



تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران

محمد انه منگلی^۱؛ احمد رمضان زاده^{۱*}؛ بهزاد تخمچی^۱؛ عبدالله ملقب^۲؛ آرام محمدیان^۲

۱. دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان

۲. شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، خوزستان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۱/۱۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2017.54591

واژگان کلیدی	چکیده
قابلیت حفاری سنگ پارامترهای ژئومکانیکی نرخ نفوذ مدل بورگوین و یانگ بهینه‌سازی	قابلیت حفاری سازند، سختی یا سهولت حفر آن سازند را بیان می‌کند. قابلیت حفاری هر سازند بایستی بر اساس ویژگی‌های آن سازند تعیین شود. این پارامتر، عاملی مهم در انتخاب روش حفاری و مته مناسب، پیش‌بینی نرخ حفاری و تعیین عمر مته است. با این وجود در بسیاری از مدل‌های نرخ نفوذ ارائه شده این پارامتر نادیده گرفته شده و یا کمتر به آن ارزش قائل شده است. بنابراین؛ با توجه نقش کمرنگ قابلیت حفاری سازند در مدل‌های نرخ نفوذ، در این مقاله تلاش شده است که به بررسی و تعیین مقدار قابلیت حفاری سازند در یکی از چاه‌های قائم واقع در میدان کرنج پرداخته شود. از آنجایی که در این مطالعه از داده‌های میدانی برای تعیین قابلیت حفاری سازند استفاده خواهد شد و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده ناشی از اثر همه پارامترهای عملیاتی و سازندی است. بنابراین برای تعیین قابلیت حفاری سازند نیاز است اثر پارامترهای عملیاتی از نرخ نفوذ حذف شود. برای نیل به این هدف، مدل بورگوین و یانگ به عنوان مدل نرخ نفوذ پایه در نظر گرفته شد. ابتدا مقادیر ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته تعیین شد. سپس نرخ نفوذ حفاری نسبت به پارامترهای حفاری نرمالایز شد. در ادامه روابط هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی با نرخ نفوذ نرمالایز شده بررسی شد. 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. با توجه به وابستگی شدید برخی از پارامترهای ژئومکانیکی نسبت به هم، پارامترهای مقاومت فشاری محدود شده، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و چگالی برای تعیین قابلیت حفاری انتخاب شدند. به کارگیری قابلیت حفاری محاسبه شده در مدل بورگوین و یانگ نشان داد که دقت مدل را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۱. مقدمه

پارامترهای مته، طراحی عملیات حفاری، پیش‌بینی سرعت حفاری و طبقه‌بندی سنگ استفاده کرد (Gstalter and Raynal, 2013; Iqbal, 2008; Ma, 2011; Macini et al., 2007, 2005; Singh et al., 2006; Somerton et al., 1969). مهندسی حفاری به منظور تخمین قابلیت حفاری سنگ از پارامتری به نام "d-exponent" استفاده می‌کنند (Aadnoy, 2010). این پارامتر بدون لحاظ هیچ یک از ویژگی‌های سنگ و تنها با استفاده از نرخ نفوذ، قطر مته، سرعت دوران و وزن روی مته محاسبه می‌شود. بنابراین نمی‌تواند بیان‌کننده قابلیت حفاری سنگ باشد. قابلیت حفاری

قابلیت حفاری سنگ یک شاخص کمی است که به طور گسترده در زمین‌شناسی، معدن، نفت و رشته‌های مهندسی دیگر برای ارزیابی سختی یا آسانی حفر یک سنگ به کار می‌رود. در سال ۱۹۲۷ برای اولین بار مفهوم قابلیت حفاری سنگ توسط تیلسون (White, 1969) ارائه شد. در حفاری‌های اکتشافی و استخراج نفت و گاز؛ قابلیت حفاری سازند اهمیت بالایی دارد و می‌توان از آن به عنوان یک راهنما در انتخاب مته، طراحی فن‌آوری حفاری چاه، بهینه‌سازی

می‌رسد، اما انرژی ویژه حفاری مشخصه ذاتی سنگ نمی‌باشد (Singh et al., 2006).

محققانی نیز علاوه بر مقاومت فشاری تک محوره از سایر ویژگی‌های سنگ مانند تخلخل، چگالی، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی و حجم شیل برای تخمین قابلیت حفاری سنگ استفاده کردند (Bezminabadi et al., 2017; Prasad, 2009). مقاومت فشاری تک محوره رابطه خوبی را با نرخ نفوذ نشان داد. از این‌رو محققانی نیز مقاومت فشاری محدود شده را برای تخمین قابلیت حفاری سنگ به کار بردند (Prasad, 2009; Shi et al., 2015).

در اکثر مطالعات انجام شده، داده‌های اندازه‌گیری شده در زمان حفاری برای توسعه شاخص قابلیت حفاری سنگ استفاده شده است. استفاده از این داده‌ها به دلیل نشان دادن شرایط واقعی سازند، نقطه قوت این تحقیقات است، اما در هیچ یک از این مطالعات سهم پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سازندی از مقدار نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده تفکیک نشده است. از این‌رو تأثیر واقعی پارامترهای سازندی روی نرخ نفوذ در این بررسی‌ها نشان داده نشده است. برای نرمالایز کردن نرخ نفوذ نسبت به پارامترهای عملیاتی بایستی مدل نرخ نفوذ جامعی انتخاب شود. اما قبل از انتخاب مدل نرخ نفوذ، شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر آن بسیار ضروری است.

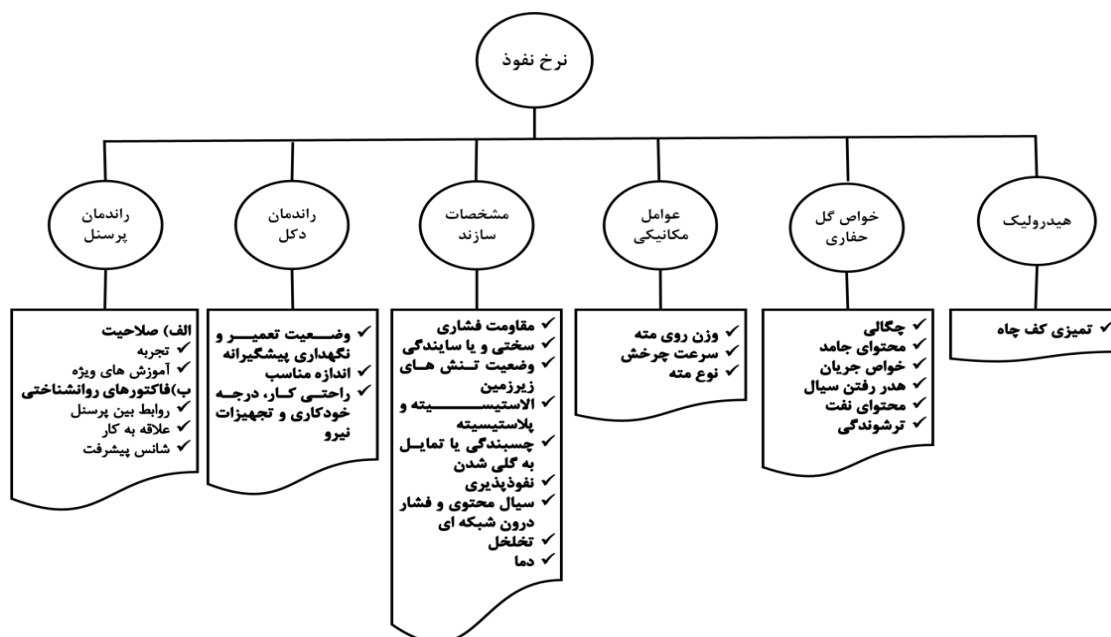
عوامل زیادی بر نرخ نفوذ مته تأثیرگذار هستند (شکل). مطالعه تأثیر واقعی یک پارامتر روی نرخ نفوذ بدون لحاظ تأثیر سایر پارامترها غیرممکن است (Lummus and Azar, 1986; Sah, 2010). حتی برخی از این پارامترها به صورت پیچیده و غیرخطی عمل می‌کنند، یعنی افزایش یکی ممکن است باعث کاهش دیگری شود (Paiaman et al., 2009). به عنوان مثال افزایش وزن روی مته ممکن است در برخی موارد موجب افزایش نرخ نفوذ شود اما این امر در دراز مدت موجب فرسایش مته و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ خواهد شد. وجود عوامل متعدد و تأثیر متقابل آن‌ها روی یکدیگر مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملیات حفاری را دشوار می‌سازد (Alum and Egbon, 2011; Monazami et al., 2012).

سنگ از پارامترهای زیادی تأثیر می‌پذیرد (Black et al., 2008; Kahraman and Alber, 2006; Prasad, 2009; Prikryl, 2001; Reckmann et al., 2007; Thuro and Plinninger, 2003)؛ که در صنعت حفاری به ندرت به این قضیه توجه شده است (Prasad, 2009).

روش‌های محاسبه قابلیت حفاری سنگ در صنعت نفت را می‌توان به چهار گروه تقسیم نمود: ۱- روش‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه (Ma, 2011; Shia et al., 2016)، ۲- روش معکوس‌سازی داده‌های گل‌نگاری (Rong, 2004)، ۳- روش استفاده از نگار صوتی و ۴- روش استفاده از نگارهای پتروفیزیکی (Bezminabadi et al., 2017; Ma, 2011; Prasad, 2009; Zhu et al., 2012). نتایج روش استفاده از مغزه و مته‌های حفاری کوچک، به کیفیت مغزه‌های به دست آمده از چاه بستگی دارد. همچنین، برای رسیدن به نتایج مطلوب لازم است حداقل سه آزمایش برای هر نقطه عمقی انجام گیرد و از آنجایی که تهیه مغزه به دلیل هزینه بالای مغزه‌گیری بسیار مشکل است انجام این روش بسیار گران قیمت می‌باشد. از طرفی، نتایج این روش به دلیل تفاوت شرایط آزمایشگاهی با شرایط مخزن از قابلیت اطمینان خوبی برخوردار نیست. استفاده از نگار صوتی و معکوس‌سازی داده‌های گل‌نگاری به نتایج نسبتاً مطلوبی می‌رسند؛ اما آن‌ها به دلیل استفاده از منابع اطلاعاتی کم، نمی‌توانند تأثیر سایر پارامترها را لحاظ نمایند. از این‌رو در تخمین قابلیت حفاری قدرتمند نیستند (Ma, 2011). استفاده از تلفیق منابع اطلاعاتی مختلف شامل نگارهای پتروفیزیکی، خواص سیال حفاری و گل‌نگاری نشان داد که در تخمین قابلیت حفاری سنگ بسیار کارآمد است.

رابطه متقابل مته-سنگ نیز روشی دیگر برای توسعه شاخص قابلیت حفاری سنگ بوده است. برای نمونه، کلیسیدیس در سال ۲۰۱۱ برای تخمین قابلیت حفاری سازند از مفهوم انرژی ویژه حفاری توسعه داده شده توسط تیل (Teale, 1965) بهره برد. بدین منظور، انرژی منتقل شده به سنگ با مقاومت فشاری تک محوری ارتباط داده شد و با استفاده از آن قابلیت حفاری سنگ محاسبه شد (Kelessidis, 2011). هرچند اساس کار او منطقی به نظر

تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ

می‌یابد (Bezminabadi et al., 2017). بررسی مدل‌های نرخ نفوذ نشان می‌دهد که مدل بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) نسبت به سایر مدل‌ها پارامترهای عملیاتی بیشتری را در نظر گرفته است. بنابراین در این مقاله برای ارزیابی اثر پارامترهای ژئومکانیکی و تعیین قابلیت حفاری، اثر سایر پارامترها روی نرخ حفاری با استفاده از مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ حذف خواهند شد.

۲. روش تحقیق

با توجه به این که مقدار نرخ حفاری اندازه‌گیری شده در سر چاه متأثر از پارامترهای مختلفی (پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سنگ) است، به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های سنگ لازم است مقادیر نرخ نفوذ نسبت به پارامترهای عملیاتی نرمالایز شوند. بنابراین لازم است مدل نرخ نفوذی که دربرگیرنده اکثر پارامترهای عملیاتی است انتخاب شود. بررسی مدل‌های نرخ نفوذ نشان می‌دهد که مدل بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده پارامترهای عملیاتی بیشتری را شامل می‌باشد؛ لذا در این مطالعه از مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ برای حذف اثر پارامترهای حفاری از نرخ نفوذ استفاده شد. برای حذف اثر پارامترهای حفاری،

تلاش‌های متعددی برای مدل‌سازی نرخ نفوذ انجام شده است که از میان این مدل‌ها، مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) به دلیل سادگی بکارگیری از محبوبیت بیشتری در بین مهندسين حفاری برخوردار است که در چند دهه گذشته به طور گسترده مورد استفاده محققان قرار گرفته است (Anemangely et al., 2017a). با وجود موفقیت مدل بورگوین و یانگ در تخمین نرخ نفوذ، این مدل از معایبی رنج می‌برد که مهم‌ترین آن‌ها در نظر گرفتن مقدار یکسان قابلیت حفاری برای تمام طول سازند است؛ درحالی‌که سازند بسیار ناهمگن است. از طرفی این ضریب ثابت نیز بدون لحاظ پارامترهای سازندی و تنها با استفاده از برازش مدل با پارامترهای حفاری تعیین می‌شود.

هرچند بورگوین و یانگ ادعا نمودند که مقدار قابلیت حفاری (یعنی تابع اول) با در نظر گرفتن مقاومت فشاری سازند بایستی تعیین شود (Bourgoyne Jr and Young, 1974). بسیاری از مدل‌های نرخ نفوذ به کاربرده شده پارامترهای سنگ را نادیده گرفته‌اند (جدول ۱). بکارگیری پارامترهای سنگ در مدل نرخ نفوذ، به عنوان قابلیت حفاری سنگ، توسط بزمین‌آبادی و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که دقت مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ به طور قابل توجهی افزایش

ضرایب ثابت این مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته
تعیین شد. از آنجایی که در این مدل تأثیر پارامترهای سیال
حفاری نادیده گرفته شده است لذا محدوده عمقی مورد
مطالعه به گونه‌ای انتخاب شد که میزان تغییرات خواص سیال
حفاری قابل چشم‌پوشی باشد.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های نرخ نفوذ ارائه شده در تحقیقات قبلی

پارامتر													
انرژی ویژه حفاری	عمق	نوع سازند	قطر و نوع مته	گشتاور	وزن روی مته	سرعت دوران	نیروی ضربه نازل	محتوای جامد سیال حفاری	چگالی سیال حفاری	ویسکوزیته سیال حفاری	خوردگی دندان	قابلیت حفاری	محققان
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Bourgoyne Jr and (بانگ و یانگ) (Young Jr, 1974)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	مایدلا و اوهارا (Maldia et al., 1991) پسیر و فیر (Pessier and Fear, 1992)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	پیمان و همکاران (Paiaman et al., 2009)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	مرادی و همکاران (Moradi et al., 2010)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بهراری و همکاران (Bahari et al., 2011)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	عامر و ابراهیم (Amar and Ibrahim, 2012)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	اخلاقی و رضایی (Akhlaghi and Rezaei, 2012)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	نینگ و همکاران (Jing Ning et al., 2013)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	انصاری و همکاران (Ansari et al., 2016)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	مروجی و نادری (Moraveji and Naderi, 2016)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	انه منگلی و همکاران (Anemangely et al., 2017a)
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بزمین آبادی و همکاران (Bezminabadi et al., 2017)

تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1000} \right)^{a_8} \quad (9)$$

ضرایب ثابت این مدل بایستی بر اساس شرایط محلی میدان مورد مطالعه و برای هر سازند به صورت جداگانه تعیین شود. بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) حد بالا و پایین این ضرایب را بر اساس روابط منطقی هر کدام از پارامترها با نرخ نفوذ و همچنین بر اساس مطالعات موردی متعدد انجام شده تعیین کردند (جدول ۲).

از آنجایی که نتایج مدل بسیار وابسته به مقادیر این ضرایب است چگونگی تعیین آن‌ها بسیار مهم است. بورگوین و یانگ برای تعیین این ضرایب روش رگرسیون چند متغیره را پیشنهاد دادند (Bourgoyne Jr and Young Jr, 1974). تحقیقات انجام شده قبلی نشان داد که بکارگیری این روش برای تعیین این ضرایب منجر به نتایج بی‌معنی می‌شود (Anemangely et al., 2017a; Bahari and Baradaran Seyed, 2007; Bahari et al., 2008; Seifabad and Ehteshami, 2013). لذا تلاش‌های متعددی برای تعیین این ضرایب با استفاده از سایر تکنیک‌های ریاضی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری صورت گرفت. نتایج مقایسه میان روش‌های ریاضی، رگرسیونی و الگوریتم‌های تکاملی نشان داد که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته می‌تواند به خوبی مقادیر بهینه این ضرایب را تعیین نماید (Anemangely et al., 2017a).

جدول ۲. حد بالا و پایین ضرایب مدل بورگوین و یانگ

ضرایب	حد پایین	حد بالا
a_1	0.5	1.9
a_2	0.000001	0.0005
a_3	0.000001	0.0009
a_4	0.000001	0.0001
a_5	0.5	2
a_6	0.4	1
a_7	0.3	1.5
a_8	0.3	0.6

بنابراین مقادیر نرمالایز شده نرخ نفوذ تنها متأثر از پارامترهای سنگ خواهند بود. در ادامه رابطه هر یک از ویژگی‌های سنگ با نرخ نفوذ نرمالایز شده ارزیابی خواهد شد. پارامترهایی از سنگ که رابطه خوبی با نرخ نفوذ نرمالایز شده دارند به منظور ایجاد مدل رگرسیونی انتخاب خواهند شد. ضرایب این مدل رگرسیونی با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی محاسبه خواهد شد. در پایان به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، شاخص قابلیت حفاری محاسبه شده در مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ جایگزین، و نتایج آن با مدل اصلی بورگوین و یانگ مقایسه خواهد شد.

۱.۲ مدل بورگوین و یانگ

بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) رابطه (۱) را برای تخمین نرخ نفوذ حفاری با استفاده از مته‌های مخروط غلتکی ارائه داد.

$$ROP = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8 \quad (1)$$

در این رابطه f_1 بیان‌کننده تأثیر مقاومت سازند، نوع مته، نوع گل و محتوای جامد گل است که در مدل حفاری در نظر گرفته نشده است. واحد این فاکتور مشابه نرخ نفوذ است و اغلب به عنوان قابلیت حفاری سازند نامیده می‌شود. توابع f_2 و f_3 در برگیرنده تأثیر فشردگی سازند روی نرخ نفوذ است. تابع f_4 بیان‌کننده تأثیر فراتعدالی روی نرخ نفوذ است. توابع f_5 و f_6 به ترتیب تأثیر وزن روی مته و سرعت دوران را روی نرخ نفوذ مدل می‌کند. تابع f_7 تأثیر ساییدگی دندان مته و تابع f_8 تأثیر هیدرولیک مته را روی نرخ نفوذ بیان می‌کنند. این توابع به شکل زیر تعریف شده‌اند:

$$f_1 = e^{2.303a_1} = K \quad (2)$$

$$f_2 = e^{2.303a_2(10000-D)} \quad (3)$$

$$f_3 = e^{2.303a_3D^{0.69}(g_p-9)} \quad (4)$$

$$f_4 = e^{2.303a_4D(g_p-\rho_c)} \quad (5)$$

$$f_5 = \left[\frac{W}{d_b} - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t \right]^{a_5} \quad (6)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{60} \right)^{a_6} \quad (7)$$

$$f_7 = e^{-a_7h} \quad (8)$$

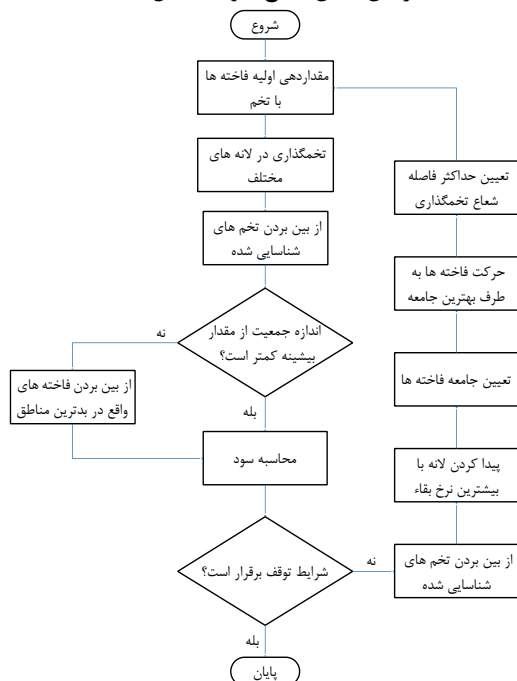
۲.۲ تعیین ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ با

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم فاخته با الهام از زندگی پرندگانی به نام فاخته ارائه شده است (Rajabioun, 2011). این الگوریتم مناسب برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی پیوسته است. این الگوریتم همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی با یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها کار خود را شروع می‌کند. این جمعیت از فاخته‌ها برای نگهداری از تخم‌های خود، آن‌ها را در لانه تعدادی پرده میزبان قرار می‌دهند. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرده میزبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرده میزبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هر چه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به رشد باشند و نجات یابند، به همان اندازه فاخته‌ها تمایل بیشتری به آن منطقه نشان می‌دهند. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که این الگوریتم قصد بهینه‌سازی آن را دارد.

فاخته‌های بالغ حاصل از تخم‌های جمعیت اولیه از فاخته‌ها جوامع و گروه‌هایی را تشکیل می‌دهند. هر گروه منطقه سکونت خود را برای زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته‌ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت، تعدادی شعاع تخم‌گذاری محاسبه شده و شکل می‌گیرد. سپس فاخته‌ها شروع به تخم‌گذاری تصادفی در لانه‌های داخل شعاع تخم‌گذاری خود می‌کنند. این فرآیند تا رسیدن به بهترین محل برای تخم‌گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌یابد. این محل بهینه، جایی است که بیشترین تعداد فاخته‌ها در آن گرد هم می‌آیند. پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد

تخم‌ها از بین خواهد رفت. این فرآیندها تا زمانی ادامه می‌یابد تا بهترین موقعیت با بالاترین ارزش سود به دست آید و اکثر جمعیت فاخته‌ها در این مکان جمع شوند (شکل ۲).



شکل ۲. فرآیند حل مسئله با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

ریشه میانگین مربعات خطا به عنوان تابع هدف این الگوریتم تکاملی در نظر گرفته شد (رابطه (۱۰)) (Anemangely et al., 2017b). همان‌طور که قبلاً گفته شد، بهینه‌سازی فاخته الگوریتمی است که تابع هدف را ماکزیمم می‌سازد. بنابراین در این مسئله تابع هدف بایستی به صورت منفی در نظر گرفته شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ROP_{real_i} - ROP_{predicted_i})^2} \quad (10)$$

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از فاخته، ابتدا بایستی ماتریس زیستگاه که مشخص کننده تعداد متغیرهای مسئله است، تشکیل شود. با توجه به تعداد ضرایب ثابت مدل، ماتریس زیستگاه را همانند زیر تعریف می‌کنیم:

$$H = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \quad (11)$$

در شروع الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، بر اساس اندازه جمعیت فاخته‌ها و تعداد متغیرها، ماتریسی با سایز $N_{pop} \times N_{var}$

تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران

از میداین جنوب غربی ایران است. از آنجایی که در چاه‌های افقی و زاویه دار به دلیل وجود اصطکاک بین رشته حفاری و دیواره چاه، تعیین دقیق وزن روی مته دشوار می‌باشد. لذا برای این مطالعه چاهی قائم انتخاب شد. با توجه به فرضیات انجام شده مبنی بر عدم تغییر خواص سیال و مته حفاری، محدوده عمقی مورد مطالعه در این چاه از عمق ۹۲۸۱/۴۹۶ تا ۹۹۳۴/۳۸۳ فوتی و واقع در سازند پابده می‌باشد.

شکل ۳ و ۴ به ترتیب نمودار تغییرات پارامترهای حفاری و ویژگی‌های سازند پابده واقع در محدوده عمقی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این ویژگی‌های سنگ بر اساس مطالعات پیشین انجام شده برای تخمین قابلیت حفاری سنگ انتخاب شده است. علاوه بر این؛ این ویژگی‌های سازند را می‌توان به راحتی از نگارهای پتروفیزیکی چاه محاسبه نمود. محدوده تغییرات مقادیر هر یک از پارامترهای حفاری مدل نرخ نفوذ بورگورین و یانگ و پارامترهای مکانیک سنگی در محدوده مورد مطالعه به ترتیب در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی به دست آمدند که برای این منظور مدل-سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه انجام شد. روابط تعیین پارامترهای استاتیک سنگ از نوع دینامیک آن- که بر اساس نتایج آزمایشگاهی توسعه داده شده‌اند- در پیوست اشاره شده است.

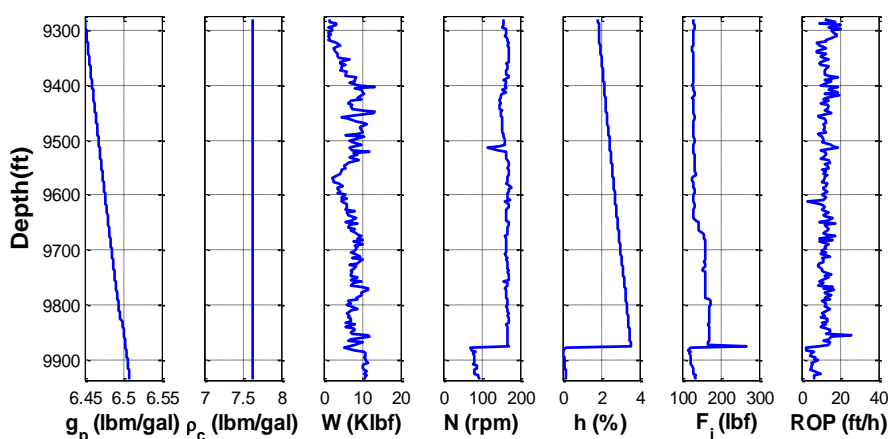
ایجاد می‌شود و برای هر زیستگاه از جمعیت، تعدادی تخم که به صورت تصادفی تولید شده است اختصاص داده می‌شود. تعداد تخم‌های هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ عدد است. این اعداد حد بالا و پایین تعداد تخم‌ها در هر تکرار الگوریتم است. پارامتر دیگری که در الگوریتم بایستی تعریف شود حداکثر فاصله شعاع تخم‌گذاری است. در یک مسئله بهینه‌سازی، حداکثر فاصله شعاع تخم‌گذاری طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{NCE}{TNE} (var_{hi} - var_{low}) \quad (12)$$

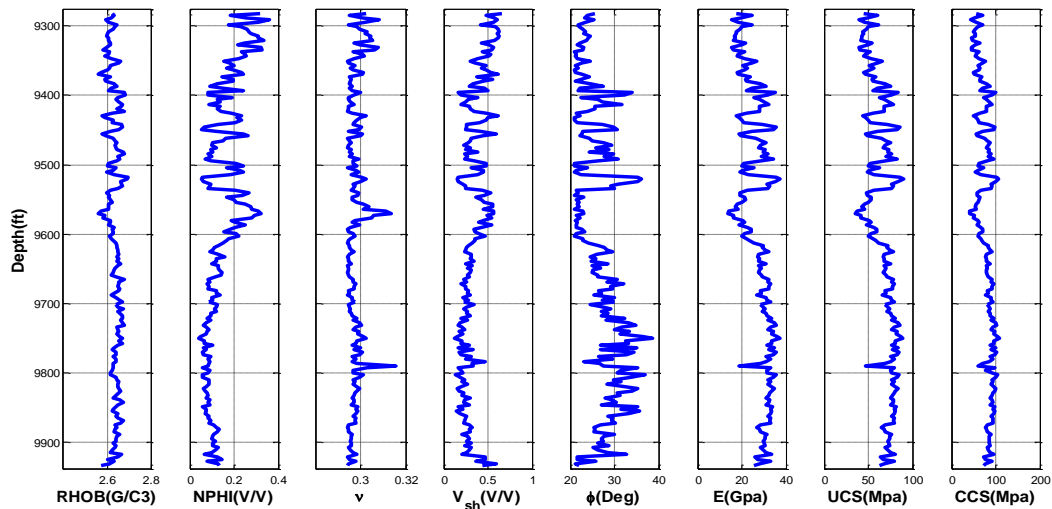
در این مقاله، مقدار اولیه α برابر یک تعریف شد و در هر تکرار این ضریب یک درصد تقلیل پیدا خواهد کرد که این امر موجب افزایش سرعت همگرایی و دقت الگوریتم خواهد شد. اندازه جمعیت و همچنین تعداد تکرارهای الگوریتم برای حل این مسئله با استفاده از تحلیل حساسیت تعیین شد. بدین منظور اندازه جمعیت فاخته‌ها و تعداد تکرارها، به ترتیب بین ۳۰ تا ۸۰ و ۱۰ تا ۱۰۰ تغییر داده شد. نتایج نشان داد که بهترین مقادیر برای اندازه جمعیت اولیه و ثانویه و تعداد تکرارهای الگوریتم بر اساس دو معیار سرعت و دقت به ترتیب برابر ۵۰، ۵۰ و ۲۰ است.

۳. داده‌های تحقیق

چاه مورد مطالعه در این تحقیق مربوط به میدان کرنج، یکی



شکل ۳. نمودار تغییرات پارامترهای حفاری مدل نرخ نفوذ بورگورین و یانگ در محدوده عمقی مورد مطالعه



شکل ۴. نمودار تغییرات ویژگی‌های سازند مورد مطالعه

جدول ۳. محدوده تغییرات مقادیر هر یک از پارامترهای حفاری مدل بورگوین و یانگ

ROF(ft/h)	$F_r(lbf)$	$h(\%)$	$N(rpm)$	$W(klbf)$	$\rho_c(\frac{lbf}{gal})$	$g_p(\frac{lbf}{gal})$	شاخص آماری
۲/۴۴۱	۱۱۷/۰۸۷	۰/۰۲۵	۶۹/۴۴۱	۱/۰۹۳	۷/۶۲۵	۶/۴۵۰	کمینه
۱۲/۰۸۷	۱۴۱/۴۰۳	۲/۴۳۶	۱۵۶/۵۳۱	۷/۱۹۵	۷/۶۲۵	۶/۴۷۸	میانگین
۲۵/۹۷۰	۲۶۶/۲۰۷	۳/۵۴۵	۱۷۶/۰۹۷	۱۳/۴۳۵	۷/۶۲۵	۶/۵۰۹	بیشینه

جدول ۴. محدوده تغییرات مقادیر فیزیکی و مکانیک سنگی انتخاب شده

$V_{sh}(V/V)$	$\phi(Deg)$	ν	$E(Gpa)$	$CCS(Mpa)$	$UCS(Mpa)$	$NPHI(V/V)$	$RHOB(G/C3)$	شاخص آماری
۰/۱۲۳	۲۰/۸۷۹	۰/۲۹۴	۱۳/۶۰۳	۴۰/۷۱۱	۳۵/۵۸۰	۰/۰۴۲	۲/۵۵۸	کمینه
۰/۳۳۸	۲۶/۵۵۰	۰/۲۹۷	۲۷/۱۸۱	۷۷/۸۹۲	۶۶/۴۰۱	۰/۱۴۴	۲/۶۳۲	میانگین
۰/۶۵۷	۳۸/۵۷۸	۰/۳۱۶	۳۷/۴۲۹	۱۰۹/۰۴۴	۸۹/۶۶۳	۰/۳۶۰	۲/۶۹۱	بیشینه

در شکل ۶ خطای باقی‌مانده در هر نقطه عمقی برای نرخ حفاری تخمینی با استفاده از توابع دوم تا هشتم مدل بورگوین و یانگ نشان داده شده است.

شکل ۷ مقایسه بین هر یک از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ را با نرخ نفوذ نرمالایز شده نشان می‌دهد. مقایسه ضریب همبستگی این روابط با ضریب همبستگی مدل بورگوین و یانگ حاصل از هفت تابع نشان می‌دهد که پارامترهای سازند تأثیر چشمگیری بر نرخ نفوذ دارد. از میان ویژگی‌های سنگ مورد مطالعه، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون تأثیر کمتری بر نرخ نفوذ دارند.

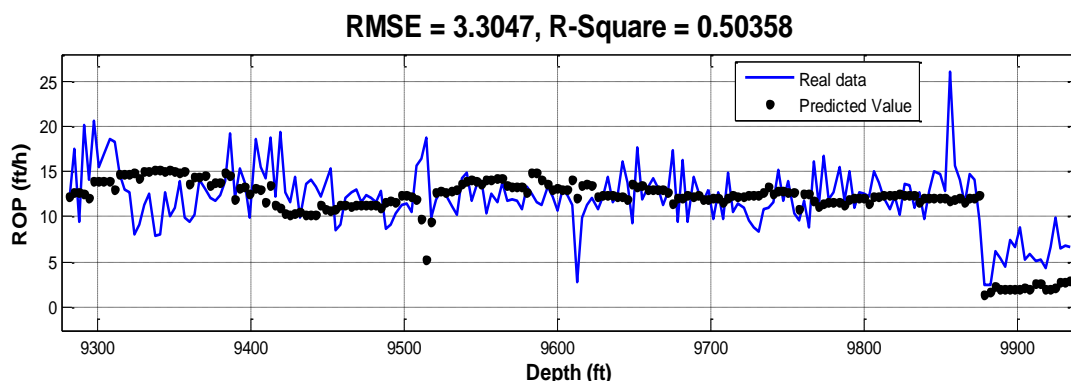
۴. بحث و نتایج

در جدول مقادیر به دست آمده برای هر یک از ضرایب مدل بورگوین و یانگ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نشان داده شده است. مقادیر این ضرایب در محدوده پیشنهادی بورگوین و یانگ واقع شده است. در شکل ۵ نتایج حاصل از تخمین با مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ با هفت تابع (توابع دوم تا هشتم) نشان داده شده است. متوسط درصد خطا برای این تخمین برابر ۳/۲۸ درصد می‌باشد. نتایج این تخمین ناشی از پارامترهای حفاری است؛ بنابراین با حذف این اثر از مقادیر واقعی نرخ نفوذ، نرخ نفوذ نرمالایز شده به دست خواهد آمد.

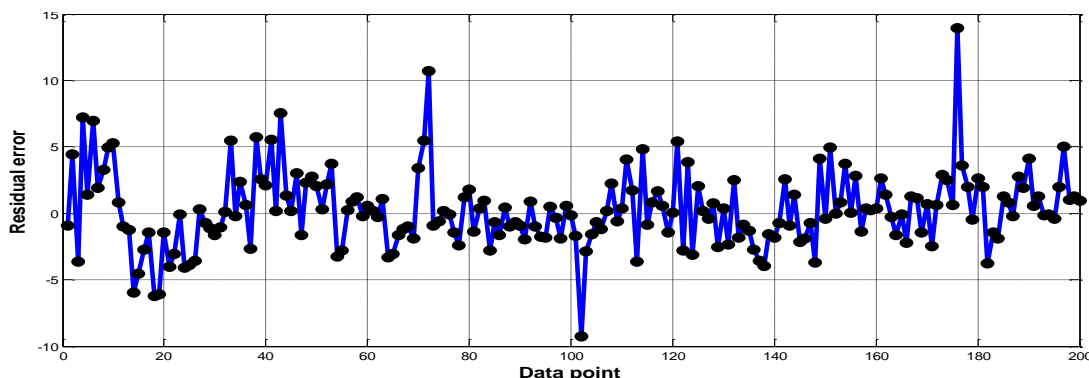
تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران

جدول ۵. مقادیر ضرایب ثابت مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ به دست آمده با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

روش	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
الگوریتم بهینه‌سازی فاخته	1.792	0.000179	0.000075	0.0000435	0.824	0.815	0.610	0.514



شکل ۵. مقایسه نرخ نفوذ واقعی و تخمینی با استفاده از توابع دوم تا هشتم مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ



شکل ۶. نمودار خطای باقی‌مانده برای نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از توابع دوم تا هشتم مدل بورگوین و یانگ

و وجود مقدار شیل اندک در عمق بیشتر نسبت به مقدار شیل بیشتر در عمق‌های کمتر به مراتب بیشتر نرخ نفوذ را کاهش می‌دهد. شکل ۷ (ت) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پواسون نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد لذا همخوانی خوبی با این مطلب دارد که سنگ‌های مقاوم که به لحاظ حفاری بسیار دشوار هستند دارای نسبت پواسون پایینی هستند. شکل ۷ (ث) بیان می‌کند که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی مقدار نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تنش لازم برای شکست سنگ نیز افزایش می‌یابد بنابراین؛ این یافته همخوانی خوبی با مطالعات قبلی دارد.

همان‌طور که در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود با افزایش تخلخل نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد. این مطلب همخوانی خوبی با مطالعات قبلی نشان می‌دهد. شکل ۷ (ب) نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته سنگ نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. در شکل ۷ (پ) مشاهده می‌شود که با افزایش حجم شیل نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد در حالی که یافته‌های قبلی نشان می‌دهد که افزایش حجم شیل موجب افزایش احتمال گلی شدن مته و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ می‌شود. بررسی نمودار مربوط به حجم شیل در شکل ۴ نشان می‌دهد که مقادیر بالای شیل در نواحی کم عمق چاه وجود دارد و از آنجایی که رفتار شیل با افزایش عمق پیچیده‌تر شده و نرخ نفوذ را کاهش می‌دهد می‌توان گفت که تأثیر عمق بر حجم شیل غالب است

تحلیل واریانس رابطه ۱۳ را نشان می‌دهد. با جایگزینی رابطه (۱۳) به جای تابع اول مدل بورگوین و یانگ، منجر به اصلاح این مدل خواهد شد. رابطه (۱۴) صورت کلی مدل بورگوین و یانگ اصلاح شده را نشان می‌دهد.

در این مدل مقادیر ضرایب ثابت b_i ها با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی به دست می‌آیند. با توجه به اینکه تغییرات نوع مته و سیال حفاری در محدوده مورد مطالعه وجود ندارد می‌توان گفت ثابت b_1 بیان کننده تأثیر این پارامترها است. مقایسه میان نرخ نفوذ واقعی و تخمینی با مدل‌های بورگوین و یانگ اولیه و اصلاح شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که از این شکل مشخص است مدل بورگوین و یانگ اصلاح شده نتایجی بهتری نسبت به مدل اولیه بورگوین و یانگ ارائه کرده است. مقایسه بین خطای باقی‌مانده این دو مدل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. متوسط درصد خطا برای مدل بورگوین و یانگ اولیه و اصلاح شده به ترتیب برابر ۳/۰۶ و ۲/۶۷ درصد می‌باشد که نشان از دقت خوب مدل اصلاح شده بورگوین و یانگ است. مقایسه میان ضریب تعیین و خطای دو مدل بورگوین و یانگ اولیه و اصلاح شده نیز در جدول ۷ حاکی از افزایش دقت مدل بورگوین و یانگ با جایگزینی تابع جدید محاسبه قابلیت حفاری سازند است.

شکل ۷ (ج)، (چ) و (ح) نشان می‌دهند که به ترتیب با افزایش مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت فشاری محدود شده نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. این مطلب تأیید می‌کند که حفاری در سنگ‌های سخت مشکل است.

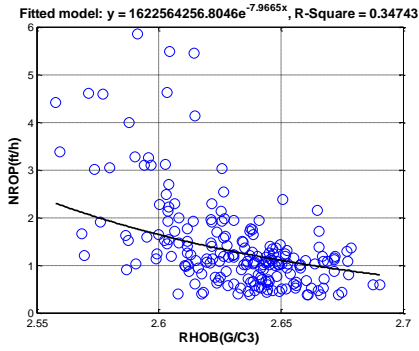
پنج پارامتر مقاومت فشاری محدود شده و تک محوره، تخلخل، چگالی و حجم شیل رابطه خوبی را با نرخ نفوذ نشان می‌دهند. ارزیابی رابطه خطی بین هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود همبستگی خطی شدیدی بین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ وجود دارد. بر این اساس چهار ویژگی مقاومت فشاری محدود شده، زاویه اصطکاک داخلی، چگالی و ضریب پواسون که همبستگی نسبتاً پایینی با یکدیگر دارند (هم‌خطی ضعیفی دارند) و همچنین همبستگی خوبی را با نرخ نفوذ نرمالایز شده نشان می‌دهند، برای تعیین قابلیت حفاری سنگ انتخاب شدند.

از آنجایی که پارامترهای ژئومکانیکی با نرخ نفوذ نرمالایز شده به صورت نمایی رابطه بهتری را نشان می‌دهد، برای محاسبه پارامتر قابلیت حفاری تابعی به صورت نمایی در نظر گرفته شد و ضرایب این تابع با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی به دست آمد. رابطه ۱۳ تابع به دست آمده از برازش مدل در نظر گرفته شده برای محاسبه قابلیت حفاری روی نرخ حفاری نرمالایز شده را نشان می‌دهد. جدول ۶ نتایج

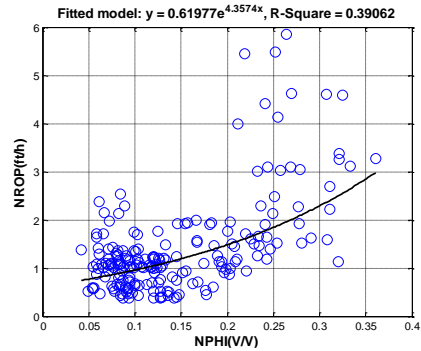
$$K = 81.771 \exp(-1.1457RHOB - 0.122 \times v + 0.0656 \times \phi - 0.0366 \times CCS) \quad (13)$$

$$ROP = b_1 e^{-b_2 RHOB} \times e^{-b_3 v} \times e^{b_4 \phi} \times e^{-b_5 CCS} \times e^{2.303 a_2 (10000-D)} \times e^{2.303 a_3 D^{0.69} (g_p-9)} \times e^{2.303 a_4 D (g_p-\rho_c)} \times \left[\frac{W - \left(\frac{W}{a_b}\right)_t}{4 - \left(\frac{W}{a_b}\right)_t} \right]^{a_5} \times \left(\frac{N}{60}\right)^{a_6} \times e^{-a_7 h} \times \left(\frac{F_j}{1000}\right)^{a_8} \quad (14)$$

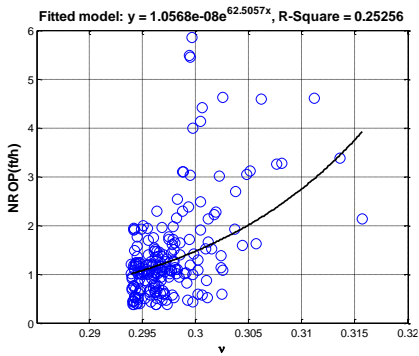
تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران



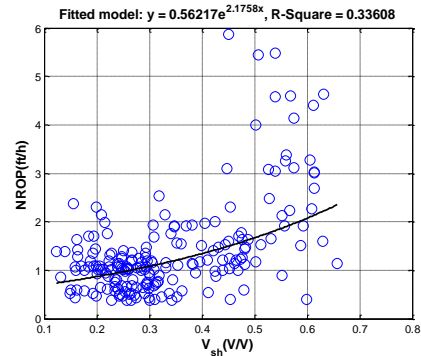
(ب)



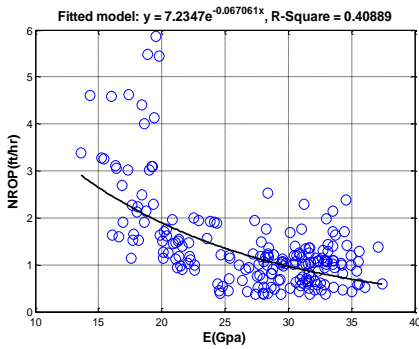
(الف)



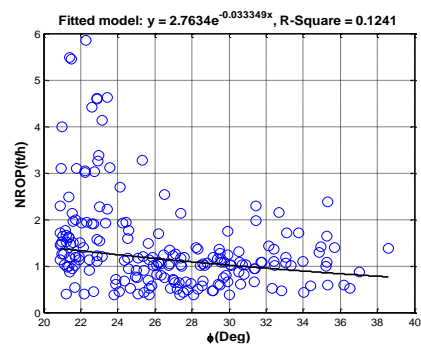
(ت)



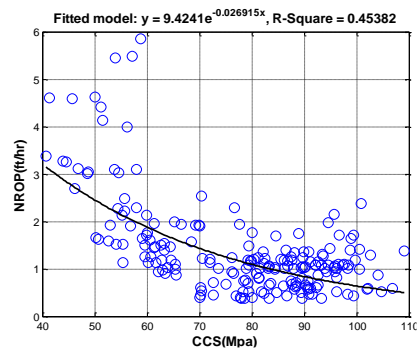
(پ)



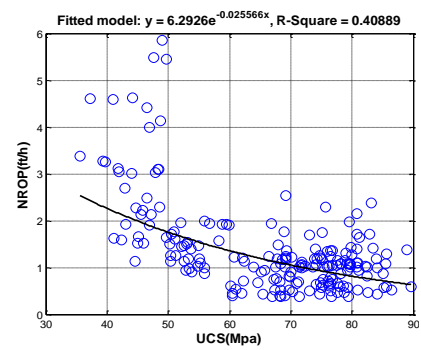
(ج)



(ث)

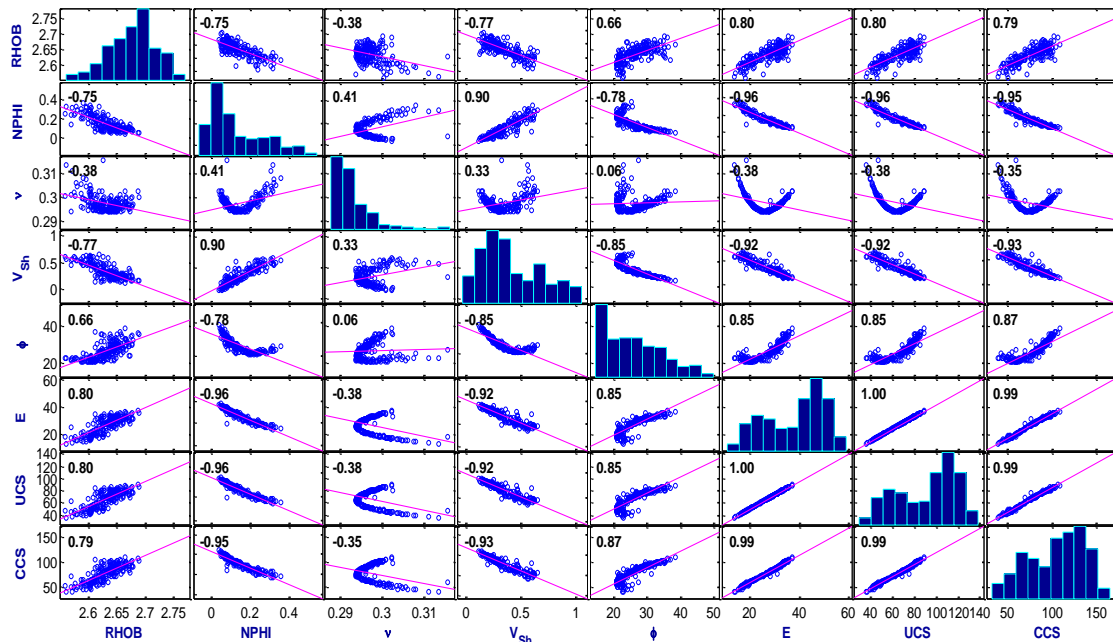


(ح)



(چ)

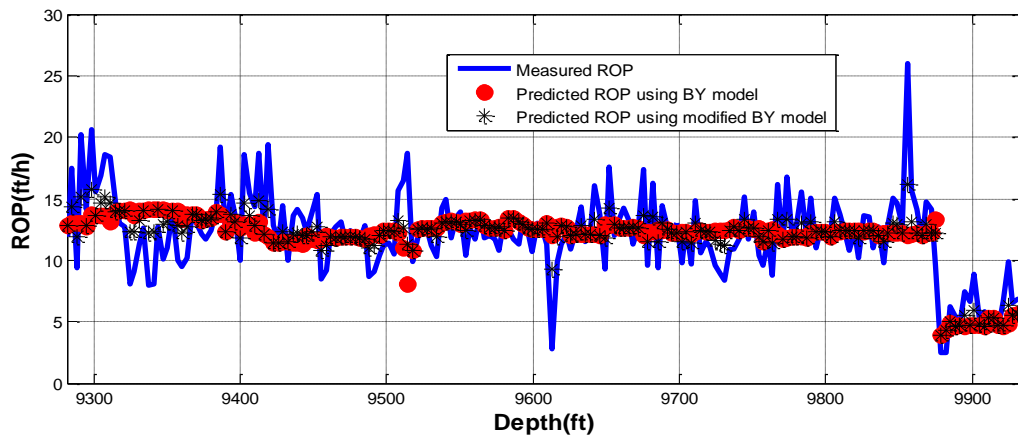
شکل ۷. بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیک سنگی روی نرخ نفوذ حفاری



شکل ۸. ماتریس همبستگی ویژگی‌های ژئومکانیکی نسبت به یکدیگر (بررسی هم‌خطی پارامترهای سنگ)

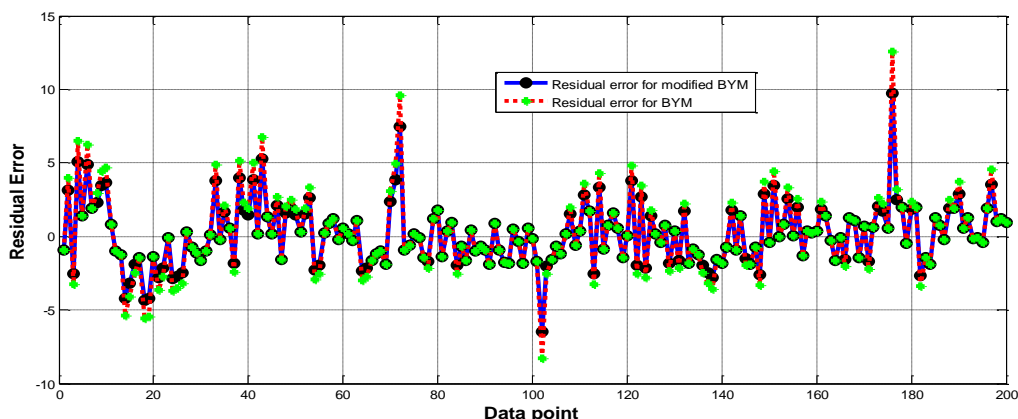
جدول ۱. نتایج آزمون تحلیل واریانس روی مدل تخمین‌گر قابلیت حفاری

<i>P-Value</i>	<i>RMSE</i>	<i>Adjusted R-Square</i>	<i>R-Square</i>	مدل
7.48e-75	0.697	0.504	0.514	رابطه ۱۳



شکل ۹. مقایسه میان نرخ نفوذ واقعی و تخمینی با استفاده از مدل بورگوین و یانگ و مدل اصلاح شده آن (رابطه ۱۴) در محدوده عمقی مورد مطالعه

تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران



شکل ۱۰. مقایسه خطای باقی مانده برای نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از دو مدل بورگوین و یانگ اصلاح شده (رابطه ۱۴)، و بورگوین و یانگ اصلی (رابطه ۱)

قابلیت حفاری سنگ بایستی لحاظ شود. علاوه بر این مقاومت فشاری محدود شده بهتر از مقاومت فشاری تک محوره تأثیر ویژگی‌های سنگ را بر نرخ نفوذ نشان می‌دهد.

پ- زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون تأثیر کمتری بر نرخ نفوذ دارند.

ت- تأثیر عمق بر رفتار شیل غالب‌تر از حجم شیل است به گونه‌ای که شیل با حجم کم واقع در عمق بیشتر می‌تواند به مراتب از شیل با حجم بالا در عمق کمتر، حفاری را بیشتر دچار مشکل کند.

ث- بسیاری از پارامترهای ژئومکانیکی با یکدیگر به صورت خطی وابستگی شدیدی دارند. بنابراین؛ اثر یکدیگر را می‌توانند پوشش دهند و مدل نهایی در نظر گرفته شده برای تعیین قابلیت حفاری را ساده‌تر نمایند.

در ادامه به منظور تعیین قابلیت حفاری سازند از پارامترهای مقاومت فشاری محدود شده، زاویه اصطکاک داخلی، چگالی و ضریب پواسون، که بیشترین ضریب همبستگی را با نرخ نفوذ نرمالایز شده داشتند، استفاده شد. ضرایب مدل نمایی در نظر گرفته شده برای محاسبه قابلیت حفاری با روش رگرسیونی چند متغیره غیره خطی به دست آمد. به کارگیری شاخص قابلیت حفاری جدید به جای تابع اول در مدل بورگوین و یانگ نشان داد که دقت مدل را در حد چشمگیری افزایش می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه بین دو مدل بورگوین و یانگ اولیه و اصلاح شده با پارامتر قابلیت حفاری به دست آمده از نظر

خطا و ضریب تعیین

مدل	RMSE	R-Square
بورگوین و یانگ	2.785	0.527
بورگوین و یانگ اصلاح شده	2.504	0.712

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی اثر پارامترهای فیزیکی و مکانیک سنگی بر نرخ نفوذ حفاری و تعیین قابلیت حفاری سنگ از داده‌های یکی از چاه‌های قائم میدان کرنج استفاده شد. از آنجایی که مقادیر نرخ نفوذ متأثر از پارامترهای حفاری و سازندی است لذا برای بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیک سنگی بر نرخ نفوذ لازم است تأثیر پارامترهای حفاری از نرخ نفوذ حذف شود. بنابراین مدل ریاضی بورگوین و یانگ برای حذف اثر پارامترهای حفاری استفاده شد. بررسی هر یک از پارامترهای فیزیکی و مکانیک سنگی بدست آمده از نگارهای چاه با نرخ نفوذ نتایج زیر را به همراه داشت:

الف- تأثیر ویژگی‌های سنگ بر نرخ نفوذ چشمگیر است

و بایستی در مدل‌های نرخ نفوذ لحاظ شود.

ب- در اکثر مدل‌های نرخ نفوذ تنها مقاومت تک محوره

سنگ به عنوان پارامتری از قابلیت حفاری سنگ لحاظ شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که علاوه بر مقاومت تک محوره، تخلخل، چگالی و حجم شیل نیز برای تعیین

۶. تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب به دلیل حمایت و در اختیار گذاشتن اطلاعات این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. نمادها

جدول ۳. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
ROP	ft/hr	نرخ نفوذ
a_1 تا a_8	-	ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ
D	ft	عمق قائم حقیقی
d_b	in	قطر مته
F_j	lbf	نیروی ضربه نازل
g_p	lbm/gal	گرادیان فشار منفذی
h	%	کسری از ساییدگی مته
ρ_c	lbm/gal	چگالی معادل گل
N	rpm	سرعت دوران
W	$klbf$	وزن روی مته
$\left(\frac{W}{d_b}\right)_t$	lbm/in	آستانه وزن مته در هر اینچ از قطر مته در لحظه شروع حفاری
$RMSE$	-	ریشه میانگین مربعات خطا
$RMSE$	-	ریشه میانگین مربعات خطا
$R-Square$	-	ضریب تعیین
$Adjusted R-Square$	-	ضریب تعیین اصلاح شده
$P-Value$	-	ضریب اهمیت
V_p	km/s	سرعت موج فشاری
V_s	km/s	سرعت موج برشی
ρ	$G/C3$	چگالی سنگ
dyn	-	زیرنویس پارامترهای دینامیک
sta	-	زیرنویس پارامترهای استاتیک
CCS	MPa	مقاومت فشاری محدود شده
CCS_{Dp}	MPa	مقاومت فشاری محدود شده برای سنگ نفوذپذیر
CCS_{SK}	MPa	مقاومت فشاری محدود شده برای سنگ نفوذناپذیر
$PHIE$	-	تخلخل موثر سنگ
$ECD_{pressure}$	MPa	فشار حاصل از چگالی معادل در گردش
D_p	MPa	اختلاف فشار ته چاه

نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده	ft/hr	ROP_{real}
نرخ نفوذ پیش‌بینی شده	ft/hr	$ROP_{predicted}$
تعداد نقاط داده	-	n
اندیس مربوط به نقطه داده	-	i
اندازه جمعیت فاخته‌ها	-	N_{pop}
تعداد متغیرهای تصمیم	-	N_{var}
ماتریس زیستگاه	-	H
متغیرهای تصمیم	-	x_1 تا x_7
حداکثر فاصله شعاع تخم‌گذاری	-	ELR
تعداد تخم‌های فاخته جاری	-	NCE
تعداد کل تخم‌ها	-	TNE
ضریب کنترل کننده مقدار بیشینه شعاع تخم‌گذاری	-	α
حد پایین متغیرهای تصمیم	-	Var_{low}
حد بالای متغیرهای تصمیم	-	Var_{hi}
دانسیته	$g/c3$	$RHOB$
تخلخل	v/v	$NPHI$
مقاومت فشاری تک محوره	MPa	UCS
ضریب پواسون	-	ν
زاویه اصطکاک داخلی	$degree$	ϕ
حجم شیل	v/v	V_{sh}
قابلیت حفاری سازند	ft/h	K
اختلاف فشار ته چاه اسکمپتون	MPa	D_{PSK}
فشار روباره	MPa	OB
فشار منفذی	MPa	P_p
ضرایب ثابت در مدل بورگوین و یانگ اصلاح شده	-	b_i

۸. پیوست

برای تعیین پارامترهای الاستیک استاتیک سنگ، ابتدا بایستی پارامترهای الاستیک دینامیکی سنگ از نگارهای پتروفیزیکی محاسبه شوند. سپس پارامترهای دینامیک با استفاده از روابط توسعه داده شده به وسیله نتایج آزمایشگاهی به نوع استاتیک آن تبدیل می‌شوند.

برای تعیین پارامترهای الاستیک دینامیک سنگ از روابط جدول ۹ استفاده شد. در جدول ۱۰ روابط مورد استفاده برای تخمین پارامترهای الاستیک استاتیک سنگ از نوع

تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران

استفاده کرد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، در میدان‌های زیر نظر شرکت مناطق نفتخیز جنوب مقاومت فشاری تک محوری از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود (Anemangely et al., 2017c).

$$UCS = 2.27E_{sta} + 4.74 \quad (16)$$

رابطه ۱۷ یکی از روش‌های پذیرفته شده مکانیک سنگی است که به صورت گسترده برای محاسبه مقاومت فشاری محدود شده سنگ استفاده شده است (Caicedo et al., 2005; Shi et al., 2015).

$$CCS_{Dp} = UCS + D_p + 2D_p \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (17)$$

در این رابطه اختلاف فشار ته چاه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$D_p = ECD_{Pressure} - P_p \quad (18)$$

در صورتی که سنگ نفوذناپذیر و چاه قائم باشد برای محاسبه مقاومت فشاری محدود شده از رابطه توسعه داده شده توسط اسکمپتون استفاده می‌شود.

$$CCS_{SK} = UCS + D_{PSK} + 2D_{PSK} \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (19)$$

در این رابطه اختلاف فشار ته چاه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود. برای تعیین رابطه مناسب محاسبه مقاومت فشاری محدود شده، بایستی تخریب مؤثر سنگ تعیین شود. سپس بر اساس جدول ۱۱ رابطه مناسب انتخاب می‌شود.

$$D_{PSK} = ECD_{Pressure} - \left(P_p - \frac{OB - ECD_{Pressure}}{3} \right) \quad (20)$$

دینامیکی متناظر آن ارائه شده است. آزمایش مقاومت فشاری سه محوره تک و چند مرحله‌ای بر روی نمونه‌های بدست آمده برای تعیین روابط تخمین مدول یانگ و ضریب پواسون استاتیک از نوع دینامیکی متناظر آن توسط شرکت مناطق نفتخیز جنوب انجام گردید.

جدول ۹. روابط تعیین ضرایب الاستیک دینامیکی سنگ (Nauroy, 2011; Schön, 2011; Zoback, 2010)

واحد	تعریف	فرمول
پاسکال	تنش محوری کرنش محوری	$E_{dyn} = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$
پاسکال	تنش اعمالی کرنش برشی	$G_{dyn} = \rho V_s^2$
پاسکال	فشار هیدرواستاتیک کرنش حجمی	$K_{dyn} = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$
-	کرنش جانبی کرنش محوری	$\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$

جدول ۱۰. روابط تعیین پارامترهای استاتیک از نوع دینامیک متناظر آن (Anemangely et al., 2017c)

واحد	تعریف	فرمول
پاسکال	تنش محوری کرنش محوری	$E_{sta} = 0.7 E_{dyn}$
-	کرنش جانبی کرنش محوری	$\nu_{sta} = \nu_{dyn}$
پاسکال	تنش اعمالی کرنش برشی	$G_{sta} = \frac{E_{sta}}{2(1 + \nu_{sta})}$
پاسکال	فشار هیدرواستاتیک کرنش حجمی	$K_{sta} = \frac{E_{sta}}{3(1 - 2\nu)}$

برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ از رابطه ۱۵ استفاده شد (Anemangely et al., 2017c).

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{sh}) + 62.1(1 - NPHI - V_{sh})^2 \quad (15)$$

برای به دست آوردن نیم‌رخ پیوسته از مقاومت فشاری تک محوره نیز باید از رابطه تجربی حاصل از نتایج آزمایشگاهی

جدول ۱۱. نحوه محاسبه اختلاف فشار ته چاه بر اساس تخلخل مؤثر سنگ (Caicedo et al., 2005)

رابطه	شرایط استفاده
$CCS = CCS_{DP}$	اگر تخلخل مؤثر بیشتر از ۰/۲ باشد
$CCS = CCS_{DP} \frac{(PHIE - 0.05)}{0.15} + CCS_{SK} \frac{(0.20 - PHIE)}{0.15}$	اگر تخلخل مؤثر بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ باشد
$CCS = CCS_{SK}$	اگر تخلخل کمتر از ۰/۰۵ باشد

۹. مراجع

- Aadnoy, B.S., 2010. Modern well design. CRC Press.
- 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.
- Alum, M.A., Egbon, F., 2011. Semi-Analytical Models on the Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration (ROP). In: Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- 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.
- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017a. Determination of Constant Coefficients of Bourgoyne and Young drilling rate Model Using a Novel Evolutionary Algorithm. J. Min. Environ.
- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017b. Shear wave travel time estimation from petrophysical logs using ANFIS-PSO algorithm: A case study from Ab-Teymour Oilfield. J. Nat. Gas Sci. Eng. 38, 373–387.
- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017c. Safe Mud Weight Window Determination Using Log Based Methodology. In: 79th EAGE Conference and Exhibition 2017.
- 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.
- 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.
- Bahari, M.H., Bahari, A., Moradi, H., 2011. Intelligent drilling rate predictor 7, 1511–1519.
- Bahari, M.H., Bahari, A., Nejati Moharrami, F., Naghibi Sistani, M.B., 2008. Determining Bourgoyne and Young Model Coefficients Using Genetic Algorithm to Predict Drilling Rate. Appl. Sci. 8, 3050–3054.
- 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.
- Black, A.D., Bland, R.G., Curry, D., Ledgerwood, L.W., Robertson, H., Judzis, A., Prasad, U., Grant, T., 2008. Optimization of Deep-Drilling Performance With Improvements in Drill-Bit and Drilling-Fluid

- Design. In: IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Bourgoyne Jr, A.T., Young Jr, F.S., 1974. A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. Soc. Pet. Eng. J. 14, 371–384.
- Caicedo, H.U., Calhoun, W.M., Ewy, R.T., 2005. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Gstalder, S., Raynal, J., 2013. Measurement of Some Mechanical Properties of Rocks And Their Relationship to Rock Drillability. J. Pet. Technol. 18, 991–996.
- Iqbal, F., 2008. SPE 114543 Drilling Optimization Technique – Using Real Time Parameters. pp. 28–30.
- 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.
- Kahraman, S., Alber, M., 2006. Estimating unconfined compressive strength and elastic modulus of a fault breccia mixture of weak blocks and strong matrix. Int. J. rock Mech. Min. Sci. 43, 1277–1287.
- Kelessidis, V.C., 2011. Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. J. South. African Inst. Min. Metall. 111, 429–436.
- Lummus, J.L., Azar, J.J., 1986. Drilling fluids optimization: a practical field approach.
- Ma, H., 2011. Formation drillability prediction based on multi-source information fusion. J. Pet. Sci. Eng. 78, 438–446.
- Macini, P., Magagni, M., Da Dalt, G., Valente, P., 2007. Bit performance evaluation revisited by means of bit Index and formation drillability catalogue. In: SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Macini, P., Magagni, M., Valente, P., 2005. Drill-bit catalog and bit index: a new method for bit performance evaluation. In: SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Maldla, E.E., Ohara, S., Campinas, S.U., 1991. Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit , WOB , and Drillsring Rotation 189–195.
- 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.
- Moradi, H., Bahari, M.H., Bagher, M., Sistani, N., 2010. Drilling rate prediction using an innovative soft computing approach 5, 1583–1588.
- Moraveji, M.K., Naderi, M., 2016. Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm. J. Nat. Gas Sci. Eng. 31, 829–841.
- Nauroy, J.-F., 2011. Geomechanics applied to the petroleum industry. Editions Technip.
- Paiaman, A., Al-Askari, M., Salmani, B., 2009. Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration. Nafta 129–134.

- Pessier, R.C., Fear, M.J., 1992. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Prasad, U., 2009. Drillability of a Rock in Terms of its Physico-Mechanical and Micro- Structural Properties. 43rd U.S. Rock Mech. Symp. 4th U.S. - Canada Rock Mech. Symp.
- Přikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 671–682.
- Rajabioun, R., 2011. Cuckoo optimization algorithm. *Appl. Soft Comput.* 11, 5508–5518.
- Reckmann, H., Jogi, P., Herbig, C., 2007. Using dynamics measurements while drilling to detect lithology changes and to model drilling dynamics. In: ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, pp. 915–924.
- Rong, L., 2004. Comprehensive Research on Drillability in Drilling Project. *Drill. Prod. Technol.* 27, 1–3.
- Sah, S.L., 2010. *Encyclopaedia of petroleum science and engineering*. Gyan Publishing House.
- Schön, J., 2011. *Physical properties of rocks: A workbook*. Elsevier.
- Seifabad, M.C., Ehteshami, P., 2013. Estimating the drilling rate in Ahvaz oil field. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 3, 169–173.
- Shi, X., Meng, Y., Li, G., Li, J., Tao, Z., Wei, S., 2015. Confined compressive strength model of rock for drilling optimization. *Petroleum* 1, 40–45.
- Shia, X., TAO, Z., Meng, Y., Yuana, Y., Jianga, W., MAAO, S., 2016. An Experimental Study of Rock Drillability under Simulated Drilling Conditions. In: *International Conference on Geomechanics, Geo-Energy and Geo-Resources*.
- Singh, T.N., Gupta, A.R., Sain, R., 2006. A comparative analysis of cognitive systems for the prediction of drillability of rocks and wear factor. *Geotech. Geol. Eng.* 24, 299–312.
- Somerton, W., Esfandiari, F., Singhal, A., 1969. Further studies of the relation of physical properties of rock to rock drillability. Society of Petroleum Engineers.
- Teale, R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp. 57–73.
- Thuro, K., Plinninger, R.J., 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. In: 10th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- White, C.G., 1969. A rock drillability index. *Q. Color. Sch. Mines*.
- Zhu, H.-Y., Deng, J.-G., Xie, Y.-H., Huang, K.-W., Zhao, J.-Y., Yu, B.-H., 2012. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling techniques in Western South China Sea oilfields. *Ocean Eng.* 44, 33–45.
- Zoback, M.D., 2010. *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press.