



مقاله پژوهشی

تخمین نرخ نفوذ مته براساس رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه در سازند گورپی در یکی از میادین جنوب غربی ایران

حیدر صائمی^{۱*}؛ احمد رمضانزاده^۲؛ محمد مهرداد^۲

۱- دانشجوی ارشد ژئومکانیک نفت، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استاد تمام، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2024.479829.1240

واژگان کلیدی	چکیده
نرخ نفوذ مته، مقاومت تراکمی، تک محوری، مقاومت کششی، فشار منفذی، مدل ژئومکانیکی، رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه	نرخ نفوذ مته (ROP) یکی از پارامترهای کلیدی در عملیات حفاری است که می‌تواند تأثیر زیادی بر هزینه‌ها و زمان حفاری داشته باشد. تاکنون مطالعات بسیار گسترده‌ای در مورد پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ مته انجام شده است. بسیاری از این پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ به صورت آزمایشگاهی یا صحرایی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هنوز روش کامل و جامعی شامل کلیه پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ مته جهت مطالعه و بررسی قابلیت حفاری و نفوذ در سنگ ارائه نشده است. این مقاله به بررسی امکان تخمین نرخ نفوذ مته در سازند گورپی واقع در یکی از میادین جنوب غرب ایران با استفاده از پارامترهای حفاری، ژئومکانیکی و زمین‌شناسی می‌پردازد. در این مقاله با بهره‌گیری از داده‌های حفاری، پتروفیزیکی و زمین‌شناسی ۶ حلقه چاه در سازند گورپی تلاش شد رابطه‌ای با نرخ نفوذ مته بدست آید. براساس داده‌های پتروفیزیکی و همچنین نتایج آزمایش مکانیک سنگی بر روی نمونه‌های مغزه، مدل ژئومکانیکی برای چاه‌های مذکور ساخته شد. با تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، پیش‌پردازش داده‌ها انجام و بانک اطلاعاتی برای داده‌ها تشکیل گردید. پس از حذف داده‌های پرت، به روش رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه داده‌ها تحلیل شدند. در نهایت برای سازند گورپی معادله‌ای براساس پارامترهای موجود به دست آمد که با مقایسه مقدار واقعی نرخ نفوذ در یکی از چاه‌ها، صحت‌سنجی آن مورد ارزیابی قرار گرفت که نتیجه مطلوبی حاصل شد.

گرانروی گل می‌باشد، تأثیر مستقیم بر سرعت حفاری نداشته و فقط وظیفه انتقال کنده‌های حفاری و خنک کردن مته را دارد. که اگر در حالت بهینه نباشد هم باعث کاهش سرعت حفاری شده و هم باعث مشکلات بسیار دیگری نیز می‌گردد. تخمین نرخ نفوذ مته در عملیات حفاری به ویژه در میادین نفتی و گازی از اهمیت بالایی برخوردار است. نرخ نفوذ مته بالاتر به معنی انجام عملیات حفاری سریع‌تر، راندمان بهتر دکل حفاری و کاهش هزینه‌های حفاری در واحد طول چاه است. عموماً مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ مته را می‌توان از طریق مدل‌های سنتی (بر مبنای آزمایش‌های فیزیکی)، مدل‌های برمبنای شبکه‌های عصبی و روش‌های رگرسیونی بدست

پیش‌گفتار

مقدار مترژ حفاری شده در واحد زمان را نرخ نفوذ مته می‌گویند و برحسب متر بر ساعت، متر بر دقیقه و یا دقیقه بر متر بیان می‌شود. نرخ نفوذ مته تحت تأثیر پارامترهای نوع و سایز مته، شرایط و $IADC\ CODE$ مته، وزن روی مته، سرعت گردش مته، نوع سازند و سنگ‌شناسی آن، فشار سازند، نوع گل حفاری و خصوصیات آن (وزن و گرانروی)، عمق حفاری، هیدرولیک حفاری و زاویه انحراف چاه می‌باشد. تأثیر برخی از پارامترهای ذکر شده نسبت به زمان ثابت و تأثیر بعضی از آنها نسبت به زمان متغیر و دینامیک می‌باشند [۱] و [۲]. البته هیدرولیک حفاری که شامل دبی و فشار خروجی پمپ و

* تهران، خیابان اشرفی اصفهانی، بالاتر از همت، نبش کوچه غروی، مجتمع اداری رونیکا پالاس، بلوک B، طبقه ۱۱، واحد ۲۱۱۱. کد پستی: ۱۴۷۶۷۸۵۵۴۳. رایانامه نویسنده مسئول: hsaemi@pasargadep.com

داده‌های مورد بررسی، تعیین کردند. در ادامه شبکه‌های عصبی تعمیمی رگرسیونی (*GRNN*) برای یافتن رابطه پیچیده ۸ تابع مورد بررسی با نرخ نفوذ را به کار بردند. برای این منظور از ۷۵ درصد داده‌های هر سازند برای آموزش مدل استفاده و از ۲۵ باقیمانده برای آزمون مدل استفاده کردند [5].

عرب‌جمالی و شادیزاده (۲۰۱۱) از سه روش آماری، مدل بورگوین و یانگ و شبکه عصبی پیشرو برای پیش‌بینی قابلیت حفاری میدان نفتی اهواز استفاده کردند. در این مطالعه نوع مته مشخصات سازند، شرایط عملیاتی مته (سرعت دوران و وزن روی مته)، سائیدگی دندان مته، هیدرولیک مته، هد هیدرولیکی و چگالی معادل در جریان به عنوان پارامترهای ورودی‌های مدل بودند. ایشان از تعداد ۳۳۰ نقطه داده از ۳۵ حلقه چاه حفاری شده استفاده کردند. به منظور بالا بردن دقت، عرب‌جمالی و شادیزاده فرآیند پیش‌پردازی را برای حذف داده‌های دورافتاده استفاده کردند بدین منظور آنها در مرحله اول از تجارب مهندسی حفاری برای تشخیص تغییرات ناگهانی در فرآیند حفاری استفاده کردند. در مرحله دوم با استفاده از چندین شبکه عصبی که دارای ساختارها و توابع آموزشی مختلف بودند؛ نقاط داده‌ای که در تخمین منجر به مقادیر خارج از محدوده یا دورافتاده برای نرخ نفوذ بودند، را تشخیص داده و حذف کردند. تعداد نقاط داده بعد از حذف داده‌های دورافتاده به ۳۰۰ نقطه داده رسید. با توجه به ناکافی بودن نقاط داده، عملیات بی‌بعد سازی پارامترهای ورودی و خروجی با استفاده از بیشترین و کمترین مقدار هر پارامتر بین [۱،۱-] انجام شد. فرآیندهای پیش‌پردازی داده موجب بهبود قابل توجهی در دقت مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ گردید. در پایان، الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای ورودی با توجه به نتایج شبکه عصبی پیشرو به کار برده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که شبکه عصبی نتایج بهتری را در مقایسه با دو مدل دیگر ارائه می‌دهد [6]. نقطه ضعف این تحقیق را می‌توان در عدم نامشخص بودن چگونگی تعیین مشخصات سازند در مدل دانست. محققان هیچ‌گونه اشاره‌ای مبنی بر این‌که چه پارامترهای از سازند مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نداشتند.

بتابی و محسنی (۲۰۱۱) شبکه عصبی پسرور را به منظور بهینه‌سازی نرخ نفوذ در میدان نفتی شادگان به کار بردند. به

آورد. این مدل‌ها عمدتاً برای یک نوع خاص از مته توسعه یافته‌اند و شامل تعدادی از ضرایب تجربی که بعضی از آنها وابسته به مشخصات زمین‌شناسی می‌باشند و می‌توانند یک ارتباط بین پارامترهای حفاری و نرخ نفوذ مته برقرار نمایند. برای اولین بار گاله و وودز (۱۹۶۳) تأثیر کنترل پارامترهای حفاری به منظور بهبود نرخ نفوذ و در نتیجه کاهش هزینه‌های حفاری را با استفاده از یک رابطه ریاضی بررسی کردند برای این منظور آنها تنها روی دو پارامتر وزن روی مته و سرعت دوران تمرکز کردند بر این اساس گرافها و دستورات عملیاتی را برای کاربردهای عملی در تعیین بهترین مقادیر وزن روی مته و سرعت دوران توسعه دادند. همچنین مطالعات آنها روی سیال حفاری و مته نشان داد که انتخاب مته مناسب و هیدرولیک آن تأثیر چشمگیری روی نرخ نفوذ دارد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین سائیدگی مته و وزن روی آن وجود دارد [۳].

مرادی و همکاران (۲۰۱۰) [4] با استفاده از محاسبات نرم‌افزاری مدل جدیدی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه کردند. ایشان عمق واقعی عمودی، وزن روی مته، قطر مته، سرعت دوران، گرادیان فشار منفذی، چگالی معادل در جریان، درصد سائیدگی دندان‌های مته و نیروی ضربه نازل را به عنوان پارامترهای ورودی این مدل انتخاب کردند و از سیستم فازی برای تقریب نرخ نفوذ استفاده نمودند. برای رسیدن به این هدف، داده‌های ده چاه از سطح زمین تا عمق‌نهایی را گردآوری کردند. با توجه به گزارش‌های حفاری، از داده‌های نه چاه که دارای دقت بهتری بودند؛ به عنوان پارامترهای ورودی مدل استفاده نمودند. داده‌ها براساس روش میانگین K به گروه‌هایی تقسیم شدند و در ادامه برای تعیین توابع عضویت از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند. ۷۵ درصد داده‌های هر سازند برای آموزش مدل و ۲۵ درصد باقی‌مانده برای آزمون مدل به کار بردند.

بهراری و همکاران (۲۰۰۷) مدل بورگوین و یانگ را متشکل از ۸ تابع ($f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8$) و $f8$)، برای میدان گازی خانگیران بکار بردند. ایشان عمق واقعی عمودی، نیروی ضربه نازل، وزن روی مته، سرعت دوران، گرادیان فشار منفذی، سائیدگی مته و چگالی معادل در جریان از ده چاه را جمع‌آوری کردند. سپس با به کارگیری الگوریتم ژنتیک ضرایب ثابت مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ با استفاده از

استفاده از الگوریتم‌های هوشمند جهت بهینه‌سازی پارامترهای شبکه و استفاده از روش آزمون و خطا برای تعیین ساختار شبکه می‌باشد. نتایج پیش‌بینی مدل ارائه شده آنها بر خلاف روش‌های سنتی (روش رگرسیون) همخوانی خوبی را با نتایج واقعی نشان داد.

عامر و ابراهیم (۲۰۱۲) از سه روش، رگرسیون، شبکه عصبی تابع شعاعی پایه و ماشین یادگیری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده کردند. هدف از این مطالعه، مقایسه روش‌ها براساس سرعت و دقت در سه مرحله آموزش، اعتبار سنجی و آزمون بود. پارامترهای ورودی در هر سه مدل یکسان و شامل، عمق، سرعت دوران، وزن روی مته، سائیدگی دندان مته، عدد رینولدز، وزن معادل در جریان و گرادیان فشار منفذی می‌باشند. نتایج مقایسه نشان داد که شبکه عصبی شعاعی پایه از نظر دقت از سایر روش‌ها بهتر عمل می‌کند؛ ولی ماشین یادگیری از نظر سرعت پردازش داده نسبت به سایر روش‌ها بهتر می‌باشد [9]. در این مقاله نیز تأثیر پارامترهای سازند بر روی نرخ نفوذ بررسی نشده است؛ هر چند هدف فقط بررسی روش‌ها از نظر دقت و سرعت بوده است. تلفیق دو روش شبکه عصبی و ماشین یادگیری با الگوریتم‌های بهینه‌سازی به نظر می‌رسد، می‌تواند ایده‌ای بهتر باشد.

اخلاقی و همکاران (۲۰۱۲) از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در چاه‌های شیبدار میدان نفتی اهواز بهره بردند. در این تحقیق عمق، اندازه نازل، وزن روی مته، سرعت دوران، وزن گل و محتوای جامد پارامترهای ورودی و نرخ نفوذ پارامتر خروجی بودند. آنها بیش از ۳۰۰ نقطه داده از ۶ چاه مایل میدان نفتی مورد بررسی گردآوری کردند. قبل از ایجاد مدل، با استفاده از تجربه، داده‌های دورافتاده را حذف کردند. ایشان نشان دادند نتایج پیش‌بینی، همخوانی خوبی با داده‌های واقعی نرخ نفوذ دارد [10]. نقدی که بر این مطالعه وارد است این است که سه پارامتر مهم یعنی نوع مته، شیب چاه و مشخصات سازند در این مطالعه نادیده گرفته شده است. به نظر می‌رسد اعمال این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ شود.

نینگ و همکاران (۲۰۱۳) از مدل ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی-شبکه عصبی پسر و برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و پیشنهاد مته مناسب استفاده کردند. مقاومت فشاری تک محوره، اندازه مته، نوع مته، ضریب قابلیت حفاری، زمان از

منظور یافتن بهترین ساختار شبکه عصبی شبکه‌های عصبی دو لایه، سه لایه و چهار لایه مورد بررسی قرار دادند. شبکه عصبی سه لایه به دلیل کمترین خطا در این بررسی‌ها برای این تحقیق استفاده شده است. قطر مته، عمق، سرعت دوران، وزن روی مته و وزن گل به عنوان پارامترهای ورودی مدل انتخاب شده‌اند. از تعداد ۱۸۱۰ نقاط داده، ۶۰ درصد برای آموزش شبکه، ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل در حین آموزش و ۲۰ درصد دیگر به منظور آزمون مدل بعد از آموزش مورد استفاده قرار گرفته است. ایشان محدوده مقادیر وزن گل، وزن روی مته و سرعت دوران را برای عمق‌های مختلف مشخص نموده و مقادیر بهینه این پارامترها در این محدوده را با توجه به نرخ نفوذ، بهینه انتخاب کردند [7]. معمولاً شبکه‌های عصبی به منظور پیش‌بینی و طبقه‌بندی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما در این تحقیق از این روش برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ورودی استفاده شده است. داده‌های این مطالعه مربوط به اعماق صفر تا ۳۴۰۰ متری می‌باشند. مطمئناً این داده‌ها مرتبط به سنگ‌شناسی‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف می‌باشند؛ بنابراین لحاظ خواص سنگ در مدل نرخ نفوذ الزامی است در حالی که به این مسئله مهم در این تحقیق پرداخته نشده است.

منظمی و همکاران (۲۰۱۲) از شبکه عصبی مصنوعی پیشرو برای پیش‌بینی نرخ نفوذ یکی از میداین نفتی جنوب ایران استفاده کردند. آنها شبکه عصبی با سه لایه پنهان را برای تخمین نرخ حفاری در این مطالعه انتخاب کردند و به منظور کاهش خطای شبکه، داده‌هایی که دارای همبستگی بالایی داشتند را از ادامه مطالعات حذف کردند. پارامترهای ورودی مدل در این مطالعه شامل خواص گل (وزن گل، گرانیروی پلاستیک و درصد مواد جامد)، نرخ جریان، سرعت دوران مته، عمق، وزن روی مته، شیب و قطر چاه بودند. ۳۳۶ نقطه داده از میدان جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفته که ۸۰ درصد این نقاط (۲۶۸ نقطه داده) را برای آموزش شبکه، ۱۰ درصد (۳۴ نقطه داده) برای اعتبارسنجی مدل و ۱۰ درصد دیگر (۳۴ نقطه داده) برای آزمون مدل استفاده کردند. نتایج مدل ایجاد شده همخوانی خوبی با نتایج واقعی نشان داد [7]. یکی از نقاط ضعف این تحقیق را می‌توان در عدم بررسی تأثیر خواص سازند در نرخ نفوذ دانست. از محدودیت‌های دیگر آن، عدم

دست رفته، وزن روی مته، سرعت دوران، وزن گل و گرانروی ظاهری پارامترهای ورودی مدل را تشکیل می‌دادند. این داده‌ها از نگارهای برداشت شده از عمق ۵۰۰ متری تا عمق ۵۲۳۰ متری استخراج گردیده‌اند. ایشان قبل از ورود پارامترهای نرمالیزه شده به شبکه عصبی پسر، به منظور بالا بردن زمان همگرایی شبکه و افزایش دقت پیش‌بینی مدل، از تحلیل سلسله مراتبی به منظور تعیین وزن‌های اولیه نرون‌ها در شبکه عصبی استفاده کردند. مدل ترکیبی نسبت به مدل ساده شبکه عصبی همگرایی سریع‌تری را نشان داد. با توجه به پایین بودن نرخ نفوذ از عمق ۵۰۸۰ متری تا عمق ۵۲۰۷ متری نوع مته از *MI365D* به *HA517G* تغییر یافت. نتایج پیش‌بینی برای مته جدید، نشان از افزایش نرخ نفوذ در این محدوده عمقی است [11].

دوان و همکاران (۲۰۱۵) مدل نرخ نفوذی را برای پیش‌بینی نرخ حفاری و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی با استفاده از شبکه عصبی پسر و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه دادند. بدین منظور آنها از پارامترهای اختلاف فشار ته چاه، قابلیت حفاری، چگالی گل، وزن روی مته، سرعت دوران و ظرفیت تحویل استفاده کردند. ابتدا با استفاده از شبکه عصبی و داده‌های تنها یک چاه مدل نرخ نفوذ را بدست آوردند. سپس از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل استفاده کردند. در این مطالعه به کارگیری مقاومت فشاری تک محوره به عنوان قابلیت حفاری سازند در کنار سایر پارامترها منجر به ارائه نتایج دقیق‌تری از نرخ نفوذ شده است [12]. هرچند قابلیت حفاری سازند تنها با استفاده از یک پارامتر تعیین نمی‌شود.

انصاری و همکاران (۲۰۱۶) به منظور انتخاب بهترین پارامترهای تأثیرگذار در تخمین نرخ نفوذ از تحلیل خطای انتخاب با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره استفاده کردند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل ضخامت لایه، گرانروی، سرعت دوران، فشار پمپ، وزن روی مته، چگالی گل، انحراف چاه، مشخصات یاتاقان، نوع مته، نوع سازند و قطر مته می‌باشند. از میان پارامترهای مورد بررسی هشت پارامتر اول را برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان با کرنل‌های مختلف انتخاب کردند. بهینه‌سازی پارامترهای رگرسیون بردار پشتیبان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری نشان داد که نتایج

دقیق‌تری نسبت به سایر رگرسیون‌های بردار پشتیبان با کرنل‌های مختلف ارائه می‌دهد [13].

بزمین‌آبادی و همکاران (۲۰۱۷) برای بررسی اثر مشخصات سنگ در تخمین نرخ نفوذ، علاوه بر پارامترهای عملیاتی از ویژگی‌های سنگ نیز استفاده کردند. پارامترهای به کار رفته در این تحقیق شامل عمق، وزن روی مته، اختلاف فشار ته چاه، سرعت دوران، نرخ جریان، وزن سیال حفاری، سائیدگی دندان مته، تخلخل، چگالی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت ویژه سازند، نگار پرتو گاما، سرعت صوت فشاری و مقاومت فشاری تک محوره می‌باشند [14]. آنها نشان دادند که به کارگیری مشخصات سازند می‌تواند دقت مدل‌های نرخ نفوذ را به طور چشمگیری افزایش دهد. یکی از محدودیت‌های مدل ارائه شده بررسی تعداد محدودی از پارامترهای عملیاتی است و علاوه بر این مقدار ضریب همبستگی مدل برازش شده نیز پایین می‌باشد. مقایسه بین خطای مدل رگرسیونی نرخ نفوذ با ویژگی‌های ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی با مدل ایجاد شده از پارامترهای عملیاتی نشان می‌دهد، که انتخاب ویژگی درستی برای ساخت مدلی با قابلیت اطمینان بالا انجام نشده است.

آنه‌منگلی و همکاران (۱۳۹۶) تلاش کردند با بررسی داده‌های میدانی یکی از چاه‌های قائم میدان کرنج در سازند پایده و بدون در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی، نرخ نفوذ را اندازه‌گیری کنند. برای نیل به این هدف، مدل بورگوین و یانگ را به عنوان مدل نرخ نفوذ پایه در نظر گرفتند. ایشان نخست مقادیر ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته تعیین کرده، سپس نرخ نفوذ حفاری نسبت به پارامترهای حفاری را نرمالایز کردند. در ادامه روابط هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی با نرخ نفوذ نرمالایز شده را بررسی نمودند. این بررسی‌ها نشان داد که پارامترهای ژئومکانیکی به صورت نمایی رابطه بهتری را با نرخ نفوذ نشان می‌دهند. همچنین تأثیر ویژگی‌های ژئومکانیکی، به ویژه مقاومت فشاری محدود شده، بر نرخ نفوذ بسیار چشمگیر است. ایشان با توجه به وابستگی شدید برخی از پارامترهای ژئومکانیکی نسبت به هم، پارامترهای مقاومت فشاری محدود شده، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و چگالی را برای تعیین قابلیت حفاری انتخاب کردند [15]. به کارگیری قابلیت حفاری محاسبه شده در مدل بورگوین و یانگ نشان داد که

مته در شش حلقه چاه مورد مطالعه ۸ متر بر ساعت گزارش شده است. برای این پژوهش اطلاعات حفاری، گل حفاری و آزمایشات ژئومکانیکی شش حلقه چاه جمع‌آوری شد. اطلاعات نرخ نفوذ مته (ROP)، دور مته (RPM)، وزن روی مته (WOB)، فشار لوله‌ها (SPP) و گشتاور مته ($Torque$) برای تمام چاه‌ها و همچنین اطلاعات گل حفاری شامل وزن گل ($Mud Weight$)، گراندروی گل (VIS) و میزان هرزروی گل ($Mud Loss$) جمع‌آوری گردید. علاوه بر آن داده‌های پتروفیزیکی شامل نگاره‌های پرتو گاما (GR)، تخلخل ($NPHI$)، چگالی ($RHOB$) و کندی موج برشی و فشاری (DTS, DTC) گردآوری شد. افزون بر این از گزارشات روزانه، مشکلات حفاری و زمین‌شناسی چاه‌ها و سایر داده‌های مورد نیاز استخراج گردید.

۳. ساخت مدل ژئومکانیکی (MEM^1) در چاه‌ها منتخب

مدل ژئومکانیکی زمین عبارت از نمایش ریاضی حالت‌های تنش، فشار منفذی و خصوصیات مکانیکی یک مقطع خاص در یک میدان یا حوضه است. این مدل تمامی اطلاعات ژئومکانیکی، به منظور تحلیل هرگونه کاربرد مربوط به ژئومکانیک از جمله تحلیل پایداری چاه، پیش بینی تولید ماسه، طراحی شکست هیدرولیکی مخزن، ارزیابی تراکم و نشست مخزن و غیره را شامل می‌شود. با ساخت مدل ژئومکانیکی می‌توان بهترین روش لازم به منظور عملیات حفاری و تکمیل ایمن در یک چاه و کل میدان دست یافت. مراحل مختلفی در هنگام ساخت یک مدل ژئومکانیکی به منظور تحلیل ژئومکانیکی یک بعدی یا دو بعدی در یک چاه یا سه بعدی در یک میدان صورت می‌گیرد. شکل ۱ فلوچارت کلی مراحل ساخت یک مدل ژئومکانیکی با استفاده از داده‌ها و نمودارهای درون چاهی را نشان می‌دهد.

دقت مدل را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. سازند گورپی به عنوان یکی از سازندهای مهم در میدان مورد مطالعه، دارای خصوصیات خاصی است که تخمین نرخ نفوذ مته در آن را ضروری می‌سازد.

۲. میدان مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

میدان مورد مطالعه در جنوب غربی ایران، در غرب شهر اهواز قرار دارد. اولین چاه اکتشافی در گستره این میدان نفتی در سال ۱۳۵۵ حفر گردید. تاکنون چهار لایه تولیدی شامل سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان در این میدان شناسایی شده‌اند. بر روی نقشه همتراز سطحی، طول میدان حدود ۴۵ الی ۶۰ کیلومتر، عرض آن حدود ۱۷ کیلومتر و مساحت آن به طور تقریبی ۹۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد.

از ویژگی‌های این میدان می‌توان به حضور بلندهای شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی (روند عربی) اشاره کرد. بر اساس اطلاعات حفاری و لرزه‌ای جمع‌آوری شده، گسلش در پی سنگ و حرکت نمک هرمز به عنوان عوامل اصلی ایجاد ساختمان‌هایی با روند شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی معرفی شده‌اند. اوج این فعالیت‌ها در زمان کرتاسه اتفاق افتاده و با گسترش حرکات زاگرسی در اواخر پالئوژن ساختمان‌هایی با روند عربی مجدداً فعال شده‌اند. همچنین در برخی نواحی ساختمان‌هایی با روند عربی به صورت مانعی در مقابل دگرشکلی ناشی از چین خوردگی زاگرس عمل نموده‌اند. در این میدان، سازند گورپی معمولاً از ترکیبی از سنگ‌های آهکی، دولومیتی و رسوبی تشکیل شده که در پروسه‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی خاصی شکل گرفته‌اند. برش الگوی این سازند در تنگ پابده در شمال میدان نفتی لالی در شمال خاور مسجدسلیمان از ۳۲۰ متر سنگ آهک رسی و شیل خاکستری متمایل به آبی تشکیل شده است. ضخامت و سن این سازند در حوضه زاگرس از جایی به جای دیگر متغیر است به طوری که سن قاعده آن از فارس به طرف خوزستان و لرستان از سانتونین تا کامپانین و سن راس آن از ماستریشین تا پالئوسن متغیر است [16]. سازند گورپی در این میدان به طور متوسط ۳۵۰ متر ضخامت دارد و از شمال به جنوب میدان ضخامت آن افزایش می‌یابد. متوسط نرخ نفوذ

¹ Mechanical Earth Model

هستند. علاوه بر آن نتایج آزمایشگاهی مغزه‌های چاه‌ها جهت کالیبره کردن در تخمین مقاومت سنگ استفاده شد.

۲.۳. پارامترهای مقاومت سنگ

۱.۲.۳. مقاومت تراکمی تک محوری

منظور از مقاومت سنگ، توانایی سنگ در تحمل تنش‌های وارده است. مقاومت تراکمی تک محوری (UCS) رایج‌ترین معیار محاسبه پارامتر مقاومتی سنگ است که عبارت از مقاومت سنگ در برابر یک نیروی محوری است. این پارامتر معیار اولیه در تخمین پایداری دیواره چاه به علت فشار شکست سازند است.

روابط تجربی مختلفی به منظور تخمین مقاومت تراکمی تک محوری از داده‌های نمودارهای درون چاهی وجود دارد که در اغلب آنها از زمان‌گذر الاستیک سنگ، مدول‌های برشی و یانگ، تخلخل و سایر خواص سنگ استفاده می‌شود. غالب این روابط از آزمایشات نمونه‌های سنگی استخراج شده از حفاری‌های مهندسی (تونل، سد و ...) و همچنین مغزه‌های دریافتی از چاه‌های نفتی و مقایسه آنها با زمان‌گذر الاستیک سنگ استخراج می‌شوند.

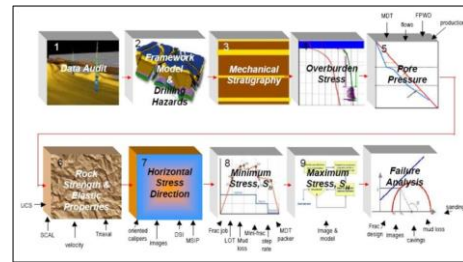
۲.۲.۳. مقاومت کششی

مقاومت کششی سنگ عبارت از تاب‌آوری نمونه سنگی در برابر کشش می‌باشد. معمولاً در مواردی که دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی نباشد، مقاومت کششی به عنوان کسری از مقاومت تراکمی تک محوری در نظر گرفته می‌شود. در مقایسه با UCS، مقاومت کششی بسیار کم است و معمولاً در محدوده ۱/۱۲ تا ۱/۸ UCS است. استحکام کششی در این مطالعه ۱/۱۰ UCS برآورد شد. علاوه بر آن زاویه اصطکاک با استفاده از داده‌های نمودار پرتو گامای موجود محاسبه گردید.

۲.۲.۳. نسبت پواسون

نسبت کرنش جانبی (عرضی) به کرنش محوری (طولی) ضریب پواسون یا نسبت پواسون نام دارد. در این مطالعه برای تبدیل نسبت پواسون دینامیک به نسبت پواسون استاتیکی از معادله (۵) استفاده شده است:

$$\text{Static Poisson's Ratio} = C_1 \times \text{Dynamic Poisson's Ratio} + C_2 \quad (5)$$



شکل ۱: فلوجارت مراحل ساخت یک مدل ژئومکانیکی

از یک مدل ژئومکانیکی می‌توان به منظور پیش‌بینی و تخمین بهترین روش ایمن در حفاری و تکمیل یک چاه و همچنین توسعه یک میدان استفاده کرد. علیرغم محدودیت یا نقص داده‌ها در بعضی مطالعات ژئومکانیکی، داده‌های زیادی به منظور ساخت و کالیبره یک مدل ژئومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱.۳. تعیین خواص الاستیک دینامیک سنگ

تعیین خواص الاستیک سنگ به عنوان پارامتر ورودی در تخمین مقاومت سنگ و تنش‌های برجا ضروری است. در این مطالعه خواص مکانیکی دینامیکی سنگ با استفاده از نمودارهای صوتی و چگالی استخراج شدند. این پارامترها را می‌توان پس از استخراج با اطلاعات موجود کالیبره کرد. با فرض وجود ایزوتروپی الاستیک و با استفاده از داده‌های نمودار کندی فشاری و برشی همراه با نمودار چگالی، خواص الاستیک دینامیکی با توجه به معادلات (۱) تا (۵) محاسبه شد [17]:

$$G_{dyn} = (13474.45) \frac{\rho_b}{(\Delta t_s)^2} \quad (1)$$

$$K_{dyn} = (13474.45) \rho_b \left[\frac{1}{(\Delta t_c)^2} \right] - \frac{4}{3} G_{dyn} \quad (2)$$

$$E_{dyn} = \frac{9 \times G_{dyn} \times K_{dyn}}{G_{dyn} + 3 \times K_{dyn}} \quad (3)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2} (\Delta t_s / \Delta t_c)^2 - 1}{(\Delta t_s / \Delta t_c)^2 - 1} \quad (4)$$

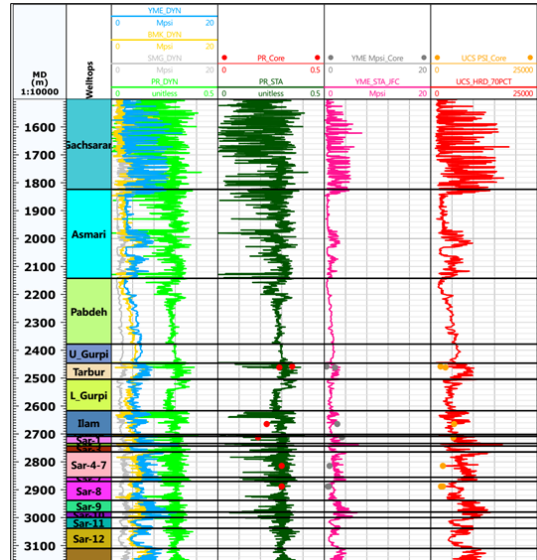
که در آن G_{dyn} مدول برشی دینامیکی برحسب $Mpsi$ ، K_{dyn} مدول حجمی دینامیکی برحسب $Mpsi$ ، E_{dyn} مدول دینامیکی یانگ برحسب $Mpsi$ ، ضریب دینامیکی پواسون و ρ_b دانسیته سنگ برحسب SG است. Δt_s و Δt_c نیز به ترتیب کندی برشی و کندی فشاری (بر حسب $\mu s/ft$)

که در آن $C1 = 0.8$ و $C2 = 0$ می‌باشد. شکل ۲ خواص مکانیکی سنگ در چاه A را نشان می‌دهد.

الکتریکی مقدار فشار منفذی را محاسبه می‌کند. معادله (۶) نحوه محاسبه فشار حفرات با استفاده از رابطه ایتون و نمودار مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد.

$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{p,n}) \left(\frac{R_a}{R_n} \right)^{1.2} \quad (6)$$

در رابطه بالا P_{ob} فشار روباره، $P_{p,n}$ فشار منفذی در حالت نرمال، R_a مقاومت الکتریکی مشاهده شده و R_n مقاومت الکتریکی در حالت نرمال می‌باشد. در مرحله بعد در سنگ‌شناسی‌های دیگر با استفاده از تعریف درون‌یابی خطی، چگالی ثابت سیال، شیب ثابت سیال برای سنگ‌های مورد نظر، می‌توان فشار منفذی را محاسبه نمود. داده‌های فشار منفذی باید به گونه‌ای باشد که با افزایش عمق، فشار منفذی افزایش یابد. در پایان می‌توان با استفاده از داده‌های MDT ، داده‌های بدست آمده را اعتبارسنجی نمود. شکل ۳ پروفایل فشار منفذی چاه‌های A، B، و C را همراه با داده‌های MDT در نشان می‌دهد.

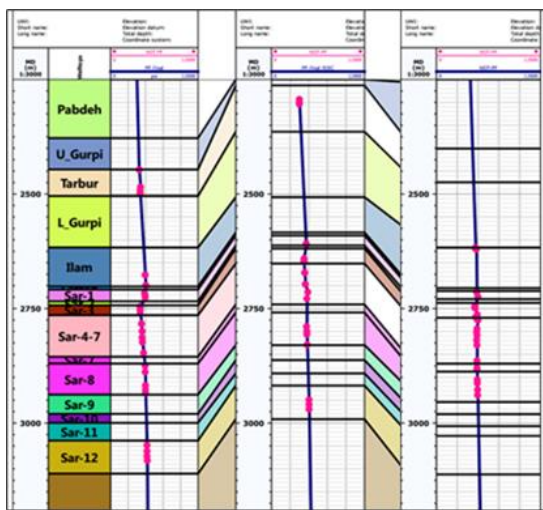


شکل ۲: خواص الاستیک و مقاومتی چاه A

۴.۲.۳. تعیین فشار منفذی

به طور معمول، برای پیش‌بینی فشار منفذی دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد؛ روش‌های مستقیم به روش‌هایی مانند آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار درون چاهی مثل MDT ، RFT ، XPT و DST گفته می‌شود که فشار منفذی را به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کنند. در روش غیرمستقیم با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی، میزان انحراف این ویژگی‌ها از حالت نرمال، اندازه‌گیری می‌شود و ارتباط این انحراف با تغییرات فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر داده‌های فشار منفذی در چاه دیگری موجود باشد، با فرض گستردگی یکنواخت فشار منفذی در مخزن می‌توان از گرادیان فرض شده در یک چاه، آن را برای دیگر چاه‌های میدان نیز استفاده نمود. در صورتی که سازند فروفشار و یا فرافشار موجود نباشد، با توجه به روند نرمال فشردگی، که مواد با توجه به افزایش عمق به صورت خطی فشرده می‌شوند، می‌توان فشار منفذی سازند مورد نظر را محاسبه نمود، در غیر این صورت، در اولین گام باید شیل را از دیگر رخساره‌ها جدا نمود. سپس برای شیل‌های تحت فشار می‌توان از فشار منفذی فرافشار معادله ایتون استفاده نمود. این معادله با استفاده از نمودارهای زمان رسیدن امواج صوتی، مقاومت و یا رسانایی



شکل ۳: پروفایل فشار منفذی چاه‌های A، B، و C

۴. تخمین مقادیر تنش‌ها

۴.۱. تعیین تنش‌های برجا (فشار روباره)

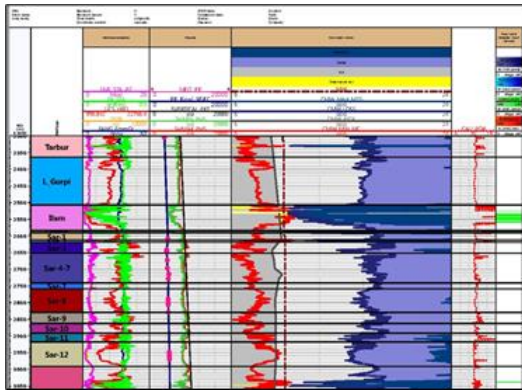
تنش روباره، وزن مواد زمین در عمق معینی از زیر سطح زمین است. چگالی هر قسمت از سازند را می‌توان با استفاده از نمودارهای درون چاهی بدست آورد. همچنین می‌توان مقدار تنش حاصله از طبقات فوقانی (σ_v) را با استفاده از

$$\frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \alpha p_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad (9)$$

در این روابط ν ضریب پواسون α ضریب بایوت، E مدول یانگ، p_p فشار منفذی و ε_x و ε_y به ترتیب کرنش متناظر با تنش افقی حداقل و حداکثر است.

پس از بدست آوردن تمام پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، نمودار این پارامترها در نرم افزار *TechLog* رسم گردید. شکل ۴ پارامترهای بدست آمده تحت عنوان مدل یک بعدی ژئومکانیکی چاه A را نشان می دهد.



شکل ۴: مدل یک بعدی ژئومکانیکی چاه A

۵. پیش پردازش داده‌ها و ایجاد بانک اطلاعاتی

پیش پردازش داده‌ها و ایجاد بانک اطلاعاتی یک فرایند مهم در علوم داده و مهندسی داده می باشد. این فرایند شامل مراحل مختلفی مانند جمع آوری، تمیز کردن، تبدیل و ذخیره سازی داده‌ها است. در مرحله اول، داده‌ها از منابع مختلف مانند جمع آوری می شوند. سپس این داده‌ها باید تمیز شده تا از داده‌های ناقص، تکراری و ناهمگن پاک گردند. در واقع پیش پردازش داده یک تکنیک داده کاوی است که داده‌های خام را به فرمی قابل فهم تبدیل می کند. داده‌های ورودی باید به گونه‌ای باشد که بتوان به خوبی روش‌های داده کاوی را روی آنها اعمال کرد []. متأسفانه داده‌های برداشت شده در دنیای واقعی دارای عوامل منفی مانند نویز، ناپیوستگی و داده‌های گم شده می باشند؛ بنابراین استفاده از این داده‌ها به دلیل کیفیت پایین، منجر به عملکرد نامناسب

انتگرال چگالی حجمی سازند (ρ_b) از سطح زمین تا عمق نهایی حفاری محاسبه کرد (معادله (۷)).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho_b(Z) \cdot g \cdot dz \quad (7)$$

که σ_v تنش روباره، ρ_b چگالی سازند است و g ثابت گرانشی است. البته این رابطه برای چاه‌های حفر شده در میدان‌های خشکی می باشد و برای مناطق دریایی بایست وزن آب را نیز در نظر گرفت. در دسترس نبودن داده‌های برای برخی سازندها و همچنین کیفیت پایین نمودار چگالی می تواند تنش روباره محاسبه شده را تحت تاثیر قرار دهد.

تنش برجای قائم (σ_v) یک پارامتر تاثیرگذار در مطالعات ژئومکانیک چاه می باشد. معادله (۷) مقدار تنش قائم تا عمق مورد نظر را محاسبه می کند. از آنجایی که معمولاً نمودار دانسیته فقط از بخش مخزنی چاه برداشت می شود، به منظور محاسبه مقادیر چگالی سازند در فواصل بدون داده، با توجه به نوع سنگ شناسی مقادیر دانسیته آنها در نظر گرفته می شود.

در ژئومکانیک، تعیین دقیق مقادیر تنش‌های برجای اصلی کار ساده‌ای نیست و این تنش‌ها معمولاً یا با مدل سازی و یا با اندازه گیری تغییر حالت‌ها و تغییر شکل‌ها، فشارها و... تخمین زده می شوند. مقدار تنش افقی کمینه (σ_h) را می توان به روش‌های متفاوتی مثل آزمایش نشت، شکست هیدرولیکی، آزمایش شکافتگی کوچک و بزرگ به صورت مستقیم اندازه گیری کرد [18]. اما هنوز روشی برای اندازه گیری تنش افقی بیشینه (σ_H) وجود ندارد. روش غیر مستقیم اندازه گیری مقادیر تنش افقی بر پایه مبانی الاستیسیته منفذی استوار است. در میدان‌هایی که از نظر تکتونیکی فعال اند تنش‌ها و کرنش‌ها از حرکات صفحات تکتونیکی ناشی می شود. اگر کرنش‌های تکتونیکی بر سازند سنگی اعمال گردد، این کرنش‌ها یک مؤلفه تنش در سنگ الاستیک اضافه می نماید. مدل پوروالاستیک کرنش افقی از کرنش‌های تکتونیکی استفاده نموده و تنش‌های افقی را محاسبه می نماید [19]. در این مطالعه از روابط معادله (۸) و (۹) مدل پوروالاستیسیته کرنش افقی برای تخمین تنش‌های افقی بیشینه و کمینه استفاده شد.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \alpha p_p + \quad (8)$$

درشت مقیاس‌سازی شده و به یک متر افزایش پیدا کرد. داده‌های حاصل از حفاری دارای مقیاس متفاوت بود که با ریز مقیاس و درشت مقیاس کردن آنها، تمام داده‌ها از نظر مقیاس همسان‌سازی گردید.

۲.۵. ایجاد پایگاه داده ها

برای تحلیل بیشتر داده‌ها پایگاه داده‌ها تشکیل شد. با ایجاد این پایگاه، بررسی و ارزیابی پارامترهای مرتبط با قابلیت حفاری ساده می‌گردد. در آماده‌سازی داده‌ها با سه دسته از داده شامل داده‌های عملیاتی، پتروفیزیکی و ویژگی‌های سنگ سروکار داریم. جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه را به تفکیک نوع منبع داده، نمایش می‌دهد.

جدول ۱. داده های مورد استفاده در این مطالعه به تفکیک نوع

منبع داده	
پارامترها (علامت اختصاری)	منابع داده ها
عمق (<i>Depth</i>)، چگالی سیال حفاری (<i>MW</i>)،	داده‌ها
وزن روی مته (<i>WOB</i>)، سرعت دوران (<i>RPM</i>)،	عملیاتی
اندازه قطر مته (<i>BS</i>)، نرخ نفوذ (<i>ROP</i>)،	
گرانروی (<i>VIS</i>)، گشتاور (<i>TORQUE</i>) و...	
پرتو گاما (<i>GR</i>)، تخلخل (<i>NPPI</i>)، چگالی	نگارهای
<i>RHOB</i>)، کندی موج فشاری (<i>DTC</i>) و برشی	پتروفیزیک
(<i>DTS</i>)، محتوای رس (<i>Vsh</i>)	
مقاومت فشاری تک محوره (<i>UCS</i>)، مقاومت	داده‌های
کششی (<i>TS</i>)، مدول یانگ (<i>E</i>)، زاویه	ویژگی‌های
اصطکاک داخلی (ϕ) ضریب پواسون (<i>U</i>)،	سنگ
مدول برشی (<i>G</i>)، مدول بالک (<i>K</i>)، فشار	
منفذی (<i>PP</i>)	

۳.۵. بررسی و حذف داده‌های پرت

مهم‌ترین مفروضه‌های اجرای بسیاری از آزمون‌های پارامتریک، نداشتن داده‌های پرت است. برای همین شناسایی و تصمیم‌گیری در مورد این داده‌ها بسیار اهمیت دارد. در واقع، داده پرت یا داده دورافتاده به آن دسته از داده‌ها گفته می‌شود، که فاصله زیادی با دیگر داده‌های تحقیق داشته باشد، در اصل داده دورافتاده مقادیری است که نسبت به میانگین کل داده‌ها فاصله زیادی دارد. از علل ایجاد داده‌های پرت می‌توان به اشتباه در طراحی مقیاس اندازه‌گیری (خطای اندازه‌گیری یا خطای ابزار) یا اشتباه در وارد کردن داده‌ها (خطای پژوهشگر)

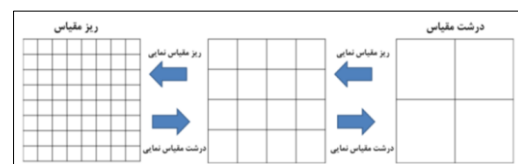
مدل تخمین‌گر و نتایج ضعیف و دور از واقعیت خواهد شد. روش‌های پیش‌پردازش داده شامل مراحل مختلفی است که برای آماده‌سازی داده‌ها و کاربرد آماری استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل موارد زیر می‌شود:

پاکسازی داده: حذف داده‌های تکراری، داده‌های نامتعارف یا داده‌هایی که از اهمیت کمی برخوردارند.

پر کردن مقادیر گم‌شده: استفاده از روش‌هایی برای تخمین مقادیر گم‌شده در داده‌ها مانند میانگین یا مد مقادیر مشابه. سرانجام، داده‌ها باید در یک بانک اطلاعاتی ذخیره شده تا بتوانند به راحتی جستجو، بازیابی و تحلیل شوند. با داشتن یک بانک اطلاعاتی مناسب، می‌توان به راحتی از داده‌ها برای تحلیل، گزارش‌گیری، پیش‌بینی و اتخاذ تصمیمات استراتژیک استفاده کرد.

۱.۵. همسان سازی مقیاس داده‌ها

داده‌های اصلی این مطالعه شامل نگاره‌های پتروفیزیکی، داده‌های عملیاتی و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ است. یکی از مشکلات اصلی این داده‌ها، عدم همسانی مقیاس آن‌هاست. به عبارت دیگر، فواصل اندازه‌گیری یک ویژگی، در طول چاه متفاوت است. به عنوان مثال، مقیاس‌بندی اندازه‌گیری نگاره‌های پتروفیزیکی در چاه‌های مورد مطالعه ۰.۱۵۲۴ متر است در حالی که مقیاس‌بندی داده‌های عملیاتی در حد متر و چند متر می‌باشد. مقیاس‌بندی بر این موضوع تمرکز دارد که چه اتفاقی بر روی ویژگی‌های یک شی می‌افتد زمانی که مقیاس (اندازه یا بعد) آن تغییر می‌کند [20]. به طور کلی دو روش مقیاس‌بندی وجود دارد: مقیاس‌بندی درشت مقیاس‌نمایی و مقیاس‌بندی ریز مقیاس‌نمایی که در شکل ۵ مفهوم‌های مقیاس‌بندی درشت مقیاس‌نمایی و مقیاس‌بندی ریز مقیاس‌نمایی نشان داده شده است.



شکل ۵: نمایش از درشت مقیاس‌نمایی و ریز مقیاس‌نمایی

تمام داده‌های نگاره‌های پتروفیزیکی در این مطالعه در مقیاس ۰.۱۵۲۴ متر بود که به روش‌های متوسط‌گیری این داده‌ها

$$i=1, 2, \dots, n$$

سه پیش فرض مهم برای انجام رگرسیون خطی چندگانه می بایست رعایت گردد.

نخست توزیع مقادیر خطا (مانده‌ها) باید دارای توزیع نرمال باشند. این بدان معنی است که اگر مقادیر واقعی را در مدل رگرسیونی قرار داده و مقادیر پیش‌بینی را بدست آوریم، اختلاف مقادیر واقعی و پیش‌بینی باید دارای توزیع نرمال باشد.

پیش فرض دوم آن است که می‌بایست عدم خودهمبستگی سریالی مانده‌ها وجود داشته باشد. خودهمبستگی سریالی مانده‌های رگرسیون به این معنا است که مقدار حال حاضر یک متغیر وابسته در یک مدل رگرسیون به مقادیر گذشته‌تر خودش وابسته است. در کارهای رگرسیونی فرض می‌شود که خطاهای مشاهده شده دو به دو ناهمبسته هستند. به رابطه همبستگی یک متغیر با یک دوره قبل خود، خود همبستگی مرتبه اول گویند. خودهمبستگی سریالی رابطه بین متغیر داده شده با خود ولی با یک وقفه در فواصل زمانی مختلف می‌باشد. همبستگی سریالی (با یک وقفه) می‌تواند با ترسیم هر مانده به غیر از اولین مانده در برابر مانده‌ی قبل خود مورد بررسی قرار گیرد. نحوه سنجش پیش فرض خودهمبستگی سریالی از طریق آزمون دوربین - واتسون انجام می‌شود. در واقع این آزمون برای ارزیابی اینکه آیا یک سری زمانی خودهمبسته است یا خیر، به کار می‌رود. فرض صفر این آزمون، این است که سری زمانی خودهمبسته نیست و این یعنی داده‌ها مستقل از هم هستند. مقدار نزدیک به ۲ (بین ۱.۵ تا ۲.۵) نشان دهنده عدم خودهمبستگی مانده‌ها می‌باشد. در صورت وجود خودهمبستگی در خطاها دیگر نباید از روش رگرسیون‌های خطی استفاده شود.

پیش فرض سوم عدم وجود همبستگی زیاد بین متغیرهای مستقل یا عدم هم خطی می‌باشد. در واقع بیان می‌کند که متغیرهای مستقل نباید همبستگی (شباهت) زیادی با هم داشته باشند. به منظور بررسی عدم هم خطی متغیرهای مستقل، از شاخص VIF استفاده می‌شود. شاخص VIF به معنای ضریب تورم واریانس است که برای ارزیابی چندخطیت بین متغیرها در یک مدل رگرسیون استفاده می‌شود. مقدار VIF برای هر متغیر نشان‌دهنده این است که چه قدر واریانس آن متغیر به دلیل چندخطیت با سایر متغیرها افزایش یافته

است. مقادیر بالای VIF نشان دهنده وجود چندخطیت قوی بین متغیرها است که می‌تواند مشکلاتی برای تفسیر مدل رگرسیون ایجاد کند. معمولاً اگر VIF بیش از ۱۰ باشد، به عنوان نشانه‌ای از وجود چندخطیت قوی در مدل تلقی می‌شود. در صورتی که مقادیر VIF کمتر از ۵ باشد فرض عدم هم خطی متغیرهای مستقل برقرار است. مقادیر هم خطی بیشتر از ۵ نشان دهنده وجود هم خطی است.

به فرآیندی که با آن بتوان مناسب‌ترین مدل رگرسیون را هم از لحاظ دقت کافی و هم از لحاظ حداقل تعداد متغیرهای مستقل یافت، روش انجام رگرسیون می‌گوییم. برای یافتن مناسب‌ترین مدل رگرسیون خطی چندگانه روش‌های متعددی وجود دارد که چهار نوع از مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- روش ورودی (Enter)
- روش پیش‌رو (Forward)
- روش پس‌رو (Backward)
- روش گام به گام (Stepwise)

در روش ورودی تنها مدل رگرسیون یک گام دارد و در آن گام ورود همان متغیرهای پیشنهاد شده توسط محقق در معادله رگرسیون مدنظر است. در این روش هدف یافتن مدل نهایی نیست، بلکه محقق می‌خواهد وجود یک رابطه بین متغیرها را که طبق یک فرضیه مطرح شده است، تایید یا رد نماید. بنابراین این روش برای مطالعات تاییدی به کار می‌رود. روش پیش‌رو به این ترتیب طراحی شده است که ابتدا یک متغیر مستقل وارد معادله می‌شود. این متغیر باید بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته داشته باشد. آنگاه در مراحل بعد نیز هر بار تنها یک متغیر مستقل که همبستگی زیادی با متغیر وابسته دارد، به معادله اضافه می‌شود. این کار تا آنجا ادامه می‌یابد که متغیر مستقلی که روی متغیر وابسته تاثیر دارد، باقی نماند.

روش پس‌رو، عکس روش پیش‌رو است. یعنی در این روش ابتدا همه متغیرهای مستقل پیشنهاد شده توسط محقق در معادله در نظر گرفته شده و از یک معادله رگرسیون خطی چندگانه بهره‌برداری می‌شود. آنگاه برای دست یافتن به مدل مناسب، متغیرهایی که ضرورت ندارند، یکی یکی از مدل کنار گذاشته می‌شوند. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که متغیر مستقل غیرمهمی برای خروج از مدل باقی نماند. رگرسیون گام به گام ترکیب دو روش پیش‌رو و پس‌رو است.

مستقل بر متغیر "ROP"، از لحاظ آماری معنادار است.

جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون سازند گورپی

گام	متغیرهای مستقل	مدل	مجموع مجزورات آزادی	درجه آزادی	میانگین مجزورات	F	مقدار معناداری
۱	VIS	رگرسیون	۱۰۷۳۱۴۸۳	۱	۱۰۷۳۱۴۸۳	۲۷۷۳۴۲	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۲۶۸۵۵۶۱۳	۱۱۹۹	۲۲۱۴۸۲		
۲	VIS, TORQUE	رگرسیون	۱۳۸۱۲۱۶۶۱	۲	۶۹۰۶۳۸۱	۲۴۶۱۵۵۸	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۲۲۸۷۴۳۳۵	۱۱۹۸	۱۹۱۹۲۸		
۳	VIS, TORQUE, PP	رگرسیون	۱۷۲۴۶۳۱۵	۳	۵۷۴۸۷۷۲	۲۳۶۱۶۵۵	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۲۰۴۴۰۷۸۲	۱۱۹۷	۱۷۰۱۰۷۷		
۴	VIS, TORQUE, PP, Standpipe	رگرسیون	۲۰۸۲۳۲۵۱	۴	۵۲۰۶۸۱۳	۳۶۹۱۳۶	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۱۶۸۵۹۱۸۴۶	۱۱۹۶	۱۴۰۹۷		
۵	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ	رگرسیون	۲۲۴۷۲۱۹۶	۵	۴۴۹۴۱۵۹	۳۵۲۱۰۰۴	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۱۵۲۱۴۱۸	۱۱۹۵	۱۲۱۷۳۲		
۶	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ , TSTR	رگرسیون	۲۳۲۴۶۵۲	۶	۳۹۵۴۴۲	۳۳۸۱۲۰۸	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۱۳۶۰۱۵۷۶	۱۱۹۴	۱۱۱۶۹۲		
۷	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ , TSTR, MW	رگرسیون	۲۴۰۹۵۰۲۸	۷	۳۳۱۹۰۲۹	۳۰۵۱۷	۰/۰۰۰
		باقیمانده کل	۱۳۵۷۷۳۴۱	۱۱۹۳	۱۱۱۴۶۴		

جدول ۴ اطلاعات مربوط به ضرایب تاثیر رگرسیونی و همچنین ضرایب استاندارد رگرسیونی و اطلاعات مربوط به معناداری این ضرایب را در سازند گورپی نشان می‌دهد. دقت در ضریب تاثیر رگرسیونی مربوط به متغیرهای VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ , TSTR و MW مقدار معناداری ضریب t مربوط به این متغیرها نشان از تاثیر معنادار این متغیر بر "ROP" دارد.

۷. رگرسیون غیرخطی چند متغیره

رگرسیون غیرخطی یک روش آماری است که جهت انطباق توابع غیر خطی تصادفی بر روی داده‌های گردآوری شده استفاده می‌شود. هدف این روش، برازش تصادفی یکی از توابع بیست‌گانه موجود بر روی داده‌های گردآوری شده جهت رسیدن به حداکثر مقدار ضریب تعیین است. پس از تعیین تابع هدف، با جستجو و از سرگیری‌های متفاوت این تابع تصادفی بر روی روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته برای یافتن بهترین ترکیب بسط داده می‌شود.

با استفاده از رگرسیون چند متغیره می‌توان رابطه خطی موجود بین مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل با یک متغیر وابسته را به شیوه‌ای مطالعه نمود که در آن، روابط موجود فی‌مابین متغیرهای مستقل نیز مورد ملاحظه قرار گیرد. وظیفه رگرسیون این است که به تبیین واریانس متغیر وابسته کمک کند. این وظیفه تا حدودی از طریق برآورد مشارکت متغیرها (دو یا چند متغیر مستقل) در این واریانس به انجام می‌رسند. تحلیل رگرسیون چند متغیره برای مطالعه تأثیرات

به این ترتیب که در این روش ابتدا یک متغیر مستقل (متغیری که همبستگی زیادی با متغیر وابسته دارد) وارد مدل شده و ضرورت آن برای باقی ماندن در مدل بررسی می‌شود. سپس متغیر دوم وارد شده و ضرورت حذف آن نیز بررسی می‌گردد. این کار تا آنجا ادامه می‌یابد که هیچ متغیر مستقلی شرط ورود به مدل و خروج از آن را نداشته باشد.

برای داده‌های پژوهش مورد نظر، با استفاده از رگرسیون گام به گام، قدرت پیش‌بینی "ROP" توسط متغیرهای مستقل، مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ نتایج خلاصه مدل رگرسیونی، جدول ۳ نتایج تحلیل رگرسیون و جدول ۴ ضرایب تاثیر و ضرایب استاندارد رگرسیونی برای سازند گورپی آورده شده است. چنانچه نتایج تحلیل واریانس مربوط به مدل رگرسیون معناداری اثرات ترکیبی و خطی متغیرهای مستقل را نشان دهد، بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثرات ترکیبی و خطی متغیرهای مستقل بر متغیر "ROP"، از لحاظ آماری معنادار است. چنانچه مقدار معناداری متناظر با ضرایب رگرسیونی برای هر یک از متغیرهای مستقل کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد فرضیه صفر رد شده و متغیرهای مستقل، "ROP" را پیش‌بینی می‌کنند.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد در گام ۷، بر اساس مقدار ضریب تعیین مدل (۰/۶۳۱)، متغیرهای مستقل حدود ۶۳ درصد از تغییرات متغیر وابسته "ROP" را تبیین کردند.

جدول ۲. خلاصه مدل رگرسیونی سازند گورپی

گام	متغیرهای مستقل	ضریب همبستگی چندگانه	ضریب تعیین	ضریب تعیین خطای	معیار تخمین
۱	VIS	۰.۵۳۴	۰.۲۸۵	۰.۲۸۴	۴.۷۴۱
۲	VIS, TORQUE	۰.۶۰۵	۰.۳۶۷	۰.۳۶۵	۴.۴۶۴
۳	VIS, TORQUE, PP	۰.۶۷۶	۰.۴۵۸	۰.۴۵۶	۴.۱۳۲
۴	VIS, TORQUE, PP, Standpipe	۰.۷۴۳	۰.۵۵۳	۰.۵۵۱	۳.۷۵۵
۵	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ	۰.۷۷۲	۰.۵۹۶	۰.۵۹۵	۳.۵۶۸
۶	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ , TSTR	۰.۷۹۳	۰.۶۳۰	۰.۶۲۸	۳.۴۱۹
۷	VIS, TORQUE, PP, Standpipe, ϕ , TSTR, MW	۰.۷۹۴	۰.۶۳۱	۰.۶۲۹	۳.۴۱۳

نتایج تحلیل واریانس مربوط به مدل رگرسیون در جدول ۳ معناداری اثرات ترکیبی و خطی متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. بر این اساس، در گام ۷، مقدار معنی‌داری آزمون مربوطه یعنی F برابر ۰/۰۰۰ و کوچکتر از ۰/۰۵ می‌باشد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثرات ترکیبی و خطی متغیرهای

۸. تاثیر متغیرهای مستقل بر نرخ نفوذ

VIS (گرانروی گل حفاری) نقش مهمی در نرخ نفوذ مته دارد، زیرا علاوه بر انتقال کنده‌های حفاری به سطح، بر خنک‌کاری مته، و پایداری دیواره چاه تأثیر می‌گذارد. گرانروی بالا می‌تواند باعث کندی انتقال کنده‌ها و کاهش نرخ نفوذ شود، در حالی که گرانروی پایین ممکن است به ناپایداری چاه و ورود سیالات ناخواسته منجر شود.

گشتاور مته ($Torque$) و نرخ نفوذ مته رابطه‌ای مستقیم و وابسته به شرایط حفاری دارند. گشتاور، نیروی پیچشی اعمال‌شده به مته است که موجب چرخش آن و برش سنگ‌ها می‌شود. افزایش گشتاور معمولاً منجر به نرخ نفوذ بالاتر می‌شود، زیرا نیروی بیشتری برای شکستن و خرد کردن سنگ‌ها به کار گرفته می‌شود. با این حال، اگر گشتاور بیش از حد باشد، می‌تواند باعث آسیب به مته یا سیستم حفاری شود.

فشار منفذی ($Pore Pressure$) تأثیر مستقیمی بر نرخ نفوذ مته دارد، زیرا بر پایداری سنگ‌ها و توانایی برش آنها توسط مته اثر می‌گذارد. فشار منفذی بالا در سنگ‌ها می‌تواند موجب کاهش مقاومت آنها و تسهیل در خرد شدن شود، که به افزایش نرخ نفوذ منجر می‌شود.

سنگ‌های با زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بالاتر مقاومت بیشتری در برابر برش و خرد شدن دارند، بنابراین مته برای نفوذ در آنها به نیروی بیشتری نیاز دارد و نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، سنگ‌هایی با زاویه اصطکاک داخلی کمتر، معمولاً ضعیف‌تر بوده و مته به راحتی در آنها نفوذ می‌کند، که به نرخ نفوذ بالاتر منجر می‌شود.

مقاومت کششی ($Tensile Strength$) سنگ‌ها به عنوان معیاری از میزان نیروی لازم برای شکستن سنگ تحت کشش، تأثیر مستقیمی بر نرخ نفوذ مته دارد. سنگ‌هایی با مقاومت کششی بالا نیازمند نیروی بیشتری برای ایجاد ترک‌های اولیه هستند، بنابراین مته با سختی بیشتری در آنها نفوذ کرده و نرخ نفوذ کاهش می‌یابد.

وزن گل حفاری (MW) بر پایداری چاه، فشار هیدرواستاتیک، و پاکسازی کنده‌های حفاری تأثیر می‌گذارد. وزن گل بالاتر فشار بیشتری بر دیواره چاه اعمال می‌کند و می‌تواند از ریزش چاه یا ورود سیالات به داخل چاه جلوگیری کند، اما در عین حال ممکن است باعث افزایش نیروی مقاومت هیدرواستاتیک

چند متغیر مستقل در متغیر وابسته کاملاً مناسب است. در رگرسیون چند متغیره، مقادیر یک متغیر (متغیر وابسته یا Y) از روی مقادیر دو یا چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_k) برآورد می‌شود.

جدول ۴. ضرایب تاثیر و ضرایب استاندارد رگرسیونی

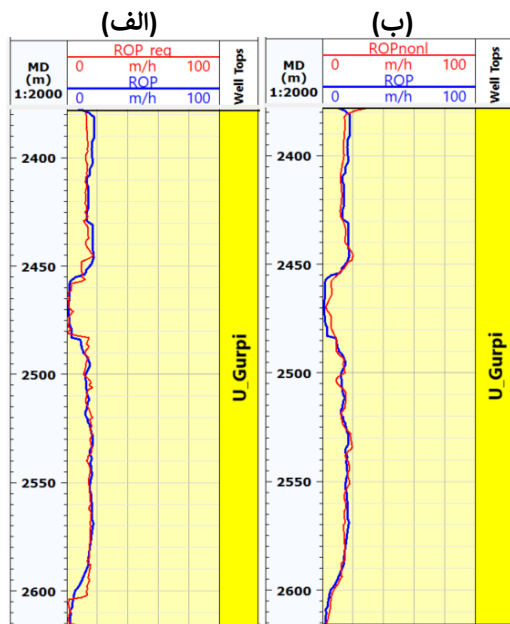
گام	نام متغیر	ضرایب تاثیر استاندارد شده خطای معیار	ضرایب تاثیر استاندارد شده	Beta	t	مقدار معناداری	مقدار بررسی همخطی چندگانه	VIF
۱	مقدار ثابت	۶۹/۶۱۸	۱/۷۵۶	-	-	۲۹/۵۵۱	-	-
	VIS	-۱/۸۳۳	-۱/۲۹	--۱۵۳۴	-	-۱۱/۸۳۸	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
	مقدار ثابت	۳/۵۴۴	۲/۰۹۸	-	-	۱۴/۵۵۶	-	-
۲	VIS	-۱/۶۱۱	-۱/۲۱	--۱۳۸۷	-	-۱۴/۶۲۲	۱/۷۹۱	۱/۴۶۶
	TORQUE	۱/۳۵۴	۱/۰۱	-۱۳۳۱	-	۱۲/۴۳۴	۱/۷۹۱	۱/۴۶۶
	مقدار ثابت	۲/۱۴۷	۲/۰۴۵	-	-	۱۰/۵۱۴	-	-
۳	VIS	-۱/۱۲۹	-۱/۳۸	--۱۶۲۱	-	-۱۴/۶۶۶	۱/۴۹۳	۲/۰۲۹
	TORQUE	۱/۳۶۶	۱/۰۹۴	-۱۳۵	-	۱۴/۵۶۷	۱/۷۹۶	۱/۴۶۶
	PP	-۱/۰۰۷	-۱/۰۱	-۱۴۱	-	۱۴/۱۸	۱/۵۴۱	۱/۸۲۹
۴	مقدار ثابت	۱/۰۳۳	۱/۹۸۸	-	-	۵/۱۳۷	-	-
	VIS	-۱/۱۵۹	-۱/۳۳	--۱۷۳۳	-	-۱۴/۱۵۹	۱/۱	۲/۱
	TORQUE	۱/۳۳۳	۱/۰۵۵	-۱۳۶۷	-	۱۶/۸۱۹	۱/۷۸۴	۱/۴۶۶
۵	PP	-۱/۰۰۹	-۱/۰۰۹	-۱۵۰۹	-	۱۸/۸۲۶	۱/۵۱۲	۱/۹۵۲
	Standpipe	-۱/۰۰۴	-۱/۰۰۴	-۱۳۱۸	-	۱۵/۹۳۸	۱/۴۹۱	۱/۰۶۲
	مقدار ثابت	۳/۹۵۸	۳/۲۰۱	-	-	۱۴/۳۶۶	-	-
۶	VIS	-۱/۱۸۷	-۱/۳۲	--۱۷۵۱	-	-۱۴/۱۸۷	۱/۱۰۷	۲/۱۰۷
	TORQUE	۱/۳۳۳	۱/۰۸۱	-۱۳۶۹	-	۱۷/۷۸۲	۱/۷۸۲	۱/۴۶۶
	PP	-۱/۰۰۵	-۱/۰۰۱	-۱۴۹۵	-	۹/۳۵۹	۱/۳۳۳	۲/۰۰۴
۷	Standpipe	-۱/۰۰۵	-۱/۰۰۰	-۱۴	-	۱۸/۷۳	۱/۸۲	۱/۲۱۹
	ϕ	-۱/۴۶۷	-۱/۲۱	--۱۳۳۶	-	-۱۱/۴۶۷	۱/۴۱۲	۱/۲۸۸
	مقدار ثابت	۴۴/۰۱۹	۲/۰۹۷	-	-	۱۴/۱۱۲	-	-
۸	VIS	-۱/۱۷۸	-۱/۴۵	--۱۷۴۵	-	-۱۴/۱۷۸	۱/۴۴	۲/۱۰۸
	TORQUE	۱/۳۳۳	۱/۰۷۸	-۱۳۶۲	-	۱۸/۳۳۳	۱/۷۸۳	۱/۴۶۶
	PP	-۱/۰۰۴	-۱/۰۰۱	-۱۴۵۱	-	۸/۱۳۷	۱/۳۳۳	۲/۰۶۱
۹	Standpipe	-۱/۰۰۶	-۱/۰۰۰	-۱۴۵۴	-	۲۳/۵۶۴	۱/۶۶۶	۱/۳۰۶
	ϕ	-۱/۶۰۸	-۱/۴۲	--۱۴۳۳	-	-۱۴/۵۶۴	۱/۴۶۸	۲/۱۱۵
	TSTR	-۱/۰۰۱	-۱/۰۰۰	-۱۹۸	-	۱/۰۳۵۷	۱/۵۵۲	۱/۱۷۳
۱۰	مقدار ثابت	۶/۵۶۱	۴/۲۰۲	-	-	۱۴/۴۱۱	-	-
	VIS	-۱/۱۴۱	-۱/۰۴	--۱۷۳۳	-	-۱۴/۱۴۱	۱/۶۶۲	۱/۴۶۶
	TORQUE	۱/۳۳۳	۱/۰۷۹	-۱۳۳۷	-	۱۶/۷۰۳	۱/۷۴۳	۱/۴۶۶
۱۱	PP	-۱/۰۰۴	-۱/۰۰۱	-۱۴۵	-	۸/۰۶۴	۱/۳۶	۲/۰۶۵
	Standpipe	-۱/۰۰۶	-۱/۰۰۰	-۱۴۹	-	۲۳/۵۶۳	۱/۳	۱/۳۷
	ϕ	-۱/۶۰۶	-۱/۴۱	--۱۴۳۳	-	-۱۴/۶۰۶	۱/۴۶۸	۲/۱۱۶
۱۲	TSTR	-۱/۰۰۱	-۱/۰۰۰	-۱۳۱۶	-	۱۱/۳۱۹	۱/۸۲۷	۱/۲۰۹
	MW	-۱/۲۲۸	۱/۲۶	--۱۱۱۱	-	-۵/۲۲۶	۱/۸۰۷	۱/۳۳۹

اولین مرحله در اجرای رگرسیون غیرخطی، انتخاب مدل مناسب است. این انتخاب بر اساس دانش اولیه از ماهیت مسئله و داده‌ها صورت می‌گیرد. انتخاب مدل صحیح اهمیت زیادی دارد، زیرا مدل نامناسب ممکن است نتایج گمراه‌کننده‌ای ارائه دهد. پس از انتخاب مدل مناسب، باید پارامترهای مدل تخمین زده شوند. در رگرسیون غیرخطی، بر خلاف رگرسیون خطی که پارامترها به‌طور مستقیم از معادله‌های خطی به دست می‌آیند، پارامترها به صورت تکراری و از طریق روش‌های بهینه‌سازی مانند روش نیوتون-رافسون یا الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی محاسبه می‌شوند. و در نهایت پس از تخمین پارامترها، باید مدل را ارزیابی کرد تا اطمینان حاصل شود که مدل به‌خوبی با داده‌ها سازگار است. بدین منظور با توجه به مطالب عنوان شده، نرخ نفوذ مته برای سازند گورپی به روش رگرسیون غیرخطی با کمک نرم افزار SPSS تخمین زده شد.

شده ROP_{reg} برابر با ۰/۷۹۴ و در سطح ۵ درصد معنادار است.

معدلات فوق جهت اعتبارسنجی در چاه شماره B قرار داده و نرخ نفوذ حاصل از رگرسیون خطی و غیرخطی (ROP_{reg} و ROP_{nonl}) با مقدار اندازه گیری شده در چاه مقایسه شد. همان طور که در شکل ۷ پیداست تقریباً نرخ نفوذ تخمین زده شده و مقدار اندازه گیری شده، در بسیار از فواصل همپوشانی مطلوبی دارد.

معادله پیشنهادی می تواند به عنوان ابزاری کارآمد در بهینه سازی عملیات حفاری در میدان مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از رگرسیون خطی چندگانه به ما این امکان را می دهد که با تحلیل دقیق تر داده ها، برنامه ریزی بهتری برای حفاری های آتی داشته باشیم.



شکل ۷: مقایسه نرخ نفوذ رگرسیون خطی (الف) و غیرخطی (ب) چند متغیره با مقدار واقعی در چاه B

فهرست نمادها

بر مته شود که نرخ نفوذ را کاهش می دهد. مدول یانگ (E) نشان دهنده سختی و مقاومت سنگ در برابر تغییر شکل الاستیک است. سنگ هایی با مدول یانگ بالا معمولاً سخت تر و مقاوم تر هستند و تحت بار مته کمتر تغییر شکل می دهند، بنابراین انرژی بیشتری برای شکست و نفوذ در آنها نیاز است و نرخ نفوذ کاهش می یابد. در مقابل، سنگ هایی با مدول یانگ پایین تر نرم تر هستند و مته راحت تر در آنها نفوذ می کند، که به نرخ نفوذ بالاتر منجر می شود. وزن روی مته (WOB) نیروی عمودی اعمال شده بر مته را تعیین می کند. افزایش وزن روی مته باعث فشار بیشتر مته بر سطح سنگ می شود و سرعت خرد شدن سنگ و در نتیجه نرخ نفوذ را افزایش می دهد. با این حال، اگر وزن روی مته بیش از حد باشد، ممکن است باعث آسیب به دندانهای مته، کاهش عمر تجهیزات، یا حتی گیر کردن مته شود. از سوی دیگر، وزن روی مته پایین تر از مقدار بهینه نمی تواند نیروی کافی برای شکست سنگ ایجاد کند و نرخ نفوذ را کاهش می دهد. تنظیم دقیق وزن روی مته با توجه به سختی سنگ، نوع مته، و شرایط حفاری برای دستیابی به عملکرد بهینه و جلوگیری از خرابی ضروری است.

۹. نتیجه گیری

هدف از ارائه این تحقیق تخمین نرخ حفاری بر مبنای پارامترهای حفاری، ژئومکانیکی و خصوصیات سنگ با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه بود. برای این منظور در نهایت با دخالت ۷ پارامتر مستقل برای رگرسیون خطی و ۵ پارامتر مستقل برای رگرسیون غیرخطی، متغیر وابسته ROP_{reg} معادله (۱۱) و ROP_{nonl} معادله (۱۲) برای سازند گورپی تخمین زده شد.

$$ROP_{reg} = 80.312 - 1.203VIS + 1.174TORQUE + 0.002PP + 0.006Standpipe - 0.751\phi + 0.001TSTR - 0.272MW \quad (11)$$

$$ROP_{nonl} = 40.6 + 2.31\phi^{0.5438} + 11.13v - 0.01173 e^{PP^{0.5}} - 29.257 \log E + WOB^{0.017826} \quad (12)$$

همچنین ضریب همبستگی میان مقادیر حقیقی و پیش بینی

[4] Moradi, H., Bahari, M.H., Bagher, M., Sistani, N., 2010. Drilling rate prediction using an innovative soft computing approach 5, 1583–1588.

[5] Bahari, A., Baradaran Seyed, A., 2007. Trust-region approach to find constants of Bourgoyne and Young penetration rate model in Khangiran Iranian gas field. In: Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers.

[6] Arabjamaloei, R., Shadizadeh, S., 2011. Modeling and Optimizing Rate of Penetration Using Intelligent Systems in an Iranian Southern Oil Field (Ahwaz Oil Field). Pet. Sci. Technol. 29, 1637–1648.

[7] Bataee, M., Mohseni, S., 2011. Application of Artificial Intelligent Systems in ROP Optimization: a Case Study in Shadegan Oil Field. Society of Petroleum Engineers, Muscat, Oman.

[8] Monazami, M., Hashemi, A., Shahbazian, M., 2012. Drilling rate of penetration prediction using artificial neural network: A case study of one of Iranian southern oil fields. J. Oil Gas Bus 6, 21–31.

[9] Amar, K., Ibrahim, A., 2012. Rate of Penetration Prediction and Optimization using Advances in Artificial Neural Networks, a Comparative Study. Proc. 4th Int. Jt. Conf. Comput. Intell 647–652.

[10] Akhlaghi, N., Rezaei, F., 2012. Estimated rate of penetration using artificial neural networks and optimize drilling parameters in directional wells in Ahvaz field. J. Chem. 1, 1–11.

[11] Jing Ning, Fan Honghai, Yinghu, Z., Liu Tianyu, 2013. A New Model of ROP Prediction for Drilling Engineering with Data Mining Technology. Int. J. Adv. Inf. Sci. Serv. Sci. 5, 597–604.

[12] Duan, J., Zhao, J., Xiao, L., Yang, C., Li, C., 2015. A ROP Optimization Approach Based on Improved BP Neural Network PSO. Adv. Swarm Comput. Intell. 9142, 185–193.

[13] Ansari, H.R., Sarbaz Hosseini, M.J., Amirpour, M., 2016. Drilling rate of penetration prediction through committee support vector regression based on imperialist competitive algorithm. Carbonates and Evaporites.

[14] Bezminabadi, S.N., Ramezanzadeh, A., Jalali, S.-M.E., Tokhmechi, B., Roustaei, A., 2017. Effect of Rock Properties on Rop Modeling Using Statistical and Intelligent Methods: A Case Study of an Oil Well in Southwest of Iran. Arch. Min. Sci. 62, 131–144.

[15] Anemangely, M. 2017, “Developing a New Rock Drillability Index for Oil and Gas Reservoirs Based on Drilling rate”.

جدول ۵. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
ROP	<i>m/hr</i>	نرخ نفوذ مته
RPM	<i>rpm</i>	دور مته
WOB	<i>ton</i>	وزن روی مته
Torque	<i>Klb*ft</i>	گشتاور مته
VIS	<i>cp</i>	گرانروی گل
MW	<i>pcf</i>	وزن گل
NPHI	%	تخلخل
ρ_b	<i>g/cm3</i>	چگالی
DTC	<i>μs/ft</i>	کندی موج فشاری
DTS	<i>μs/ft</i>	کندی موج برشی
G_{dyn}	<i>Mpsi</i>	مدول دینامیکی
K_{dyn}	<i>Mpsi</i>	مدول حجمی دینامیکی
E_{dyn}	<i>Mpsi</i>	مدول دینامیکی یانگ
θ_{dyn}		ضریب دینامیکی پواسون
ρ_b	<i>SG</i>	دانسیته سنگ
Δt_s	<i>μs/ft</i>	کندی موج فشاری
Δt_c	<i>μs/ft</i>	کندی موج برشی
P_{ob}	<i>psi</i>	فشار روباره
$P_{p,n}$	<i>psi</i>	فشار منفذی نرمال
R_n	<i>ohmm</i>	مقاومت الکتریکی نرمال
σ_v	<i>psi</i>	تنش روباره
g		ثابت گرانشی
σ_h	<i>psi</i>	تنش افقی کمینه
σ_H	<i>psi</i>	تنش افقی بیشینه
ν		ضریب پواسون
α		ضریب بایوت
ϵ_X		کرنش متناظر با تنش افقی
ϵ_Y		کرنش متناظر با تنش افقی
ϕ		زاویه اصطکاک داخلی

مراجع

[۱] عادل زاده، محمدرضا، (۱۳۸۵)، اصول مهندسی حفاری انتشارات ستایش.

[۲] درویش زاده، علی. (۱۳۸۰)، زمین شناسی ایران. مؤسسه انتشارات امیرکبیر؛ تهران.

[3] E. M. Galle, H. B. Woods. (1963). “Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits.” API Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute.

- [16] Wynd, J.G., 1965, Biofacies of the Iranian Oil Consortium agreement area: (IOOC) Report 1084, 86p., Tehran Unpublished.
- [17] Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., & Risnes R. (1992); Petroleum Related Rock Mechanics Developments in Petroleum Science, 33; Elsevier; 1992.
- [18] Abdideh, M., Fathabadi, M.R., 2013. Analysis of stress field and determination of safe mud window in borehole drilling (case study : SW Iran) 105–110
- [19] Blanton, T.L., Olson, J.E., 1997. Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers
- [20] Garcia, S., Luengo, J., Herrera, F., 2015. Data preprocessing in data mining. Springer.
- [20] Howard, N.K., 2005. Multiscale analysis of landscape data sets from northern Ghana: Wavelets and pattern metrics. Cuvillier Verlag.
- [21] Paul, R.K., 2006. Multicollinearity: Causes, effects and remedies. IASRI, New Delhi.
- [22] Jaccard, J., Turrisi, R., 2003. Interaction effects in multiple regression. Sage.
- [23] Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., 2015. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons.