

بررسی و ایجاد رابطه بین پارامترهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ مته با استفاده از طراحی سطح پاسخ

پهروز باغبانی، علی مرادزاده * دانشگاه صنعتی شاهرود

بابک مرادی، مهدی بحرینی * شرکت نفت مناطق مرکزی ایران

چکیده

چگونگی تأثیر متغیرهای حفاری بر نرخ نفوذ مته و پیدا کردن مهم‌ترین آن‌ها بسیار پیچیده بوده و تنها بخشی از آن شناخته شده است. با این حال، مدل‌های ریاضی متعددی در جهت ترکیب روابط شناخته شده پیشنهاد گردیده‌اند. در این مقاله، رابطه بین فاکتورهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ مته برای چاه‌های شماره X و Y میدان مورد مطالعه، با روش طراحی آزمایش سطح پاسخ، نشان داده می‌شود. میدان مورد مطالعه واقع در جنوب ایران، منطقه فارس ساحلی است. این میدان جزو میداین گازی کشور بوده که در آن، حفرات ۲۶، ۱۷/۲ و ۱۲/۴ اینچ با تکنیک حفاری با کف حدود ۲۸۰۰ متر حفاری می‌شود.

واژگان کلیدی

طراحی سطح پاسخ، طراحی آزمایش‌ها، حفاری با کف، نرخ نفوذ مته

مقدمه

چگونگی تأثیر متغیرهای مهم حفاری بر نرخ نفوذ مته، بسیار پیچیده بوده و تنها بخشی از آن شناخته شده است. فاکتورهای بسیاری بر روی نرخ نفوذ مته موثر هستند. بنابراین، توسعه یک مدل ریاضی دقیق در حفاری دورانی به راحتی قابل محاسبه نیست. پیدا کردن تأثیر این فاکتورها بر روی نرخ نفوذ مته می‌تواند کمک شایانی در شناخت بهتر و به کارگیری بهینه پارامترهای حفاری در عملیات میدانی باشد. حفاری زیر تعادلی^۱ نوعی عملیات حفاری است که در آن، فشار سیال حفاری کمتر از فشار سیال سازند است. به طور کلی چهار نوع روش حفاری زیر تعادلی وجود دارد که هر کدام کاربرد خاص خود را دارد: حفاری هوا، حفاری مه، حفاری کف، حفاری سیالات هوازده. در حفاری با کف، سیال حفاری ترکیبی از آب، هوا و مواد شیمیایی است. هنگامی که محلول آب (در برخی موارد بنتونیت استفاده می‌شود) و مواد شیمیایی را به داخل سیستم هوا با فشار پمپ می‌کنیم، کف، همراه با تزریق درصدی از سورفکتانت کف‌زا تولید می‌شود. حفاری با کف^۲، هوا به طور کلی، سیال سبک‌تر از سیال درون مخزن، افزایش نرخ نفوذ مته^۳ و کاهش هزینه حفاری را به همراه دارد. در ادامه، رابطه بین فاکتورهای حفاری با کف بر نرخ نفوذ مته برای چاه‌های شماره X و Y میدان مورد مطالعه، با روش طراحی سطح پاسخ^۴، توسط نرم افزار آماری مینی‌تب^۵ نشان داده می‌شود. میدان مورد مطالعه واقع در جنوب ایران، منطقه فارس ساحلی است. این میدان جزو میداین گازی کشور بوده که در آن، حفاره‌های ۲۶، ۱۷/۵ و ۱۲/۲۵ اینچ، حدود ۲۸۰۰ متر، با کف حفاری شده است. [۱-۴]

قابل کنترل ۲- فاکتورهای محیطی. در جدول ۱- لیست این فاکتورها آورده شده. 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 است. تعدادی از این فاکتورها مرتبط با پیچیدگی سطح اشتراک بین سنگ و مته هستند که با وابستگی متقابل و غیر خطی در برخی از این اثرات مرکب است. از آنجایی که خصوصیات سیال کف، مثل سرعت، دانسیته و غیره، وابسته به نوع سازند، فشار سازند و... است، بنابراین، فاکتورهای محیطی را شامل می‌گردد. [۵]

فاکتورهایی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، در جدول ۲- مشخص شده است. این فاکتورها بر اساس اطلاعات میدانی و عملیاتی است.

خصوصیات سازند/سنگ: خصوصیات سازند که روی نرخ نفوذ مته موثرند، به ترتیب اهمیت از بیشترین به کمترین عبارتند از: سنگ‌شناسی، استحکام، دانسیته، تخلخل و تراوایی سازند. حدود الاستیک و مقاومت نهایی سازند، مهمترین خصوصیات تأثیرگذار سازند بر نرخ حفاری هستند. در بسیاری از موارد، این خصوصیت را به عنوان قابلیت حفاری سازند نیز بررسی می‌کنند. در این مقاله، قابلیت حفاری سازند به عنوان خصوصیت سازند و پارامتر ورودی در نظر گرفته شد. قابلیت حفاری سازندهای میدان مورد مطالعه به سه دسته زیر تقسیم بندی شد:

- (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 ژیبس
- (ج) سنگ‌های سخت: آهک‌ها و دولومیت‌های فشرده، ماسه‌ها با سیمان زیاد، کوارتزیت و چرت

۱- فاکتورهای موثر بر نرخ نفوذ مته

فاکتورهای موثر می‌توانند به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی شوند: ۱- فاکتورهای

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (en.baghbani@gmail.com)



تغییر در آن‌ها، پاسخ (سرعت حفاری) تغییر چشم گیری می کند. همچنین برای پیش بینی این متغیرها در فرم ساده ریاضی استفاده می شود. طراحی آزمایش

۱ | فاکتورهای مطرح شده موثر بر نرخ نفوذ مته

فاکتورهای قابل کنترل	فاکتورهای محیطی
طراحی مته	عمق
وزن روی مته	خصوصیات سازند
سرعت چرخش	دانسیته کف
دبی تزریق سیال	سلیز مته
دبی تزریق هوا	فشار سیال پایین چاه
گشتاور	دیگر خصوصیات کف
فشار پمپاژ	حالت پوشش دندانه مته

۲ | فاکتورها و نمونه داده بررسی شده میدان مورد مطالعه

شماره چاه	عمق (متر)	وزن روی مته (کیلوپوند)	سرعت چرخش (rpm)	نرخ تزریق (گالن بر دقیقه)	حجم هوا (scfm)	فرسودگی دندانه مته	قابلیت حفاری سازند
x	۷۶	۱۰	۸۰	۱۳۰	۴۰۰۰	۰	۴
x	۷۷	۱۰	۸۰	۱۳۰	۴۰۰۰	۰	۴
x	۲۰۰۰	۱۱	۹۵	۱۰۰	۵۰۰۰	۶	۶
x	۲۰۱۰	۱۱	۹۵	۱۰۰	۵۰۰۰	۶	۶
x	۲۷۰۰	۱۱	۹۵	۱۰۰	۵۰۰۰	۲	۸
x	۲۸۰۰	۲۳	۹۵	۱۰۵	۶۰۰۰	۱	۸
y	۲۰۳	۱۵	۱۲۰	۷۳	۳۰۰۰	۰	۴
y	۳۵۰	۱۵	۱۲۰	۷۳	۳۷۰۰	۱	۴
y	۱۶۰۰	۱۵	۱۲۰	۶۸	۴۶۰۰	۳	۶
y	۱۶۴۰	۱۵	۱۲۰	۶۸	۴۶۰۰	۳	۶
y	۲۸۰۰	۱۵	۱۲۰	۱۷۵	۵۱۰۰	۴	۸

۳ | قابلیت حفاری سازندهای میدان مورد مطالعه

سازند	نرم - نرم متوسط	متوسط سخت	سخت
میشان - پایه فلبیان	۴	-	-
فلبیان-دشتک c	-	۶	-
دشتک c- پایه کنگان	-	-	۸

جدول ۳- قابلیت حفاری سازندهای میدان مورد مطالعه را نشان می دهد. این جدول بر اساس مطالعه لیتولوژی و خصوصیات آن‌ها از ۴ چاه در قسمت‌های مختلف میدان و بررسی نمودارهای گرافیکی چاه پیمایی و در نهایت، بررسی همزمان وزن روی مته، خوردگی دندانه مته، نوع مته و میزان کارکرد آن و نرخ نفوذ، ارائه شده است. همچنین به علت اینکه در سه حفاره‌ی ذکر شده در میدان، شکستگی و تخلخل بالاست، تراکم لایه‌ها در اعماق، زیاد نیست.

وزن روی مته: آزمایش‌ها نشان داده که برای هر دو سازند نرم و سخت، تا زمانی که پاکسازی ته چاه به خوبی انجام شود، نرخ نفوذ به صورت مستقیم با وزن روی مته افزایش پیدا می کند. البته این رابطه تا زمانی برقرار است که وزن روی مته به مقدار آستانه خود نرسد. زیرا برای مقادیر بالاتر، نرخ نفوذ کاهش می یابد. شکل ۱- تأثیر وزن روی مته بر سرعت حفاری را نشان می دهد. [۶]

سرعت چرخش: مطالعات نشان می دهد که در سازندهای نرم بر خلاف سازندهای سخت، افزایش نرخ نفوذ، نسبت مستقیمی با سرعت چرخش دارد. در سازندهای سخت، میزان افزایش نرخ نفوذ با سرعت چرخش (دوران) از آهنگ کندتری برخوردار است. بعضاً باعث کاهش آن می شود. به همین دلیل در سازندهای نرم از سرعت دوران بالا (حدود ۱۵۰ دور بر دقیقه یا بیشتر) و در سازندهای سخت از سرعت دوران پایین (حدود ۴۵-۷۵ دور بر دقیقه) استفاده می شود. [۷]

حجم هوای تزریقی: مقدار فوت مکعب هوای تزریقی در چاه است. بسته به عمق و مقدار نیاز جهت انتقال خرده‌ها، مقدار حجم تزریق متفاوت است. هر چقدر مقدار هوای تزریقی مناسب و کافی باشد، باعث بهتر تمیز شدن اطراف مته و چاه و در نتیجه، افزایش نرخ نفوذ و عمر مته می شود. [۸]

فرسودگی دندانه مته: فاکتوری که به طور خطی با عمق در نظر گرفته می شود. زمانی که مته‌ی سالم و جدید استفاده شود، آن را با عدد صفر نشان می دهند و هنگامی که مته تعویض می شود، بر اساس مقدار گزارش شده، فرسودگی مته عددگذاری می گردد. کاهش نرخ نفوذ به دلیل فرسودگی مته در مته‌های دندانه فولادی معمولاً به شدت مته‌های دکمه‌ای نیست. [۶]

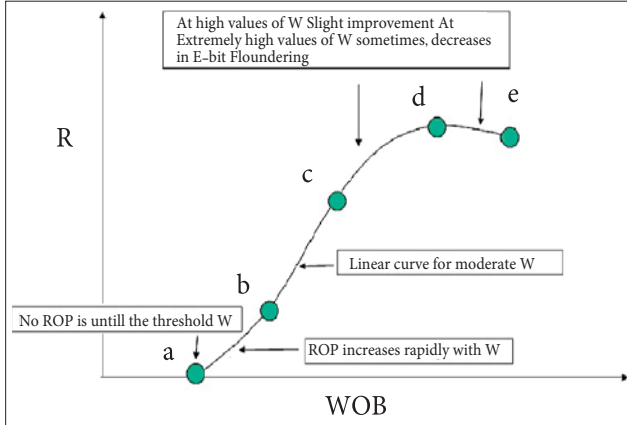
عمق چاه: عمق از جمله پارامترهایی است که با نرخ نفوذ، رابطه عکس دارد. به این صورت که هرچه عمق حفاری بیشتر باشد، از میزان نرخ حفاری کاسته می شود. البته این پارامتر با سایر عوامل حفاری در ارتباط بوده و نمی توان آن را به طور مستقل از فاکتورهای تأثیرگذار دیگر مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، با افزایش عمق حفاری به دلیل افزایش وزن طبقات بالایی، فشار سازند در عمق حفاری افزایش می یابد و برای غلبه بر این فشار باید بر درصد کف و حجم هوا اضافه کرد. [۷]

نرخ جریان: در حفاری با کف، همراه با هوا، سیال آب و گاهی بنتونایت جهت تشکیل کف و انتقال بهتر خرده‌ها تزریق می شود. نرخ جریان روی نرخ نفوذ تأثیرگذار است اما این اثر فقط تا حد مشخصی وجود دارد. نرخ جریان باید متناسب با حجم هوا تزریق شود. [۸]

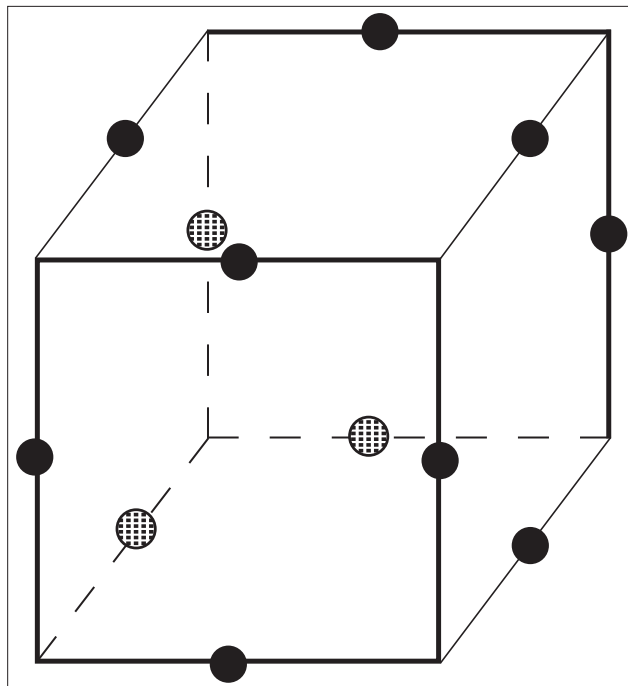
۲- طراحی سطح پاسخ

طراحی سطح پاسخ جهت مشخص کردن فاکتورهایی که به کار می رود که با

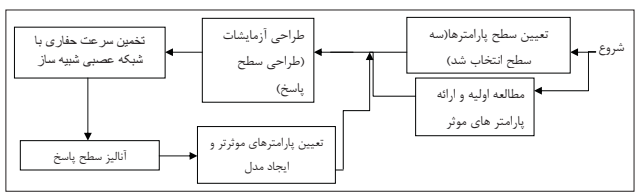
در این مطالعه، ابتدا همراه با پارامترهای مذکور در جدول ۲، گشتاور و فشار پمپ نیز به عنوان پارامترهای اولیه طراحی انتخاب شدند. بعد از فرایند آنالیز ضریب همبستگی و رگرسیون پله‌ای^{۱۴} تنها ۷ پارامتر به عنوان پارامترهای ورودی و موثر انتخاب شدند که در جدول ۴ این پارامترها با سطح‌های



شکل ۱ | تاثیر وزن روی مته بر سرعت حفاری [۶]



شکل ۲ | طراحی باکس-بنکن برای سه فاکتور



شکل ۳ | شماتیک فرایند مطالعه بر آنالیز تاثیر پارامترهای حفاری بر سرعت حفاری

یک روش آماری کاربردی است که تعداد و سطح متغیرها را بر این اساس که از کمترین اجرای (run) آزمایش، بیشترین اطلاعات را کسب کند، تعیین می‌کند. جزئیات بیشتر را در مطالعات گذشته مرتبط می‌توان یافت کرد [۹]. اولین مطالعه روش طراحی آزمایش‌ها در صنعت نفت و گاز به دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ برمی‌گردد. اما کاربرد اصلی آن در انجام آزمایش‌های فیزیکی است. بیشتر مطالعات بر روی عملکرد تولید به عنوان خروجی پاسخ بوده است. برای انتخاب بهترین طراحی از بین طراحی‌های موجود همچون طراحی کسری فاکتوریال^{۱۵}، طراحی تاگوچی، طراحی پلکت-برمن^{۱۶} و یا کس-بنکن^{۱۷}، طراحی فاکتوریال کامل^{۱۸}، با توجه به تعداد پارامترهای موجود جهت کم کردن تعداد اجرای آزمایش و کاهش زمان، از روش طراحی آزمایش باکس-بنکن که یکی از حالات طراحی سطح پاسخ است، استفاده شد. با استفاده از این روش، تنها ۶۲ اجرا انجام شد که این، زمان را خیلی کم می‌کند و نشان‌دهنده این است که روش به کار رفته مفید بوده است، اما اگر از روش فاکتوریال کامل استفاده می‌شد، ۳۷ یعنی ۲۱۸۷ اجرا و آنالیز باید انجام می‌گرفت. در این روش، برای طراحی از سه سطح برای پارامترها استفاده شد. دانش کافی در طراحی‌ها برای فهم بهتر در مورد اثرات مستقل و محدودیت درجه آزادی در اجراهای طراحی بسیار مهم است. طراحی آزمایش باکس-بنکن برای روش سطح پاسخ، توسط جورج باکس و دونالد بنکن در سال ۱۹۶۰ اختراع شد. شکل ۲، می‌تواند حالت ساده‌ای به عنوان طراحی سه فاکتور در سه سطح معرفی کند [۱۰]. در این مطالعه به تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند، پرداخته می‌شود که با توجه به مقدار اثرات آن‌ها تبدیل به معادله‌ای خواهد شد که نوع ارتباط بین پارامترهای موثر و نرخ نفوذ مته یا همان سرعت حفاری را نشان می‌دهد. این امر با آنالیز حساسیت^{۱۹} نیز امکان‌پذیر است، اما این روش، تنها، نرخ نفوذ را بر اساس اثرات اصلی (منفرد) ارزیابی می‌کند و اثرات متقابل بین پارامترهای مختلف را وارد معادله نمی‌کند. لذا، استفاده از آنالیز طراحی آزمایش‌ها بهترین روش برای دستیابی به این هدف است. در این مسیر، از قدرت شبکه عصبی جهت تخمین سرعت حفاری برای حالات آزمایش‌ها استفاده می‌شود. شکل ۳- شماتیک از فرایند مطالعه را برای آنالیز تأثیر پارامترهای حفاری بر سرعت حفاری نشان می‌دهد.

شکل ۴ | سطح تعیین شده پارامترهای موثر در طراحی

پارامتر	پایین	متوسط	بالا
عمق	۷۶	۱۵۰۲	۲۹۲۹
وزن روی مته	۸	۱۷	۲۵
سرعت چرخش	۸۰	۱۰۲	۱۲۵
دبی تزریق سیال	۶۵	۱۲۲	۱۸۰
دبی تزریق هوا	۲۵۰۰	۴۲۵۰	۶۰۰۰
فرسودگی دندان مته	۰	۴	۸
قابلیت حفاری سازند	۴	۶	۸



می‌کند؛ به این معنی که تا جایی که ممکن است محاسبه را ادامه می‌دهد. برای به دست آوردن سرعت حفاری، از مجموع ۵۵۰۵ داده مربوط به دو چاه ذکر شده، ۷۰ درصد این مقدار به طور تصادفی برای آموزش، ۲۰ درصد برای آزمون شبکه و ۱۰ درصد برای اعتبارسنجی انتخاب شد. برای بالابردن قابلیت تشخیص شبکه، ورودی‌های شبکه در بازه ۱- و ۱ نرمال شدند. سرعت حفاری در دو سری داده‌ی آموزش و تست، توسط شبکه تخمین زده شد. ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در سه سری داده آموزش و تست و اعتبارسنجی به ترتیب

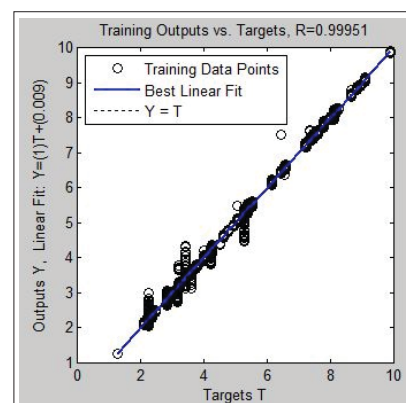
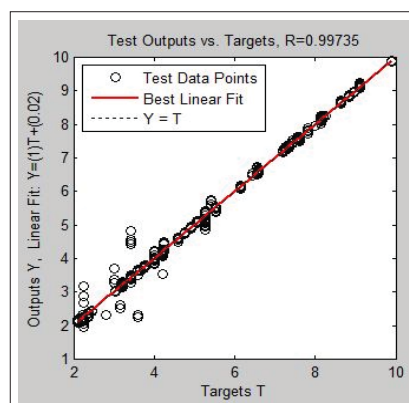
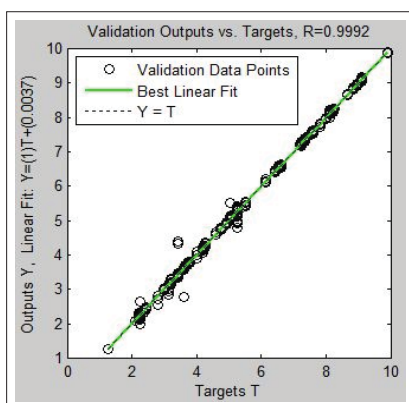
انتخاب شده برای طراحی، نشان داده شده است. محدوده‌ی بالا و پایین برای طراحی با توجه به اطلاعات میدانی یکسان انتخاب شده است. تأثیر گشتاور در این مطالعه مقدار بسیار پایین همبستگی را داشته و فشار پمپ نیز با نرخ تزریق سیال دارای ضریب همبستگی بالایی است. لذا این دو پارامتر از پارامترهای ورودی حذف گردیدند.

۳- شبکه عصبی

شبکه عصبی نوشته شده با ۳ لایه‌ی پنهان بوده و به صورت دینامیکی عمل

جدول ۵ نمونه حالات آزمایش و سرعت حفاری پیش‌بینی شده

عمق	وزن روی مته	سرعت چرخش	دبی تزریق سیال	دبی تزریق هوا	فرسایش دندانه مته	قابلیت حفاری سازند	سرعت حفاری
-۱	۱	۰	-۱	۰	۰	۰	۱/۲۵-۱۹۳
۰	۱	۰	۰	-۱	۰	۱	۴/۴۱۵۸۶۴
۰	۰	۱	۱	۰	۰	-۱	۹/۹۰۹۳۹۶
۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۹/۱۴۷۱۸۶
-۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۹/۸۳۳۲۰۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۷۱۹۹۶۴
۱	۱	۰	-۱	۰	۰	۰	۹/۹۰۹۶۹۱
۱	۰	-۱	۰	-۱	۰	۰	۱/۲۵۰۲۷۴
۰	۰	۱	۰	۰	۰	-۱	۹/۹۰۹۳۰۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۷۱۹۹۶۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۷۱۹۹۶۴
۰	-۱	۱	۰	۰	۱	۰	۹/۶۵۷۵۰۱
۰	۱	۱	۰	۰	-۱	۰	۲/۰۱۶۲۰۷



۶ | سرعت حفاری اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت حفاری پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در داده‌های اعتبارسنجی



۵ | سرعت حفاری اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت حفاری پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در داده‌های تست



۴ | سرعت حفاری اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت حفاری پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در داده‌های آموزش



مهم تأثیر گذار نشان می‌دهد. باید توجه داشت که این رابطه به صورت کد شده بوده و پارامترهای ورودی باید بین ۱ و ۱- نرمالایز شده و بعد در فرمول قرار گیرند.

$$\begin{aligned} ROP = & 5.79048 - 0.03225 (MD) - 0.30652 (WOB) + 2.28548 (RPM) + 0.86783 \\ & (GPM) + 2.02901 (AIR) - 0.73974 (\text{Tooth wear}) - 0.73921 (\text{Drill ability}) + \\ & 1.17781(MD)^2 + 1.83866(WOB)^2 + 0.67254 (RPM)^2 - 2.09099 (GPM)^2 - 3.23527 \quad (2) \\ & (MD \times WOB) - 2.48442 (MD \times \text{Drill ability}) + 0.70042 (WOB \times AIR) + 1.24880 \\ & (RPM \times GPM) - 2.10801 (RPM \times AIR) + 0.89238 (GPM \times AIR) + 1.32461 \\ & (GPM \times \text{Tooth wear}) - 0.44178 (\text{Tooth wear} \times \text{Drill ability}) \end{aligned}$$

نتیجه‌گیری

این مقاله چگونگی کاربرد طراحی آزمایش‌ها برای تعیین رفتار احتمالی سرعت حفاری در برابر تغییر پارامترهای موثر بر آن را نشان داد. روش باکس-بنکن جهت یافتن پارامترهای موثر بر سرعت حفاری و همچنین ایجاد معادله‌ای برای تعیین سرعت حفاری استفاده شد که با کوتاه‌ترین رابطه و نیز دقت کافی، معادله مورد نظر تخمین زده شد. پارامترهای موثر شامل: وزن روی مته، سرعت چرخش، دبی تزریق سیال، دبی حجم هوا، فرسودگی دندان مته، و قابلیت حفاری سازند تعیین گردید. با توجه به آنالیز انجام شده، بیشترین تأثیرات را اثر متقابل عمق و وزن روی مته و اثر متقابل عمق و قابلیت حفاری سازند داشتند و کمترین اثر را خود عمق به طور منفرد داشته است. با توجه به چگونگی رابطه بین پارامترهای موثر تر بر نرخ نفوذ مته می‌توان با بهینه کردن این پارامترها هزینه و زمان حفاری را کاهش داد.

در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. هر چه مقدار ضریب همبستگی و شیب خط به عدد ۱ نزدیک تر باشد، پراکندگی داده‌ها حول خط برازش کمتر و نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر است. مقدار ضریب همبستگی در سه سری داده آموزش، تست و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹۵۱ و ۰/۹۹۷۳۵ و ۰/۹۹۹۹۲ است.

با توجه به نتایج شبکه و برای نشان دادن قابلیت تخمین خوب آن، داده‌های طراحی، جهت تخمین سرعت حفاری به شبکه داده شد. سرعت حفاری تخمین زده شده به صورت نرمالایز بوده که به کمک معادله ۱- به سرعت حفاری واقعی تبدیل می‌شود.

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

بعد از تبدیل سرعت حفاری نرمالایز پیش‌بینی شده توسط شبکه با معادله ۱-، آنالیز سطح پاسخ انجام می‌شود. جدول ۵- نمونه‌ای از حالات آزمایش و سرعت حفاری پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. بعد از اجرای آنالیز باید ترم‌های دارای p بیشتر از ۰/۰۵ که بر اساس حالات آماری و ریاضی تعریف شده است، حذف و دوباره برنامه اجرا شود. این امر تا جایی ادامه دارد که تنها ترم‌هایی با مقدار $p < 0.05$ باقی بماند که این ترم‌های باقی مانده ترم‌های مهم و تأثیر گذار هستند. در نهایت بعد از آنالیز، رابطه‌ای بین سرعت حفاری و پارامترهای ورودی به دست آمد. معادله ۲- رابطه‌ی سرعت حفاری با ضریب همبستگی ۹۹/۱۰ درصد و ضریب همبستگی تنظیم شده ۹۸/۱۶ درصد را با پارامترهای

پانویس‌ها

1. Under Balanced Drilling (UBD)
2. Foam
3. Rate of Penetration (ROP)
4. response surface design (DOE)
5. minitab
6. Standard Cubic foot (Scf)
7. tooth wear bit
8. Flow rate
9. fractional factorial design
10. Placket-Burman
11. Box-Behnken
12. Full Factorial design
13. sensitive analysis
14. stepwise regression

منابع

- [1] J.Ramalho, Underbalanced drilling in the reservoir, An integrated technology approach[C]. SPE 103576, SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 2006.
- [2] L.Shale, Underbalanced drilling with air offers many pluses, Oil & Gas 26, 1995.
- [3] GSI., Underbalanced Drilling Manual. GSI, 1997.
- [4] Bourgoyne, A.T. Jr., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. and Young, F.S. jr., 1991. "Applied Drilling Engineering". Society of Petroleum Engineering.
- [5] Fear, M.J. "How to Improve Rate of Penetration in Field Operations", SPE 55050, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, USA, March 12-15, 1999.
- [6] Moore, Preston I., 1986. "Drilling Practices Manual". PennWell Publishing Company.
- [7] Nguyen, J.p., 1996. "Oil and Gas Field Development Techniques Drilling". Editions Technip.
- [8] William C. Lyones., "Air and Gas Drilling Field Guide". Third Edition., 2009.
- [9] Douglas C. Montgomery., George C. Runger. "Applied Statistics and Probability for engineers". Fifth Edition., 2011.
- [10] Myers, R.H., Montgomery, D.C. 1995. Response surface Methodology- process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons, New York.