی سطح پاسخ برای طراحی‌های اولیه چاه‌ها و پیش‌بینی سرعت حفاری توصیه می‌شود.
- (۲) پارامترهای زیادی بر سرعت حفاری تأثیر دارند که در این مطالعه لحاظ نشده است لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی این نکته مورد توجه قرار گیرد زیرا که باعث ارتقای دقت و کارایی مدل می‌شود. از جمله این پارامترها می‌توان به مقاومت سنگ، تخلخل، تراوایی و درصد کف اشاره کرد.
- (۳) در این مطالعه کف و مواد افزودنی به سیال استاندارد و ایده‌آل در نظر گرفته شده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعد با توجه به لیتولوژی و خصوصیات سازندها و همچنین شرایط حفاری در زمینه کف به طور ویژه مطالعات گسترده‌تری صورت گیرد.
- (۴) در بیشتر مواقع در حفاری‌ها با سفره‌های آب زیرزمینی برخورد می‌شود و هجوم آب به درون چاه را داریم که تأثیر مستقیم بر میزان دبی گل حفاری دارد، با توجه به این نکته باید در میزان دبی سیال تزریقی دقت کرد. به خصوص در حفره ۱۲/۲۵ اینچ که سازندها یکپارچگی بیشتری دارند و شکستگی‌ها کمتر است و با وجود سفره‌های آب زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود که به جای حفاری با فوم فشرده از گل هوازده استفاده شود زیرا هم استفاده از مواد شیمیایی کفزا حذف می‌شود و هوای تزریقی کمتری مورد نیاز است.

منابع

- آریان پور، ج، ۱۳۶۸ "حفاری با هوا"، شرکت ملی حفاری ایران.
- شرکت نفت مرکزی ایران، ۱۳۸۳ "گزارشات تکمیلی حفاری"، آرشیو اداره حفاری.
- طاهری دهلری، ا، ۱۳۹۱ "ارائه نرم افزار هیدرولیک حفاری با سیالات تراکم پذیر" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- مرادزاده، ع، دولتی ارده جانی، ف، روکی، ر، رحیمی، م، ۱۳۹۰ "برآورد نفوذپذیری میدان گازی پارس جنوبی با استفاده از شبکه عصبی رگرسیون عمومی"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۴، ص ۵۱-۶۵
- Akgun, F., 2002. How to Estimate the Maximum Achievable Drilling Rate without Jeopardizing Safety. SPE 78567.
- Amoco Production Company, 2010. Drilling Fluids Manual. American Oil Company Publishing.
- Angel, R.R., Phillips Petroleum Co., 1960. Volume Requirements for Air or Gas Drilling. Publisher Society of Petroleum Engineers, Document ID 9445-MSDOI10.2118, Published in Petroleum Transactions, AIME, 210.
- ASME Shale Shaker Committee, 2005. Drilling Fluid Processing Handbook. Gulf Professional Publishing.
- Barragan, R.V., Santos, O.L.A., Maidla, E.E., 1997. Optimization of Multiple Bit Runs. SPE 37644, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam.
- Beyer, A.H., Millhone, R.S., Foote, R.W., 1972. Flow Behavior of Foam as a Well Circulating Fluid. SPE 3986.
- Bingham, M.G., 1965. A New Approach to Interpreting Rock Drill ability. re-printed From Oil and Gas Journal.

- Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young, F.S., 1991. Applied Drilling Engineering. SPE Text Book Series, Richardson TX.
- Bourgoyne, A.T., Young, F.S., 1974. A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. SPE 4238.
- Cooper, A.G., Bihn, G., 1995. An Interactive Drilling Simulator for Teaching and Research. SPE 30213, Petroleum Computer Conference.
- Douglas, C.M., George, C.R., 2011. Applied Statistics and Probability for engineers. Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Eren, T., 2010. Real Time Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations. PhD Thesis, Middle East Technical University, Turkey.
- Galle, E.M., Woods, A.B., 1963. Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. 63-048, American Petroleum Institute.
- Gardiner, B.S., Dlugogorski, B.Z., Jameson, G.J., 1998. Rheology of Fire Fighting Foams. Fire Safety Journal (31), 61-75.
- Gou, B., Ghalambor, A., 2002. Gas Volume Requirements for Underbalanced Drilling. Penn Well Co, Tulsa, Oklahoma.
- Gumati, A., Takahshi, H., 2011. Experimental study and modeling of pressure loss for foam-cuttings mixture flow in horizontal pipe, Journal of Hydrodynamics 23 (4), 431-438.
- Guo, B., Sun, K., Ghalambor, A., 2003. A Closed Form Hydraulics Equation for Predicting Bottom hole Pressure in UBD with Foam. SPE 81640.
- Ikoku, C.U., Azar, J.J., 1980. Practical Approach to Volume Requirements for Air and Gas Drilling. SPE 9445-MSDOI, University of Tulsa.

- Khosravi, M., Fatemi, S., Rostami, B., 2011. Assessing structured uncertainty in mature fractured reservoir, using combination of response surface method and reservoir simulation. SPE 148003.
- Krug, J.A., Mitchell, B.J., 1972. Charts Help Find Volume, Pressure Needed for Foam Drilling. Oil and Gas Journal.
- Kuru, E., Okunsebor, O.M., 2004. Hydraulic Optimization of Foam Drilling for Maximum Drilling Rate. Paper SPE/IADC 91610.
- Lord, D.L., 1979. Mathematical Analysis of Dynamic and Static Foam Behavior. SPE 7927.
- Machado, C.J., Ikoku, C.U., 1982. Experimental Determination of Solids Fraction and Minimum Volumetric Requirements in Air and Gas Drilling. Journal of Petroleum Technology (34), 2645-2655.
- MatLab Software., 2009. Neural Network. The MathWorks, Inc.
- Maurer, W.C., 1962. The 'Perfect-Cleaning' Theory of Rotary Drilling, Journal of Petroleum Technology (14), 1270-1274.
- MiniTab 16 Software., 2012. Tutorials. Minitab Inc.
- Miska, S., 1988. Development in Petroleum Engineering. Gulf Publishing Company.
- Okpobiri, G.A., Ikoku, C.U., 1986 Volumetric Requirements for Foam and Mist Drilling Operations. SPE Drilling Engineering.
- Osgouei, R., 2010. Determination of Cuttings Transport Properties of Gasified Drilling Fluids. Middel East Technical University, Turkey.
- Ozbayoglu, M.E., Omurlu, C., 2005. Minimization of Drilling Cost by Optimization of the Drilling Parameters. Turkey 15, Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of the International.

- Paknejad, A., 2005. Foam Drilling Simulator. Master Thesis, Texas A&M University.
- Pessier, R.C., Fear, M.J., 1992. Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. SPE 24584.
- Rahimzadeh, H., Mostofi, M., Hashemi, A., Salahshoor, K., 2010. Comparison of the Penetration Rate Models Using Field Data for One of the Gas Fields in Persian Gulf Area. SPE 131253-MS.
- Rovig, W.J., 1992. Air Drilling Handbook. Oil Tools Publications.
- Schoepfel, R.J., Sapre, A.U., 1967. Volume Requirements in Air Drilling, Publisher Society of Petroleum Engineers. SPE 1700-MS.
- Shirkavand, F., Hareland, G., 2009. Rock Mechanical Modeling for an underbalanced Drilling Rate of Penetration Prediction. SPE 09-097.
- Speer, J.W., 1958. A Method for Determining Optimum Drilling Techniques. Drilling And Production Practical, API.
- Spoerker, H.F., Trepass, P., Valko, P., Economides, M.J., 1991. System Design for the Measurement of Downhole Dynamic Rheology for Foam Fracturing Fluids. SPE 22840.
- Wang, R., Cheng, R., Wang, H., Bu, Y., 2009. Numerical Simulation of Transient Cuttings Transport with Foam Fluid in Horizontal Wellbore. Journal of Hydrodynamics 21(4):437-444.
- Warren, T.M., 1986. Penetration-Rate Performance of Roller–Cone Bits. SPE 13259.
- William, C.L., 2009. Air and Gas Drilling Manual. Third edition, Gulf Professional Publishing.
- Young, F.S.Jr., 1968. Computerized Drilling Control. SPE 2241.

پیوست الف : انواع مته‌ها و طراحی مربوط به آنها



شکل الف- ۱ مته‌ی تیغه ثابت (Bourgoyne et al, 1991)



شکل الف- ۲ نمونه‌ای از مته‌ی دکمه‌ای و دندانه‌ای (غلتکی) (Bourgoyne et al, 1991)

Abstract

The purpose of any drilling operation is to drill in the shortest possible time to minimize the costs in compliance with the safe operations. The concept of time of any drilling operation can be stated in terms of bit's rate of penetration (ROP). There are several parameters that impact the rate of penetration. A mathematical relationship between these parameters and ROP assists in increasing the drilling speed by selecting optimum parameters. Due to the frequency of fractured formations in the South Zagros Basin up to 3000 meter, air and foam drilling method is an adequate alternative to the formal mud drilling. This study aims to mathematically relate ROP to mechanical (weight on bit, rotary speed), hydraulic (air flow rate, liquid flow rate) and local (formation hardness, depth) parameters in foam drilling to achieve the maximum rate of penetration. A commercial hydraulic air drilling software was used to calculate the optimum air flow rate for decreasing the problem of Shanul field in air and foam drilling. The optimum air injection rate was estimated between 1000 to 2000 CFM. A rate of penetration model has been predicted by a designed artificial neural network (ANN) using real data of 2 wells, namely Shanul #6 and #10. The correlation coefficient of training, validation and test process of ANN were calculated to be equal to 0.9995, 0.9992 and 0.9973 respectively. After checking of the ANN model's accuracy, it was then used for predicting of the ROP in design of experiment (DOE) to make a simple correlation between effective parameters and ROP using MiniTab software. Finally the most important of drilling parameters on ROP for 26, 17.5 and 12.25 (inch) holes has been investigated and ROP has been optimized.

Key Word: Rate of penetration, drilling parameters, air and foam drilling, design of experiments, ANN



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Investigating the effect of drilling parameters on rate of penetration in air drilling method in one of the Iranian oil fields

A thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science in Petroleum Drilling Engineering

By:

Behrooz Baghbani

Supervisors:

Dr. A. Moradzadeh

Dr. A. Nakhaee

Co-Supervisor:

Dr. R. Rooki

September 2013