

مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی عملیات حفاری از طریق بررسی پارامترهای اثرگذار بر انرژی ویژه حفاری

ایمان سعادت^۱؛ مجید عسلی^۲؛ پرویز معارف وند^۳؛ محسن ده ودار^۴؛ علی شمسی پور^۵

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴. مربی آموزشی؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۵. استادیار؛ دانشکده مهندسی متالورژی و علم مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2021.241713.1126

چکیده

وزن روی مته، سرعت چرخش آن و دبی سیال حفاری سه پارامتر تأثیرگذار عملیاتی در مطالعه انرژی ویژه حفاری و اندازه کنده‌های حفاری می‌باشند. در این مطالعه تلاش شده تا با استفاده از یک شبیه‌ساز عملیات حفاری، میزان انرژی الکتریکی مصرفی برای قالب‌های استوانه‌ای سیمانی با فرمولاسیون، طول و قطر مشخص در شرایط مختلف عملیاتی، اندازه‌گیری شود و در نهایت رابطه‌ای برای انرژی ویژه، نرخ نفوذ و گشتاور اعمالی ارائه شود. مقدار $d50$ برای هر نمونه مشخص شد. با افزایش سایز خرده‌های حفاری مقدار انرژی ویژه کاهش یافته اما رفته‌رفته با بیشتر شدن سایز آن‌ها از مقدار بهینه، میزان تابع هدف افزایش یافته است و می‌توان روند ارتباط بین این دو پارامتر را با معادله درجه دومی نشان داد که اکسترمم آن، شرایط بهینه حفاری است. دبی سیال بیشترین اثر را بر سایز ذرات، نرخ نفوذ، گشتاور اعمالی و انرژی ویژه از خود نشان می‌دهد. افزایش بار روی مته و دبی سیال سبب افزایش سایز خرده‌های حفاری شده اما با افزایش دور مته عمدتاً سایز ذرات کاهش می‌یابد. در نمودار انرژی ویژه، نقطه اکسترممی در هر نمودار وجود دارد که پس از نقطه مذکور در اثر زیاد شدن دبی سیال و سرعت چرخش مته، انرژی ویژه حفاری از حالت بهینه خارج شده و رو به فزونی می‌گذارد. نمودار انرژی ویژه و گشتاور اعمالی نیز دارای یک نقطه کمینه است و پس از نقطه کمینه در اثر افزایش گشتاور اعمالی انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد. تأثیر نرخ نفوذ بر انرژی ویژه نیز به گونه‌ای است که پس از یک نقطه کمینه تأثیر مثبت افزایش نرخ نفوذ بر کاهش انرژی ویژه از بین رفته و مصرف انرژی حدوداً ثابت خواهد شد.

واژگان کلیدی

انرژی ویژه
نرخ نفوذ سرمته
گشتاور اعمالی
وزن روی سرمته
قطر میانگین کنده
دبی سیال حفاری
سرعت چرخش سرمته
عملیات حفاری

۱. پیش‌گفتار

با توجه به تعدد پارامترهای مؤثر در عملیات حفاری، سنجش و دستیابی به شرایط بهینه نیازمند تعریف شاخصی جامع است. انرژی ویژه حفاری می‌تواند ارتباط خوبی را بین عوامل قابل کنترل (سرعت چرخش مته، دبی سیال، وزن روی مته و...) و غیرقابل کنترل (مقاومت و جنس سازند و...) فراهم آورد. این مفهوم اولین بار توسط تیل به عنوان شاخص سنجش بازدهی عملیات حفاری معرفی گشت.

در این مطالعه تلاش شده تا با ارائه رابطه برای انرژی ویژه حفاری، گشتاور اعمالی و نرخ نفوذ، شرایط بهینه جهت

مدیریت پارامترهای قابل کنترل در عملیات به دست آید. جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی از یک شبیه‌ساز عملیات حفاری استفاده شده است و بر اساس شبیه‌ساز ذکر شده، تغییرات پارامترهایی چون سرعت چرخش رشته حفاری، وزن روی آن، دبی سیال و همچنین اثر آنان بر نرخ نفوذ سرمته، گشتاور اعمالی و انرژی ویژه مصرفی در پی حفاری بلوک‌های سیمانی دارای فرمولاسیون یکسان و معین، مورد توجه قرار گرفته و در نهایت میزان اثرگذاری و همبستگی آن‌ها گزارش شده است.

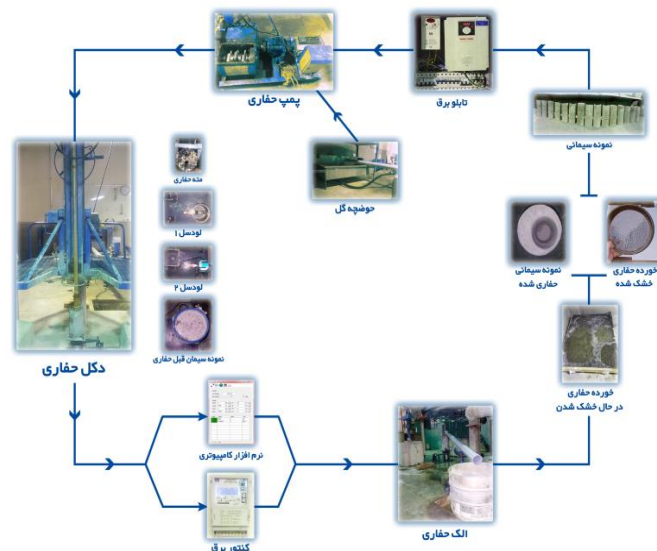
۲. سابقه تحقیق

با صرف انرژی کمتر، حجم بیشتری از یک سنگ حفاری شود در نتیجه انرژی ویژه کمتر و بازدهی عملیات بالاتر خواهد بود (Teale, 1965). پارامترهای مؤثر بر انرژی ویژه را می‌توان به دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم‌بندی نمود. تحلیل و بررسی انرژی ویژه می‌تواند دید مؤثری در جهت اشراف به میزان تأثیرگذاری پارامترهای اعمالی در عملیات حفاری به متخصصان ارائه دهد (Nguyen, 1996). با انجام آزمایشات حفاری می‌توان میزان نرخ نفوذ مته را با استفاده از خوانش و تحلیل انرژی ویژه حفاری پیش‌بینی کرد و امکان استفاده از انرژی ویژه حفاری در پیش‌بینی پارامترهای اعمالی حفاری وجود دارد (Caicedo and Calhoun, 2005). می‌توان پارامترهای حفاری را با مطالعه رفتار نموداری انرژی ویژه حفاری بهینه کرد (Koederitz and Dupriest, 2005). با بررسی اطلاعات چند چاه مجاور و مطابقت آنان با مفهوم انرژی ویژه حفاری می‌توان به بیشترین نرخ نفوذ رسیده و در هزینه‌های حفاری صرفه‌جویی نمود (Amadi, 2012). برای رسیدن به روابط مناسب و معقول بین پارامترهای کلیدی حفاری نیاز به انجام آزمایشات شبیه‌سازی شده با شرایط صنعت، رسم نمودارهای لازم، تحلیل آن‌ها و ارائه روابط ریاضیاتی است (Burmester, 2009). گشتاور اعمالی بر سرمته و نرخ نفوذ حفاری ارتباط تنگاتنگی با انرژی ویژه دارد (Bataee, 2014). افزایش نرخ نفوذ (KRALL, 2006) و

گشتاور اعمالی (Tuna, 2010) تا حدی انرژی ویژه حفاری (انرژی مورد نیاز برای حفاری حجم واحد سنگ) را کاهش می‌دهند. وزن روی سرمته و سرعت دوران آن (Erdoğan, 2018)، دبی و خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری و محاسبات هیدرولیکی از جمله موارد عملیاتی قابل کنترل خواص ژئومکانیکی از جمله موارد محیطی غیرقابل کنترل مؤثر بر عملیات حفاری مذکور هستند. افزایش سه پارامتر دبی سیال، سرعت چرخش و وزن روی سرمته تا حدی خاص، با ضریب‌های همبستگی جداگانه‌ای، موجب افزایش نرخ نفوذ خواهند شد (Bharadwaj, 2013). هامریک در سال ۲۰۱۱ ادعا نمود که با بهینه کردن انرژی ویژه می‌توان به بالاترین نرخ نفوذ دست‌یافت و وزن روی سرمته بالاترین تأثیر را بر انرژی ویژه دارد (Hamrick, 2011). البته عنایت به این نکته الزامی است که هرچه گشتاور اعمالی بر رشته حفاری کاهش یابد، عمر مفید موتورهای حفاری در عملیات‌های حفاری انحرافی و افقی افزایش می‌یابد، لذا استفاده بهینه از این شاخص در عملیات حفاری، حیاتی تلقی می‌شود. (Tuna, 2010)

۳. متدولوژی و دستگاه‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از دستگاه شبیه‌ساز عملیات حفاری دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است. شماتیکی از اجزای این دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از پروسه آزمایش و تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه

از نوع S در مقابل بازو، نیروی وارده به آن اندازه‌گیری شده است. گشتاور وارده، با ضرب کردن این نیرو در طول بازو مورد محاسبه قرار می‌گیرد. برای انتقال گشتاور به نیروسنج (لودسل) و کاهش اصطکاک، از یک یاتاقان^۴ کف گرد استفاده شده و به جهت اندازه‌گیری برق مصرفی مجموع تجهیزات درگیر در عملیات حفاری، از یک کنتور دیجیتال سه فاز استفاده شده است. کنتور مورد نظر با طراحی مناسب در مسیر جریان الکتریسیته ورودی به پمپ گل و دکل حفاری نشان‌دهنده میزان جریان الکتریسیته مصرفی این دو دستگاه برحسب کیلووات-ساعت می‌باشد و یک دیتا لاگر^۵ نیز داده‌های ارسالی توسط نیروسنج‌ها جهت محاسبه گشتاور و وزن اعمالی را در نرم‌افزار AL4 نشان می‌دهد.

بر اساس توضیحات فوق، امکان اعمال پارامترهایی چون سرعت چرخش رشته حفاری، وزن روی سرمته و دبی سیال حفاری توسط شبیه‌ساز مورد استفاده، به صورت عملیاتی وجود دارد. در سری تست‌های انجام شده، متغیرهای مطلوبی از جمله انرژی ویژه حفاری، نرخ نفوذ سرمته و گشتاور اعمالی بر نمونه قابل اندازه‌گیری بوده و انرژی ویژه حفاری از تقسیم انرژی مصرفی بر حجم حفاری شده توسط مته محاسبه شده است. جهت طراحی تست‌های آزمایشگاهی در این مطالعه از روش باکس-بنکن استفاده شده و در مجموع ۱۵ تست بر اساس جدول (۱) استخراج گشته است. برای تهیه نمونه سیمانی، سیمان پرتلند تیپ دو به مقدار ۷ کیلوگرم با ۳٫۱ لیتر آب شهری و بدون هیچ افزودنی دیگری با چگالی ۱۲۰ پوند به ازای هر فوت مکعب به درون قالب استاندارد به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر ریخته شده است. طبق تحقیقات انجام شده دوغاب سیمان تشکیل شده بدون هیچ افزودنی‌ای پس از ۴۸ ساعت به حدود ۴۵ درصد استحکام نهایی خود که حدود ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ پام می‌باشد و با توجه به سازندهای مورد حفاری در عملیات مقدار قابل استنادی برای شبیه‌سازی است، می‌رسد، لذا نمونه‌های سیمانی هر

در این دستگاه یک الکتروموتور ۴ کیلوواتی نقش چرخاننده رشته حفاری را ایفا می‌کند که به نوعی مشابه عملکرد سیستم تاپ درایو در مناطق عملیاتی می‌باشد. با بهره‌گیری از برق سه فاز این الکتروموتور امکان چرخش تا ۱۴۴ دور در دقیقه را فراهم می‌آورد. نیروی دورانی این موتور الکتریکی به وسیله ۲ چرخ‌دنده و یک زنجیر به محل اتصال لوله‌های حفاری منتقل شده و رشته حفاری حول هرز گرد امکان چرخش می‌یابد. در محل گردن‌غازی چسبیده به هرزگرد، اتصال شلنگ خروجی از پمپ و رشته حفاری برقرار می‌شود. با توجه به اینکه موتور الکتریکی با جریان متناوب کار می‌کند، امکان تغییر دور آن به صورت مستقیم وجود ندارد. برای حل این مشکل از یک دستگاه پیش‌ران فرکانس متغیر^۱ یا اینورتر در سر راه کلید موتور استفاده شده است تا امکان تغییر دور مهیا گردد. دستگاه پیش‌ران فرکانس متغیر با تغییر فرکانس امکان تغییر دور موتور ۴ کیلوواتی را فراهم می‌سازد و در صورت برخورد با مانع و نیاز به گشتاور بیشتر، می‌تواند با افزایش ولتاژ، دور موتور را تأمین کرده و ثابت نگه دارد. برای گردش گل از یک پمپ تریپلکس الکتریکی ۱۵ کیلوواتی با سه کلاچ استفاده شده است. پمپ یادشده قابلیت پمپاژ گل با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، ۲۰ لیتر بر دقیقه و ۵۰ لیتر بر دقیقه را دارا است. در این پژوهش تنها از آب شهری به عنوان سیال حفاری استفاده شده است. یک مته ۳ اینچی با دندان‌های ثابت^۲ از جنس تنگستن کار باید برای فرایند حفاری نمونه سیمانی مورد استفاده قرار گرفته و مته مد نظر دارای دو نازل نیم اینچی بوده است. مکانیزم حفاری این مته از نوع سایشی بوده که با خراشیدن سطح نمونه عمل می‌کند. وزن روی سرمته از طریق کنترل کسری از وزن الکتروموتور و تجهیزات کالسکه بالابر، به کمک کابلی که از دراورکس دستگاه به سمت تاج چاه رفته، اعمال شده است. با قرار دادن یک نیروسنج (لودسل^۳) نوع S در زیر نمونه میزان وزن اعمال شده بر روی مته اندازه‌گیری گردیده و با قرار دادن یک نیروسنج (لودسل)

^۱ Variable Frequency Drive (VFD)

^۲ Fixed cutter

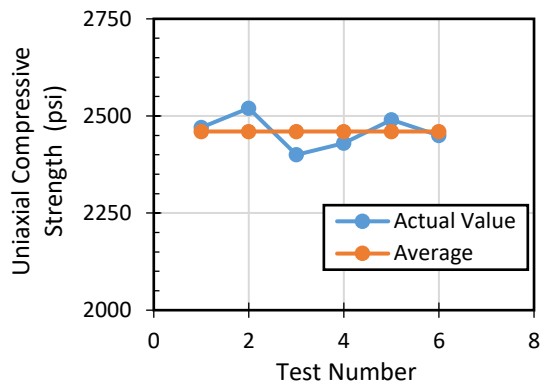
^۳ Load cell

^۴ Bearing

^۵ Data Logger

فصل نامه علمی ژئومکانیک نفت؛ دوره ۴؛ شماره ۱؛ بهار ۱۴۰۰، مقاله پژوهشی

کدام پس از ۴۸ ساعت از ساخت حفاری شده‌اند. شش نمونه



شکل ۲. مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های سیمانی

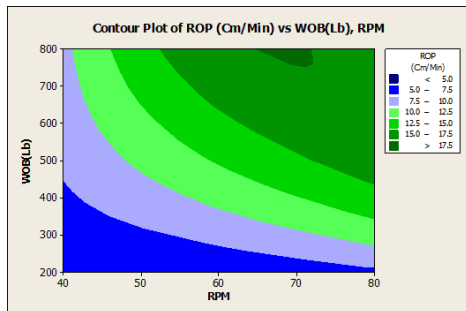
سیمانی با دستور ساخت یکسان با نمونه‌های آماده‌شده به جهت حفاری، برای انجام تست مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت تک‌محوره، آماده‌شده است. نتایج شش آزمایش بر روی نمونه‌های سیمان آماده‌شده در قالب ویژه، فشار از هم فروپاشیدگی نمونه سیمان را بین ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ پام نشان داد که این مقدار با استانداردهای *ASTM* مطابقت دارد. مقادیر مربوطه در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. (لببیزاده، ۱۳۹۰)

۴. ارائه نتایج و بحث

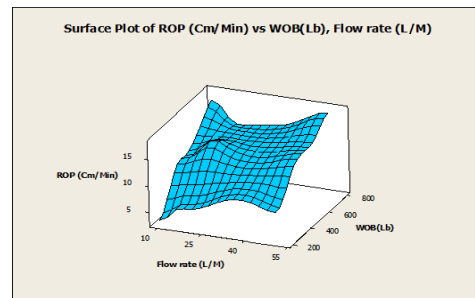
در جدول (۱) خلاصه‌ای از مقادیر ورودی و همچنین مقادیر کمی خروجی به‌دست‌آمده در طول تست‌ها ذکر شده است.

جدول ۱. مقادیر ورودی و خروجی تست‌ها

شماره تست	وزن روی مته (lb)	دبی سیال (L/min)	دور مته (rpm)	طول حفاری (cm)	زمان حفاری (sec)	نرخ نفوذ (cm/min)	گشتاور اعمالی (lb.ft)	D50 (micron)	انرژی ویژه (psi)
1	200	20	40	25	290	5.17	12	1050	44490
2	200	10	60	24	452	3.18	11	700	68430
3	200	50	60	24	183	7.86	14	1485	79576
4	200	20	80	25	216	6.94	10	980	31755
5	500	10	40	25	340	4.41	17	930	36519
6	500	20	60	28	111	15.13	14	1230	17596
7	500	10	80	25	85	17.64	16	900	26277
8	500	10	60	27	158	10.25	21	1050	20898
9	500	50	80	27	94	17.23	20	1475	30025
10	500	50	40	25	132	11.36	22	1550	44007
11	500	20	80	27	118	13.72	18	1210	17955
12	800	20	40	27	175	9.25	31	1430	22171
13	80	10	60	28	102	16.47	25	1225	17740
14	80	20	80	27	100	16.2	28	1285	13798
15	80	50	60	25	90	17.33	33	1605	28952



ب. نمودار نفوذ مته در قبال وزن و نرخ چرخش مته

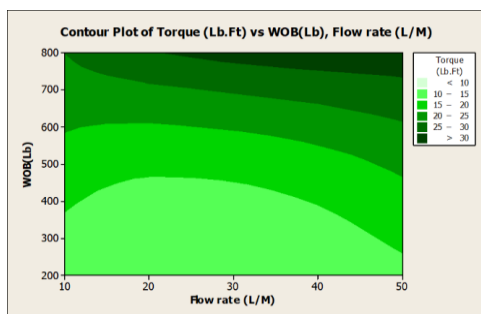


الف. نمودار نفوذ مته در قبال وزن و دبی سیال حفاری

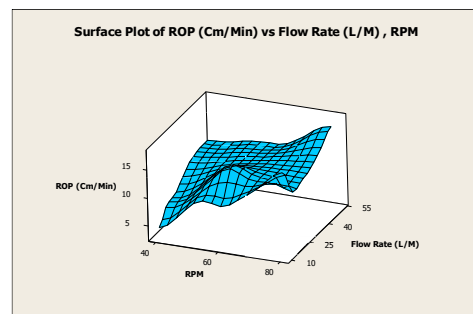
شکل ۳. نمودار نفوذ مته در قبال وزن، نرخ چرخش مته و دبی سیال حفاری

کاهش داده تا با افزایش مجدد دبی سیال با توجه به افزایش وزن روی مته مقدار نرخ نفوذ مته به حداکثر میزان خود برسد. در شکل (۳ ب.) مشخص است که با افزایش نرخ چرخش مته توانایی برش نمونه توسط مته افزایش یافته و در کنار افزایش وزن بر روی سر مته سبب افزایش نرخ نفوذ مته می شود و البته نشان داده شده است در هنگامی وزن بالایی روی مته حفاری می باشد اعمال بیش از حد نرخ چرخش بر مته می تواند سبب کاهش نرخ نفوذ گردد به طوری که با اعمال وزن حدود ۸۰۰ پوند بر روی مته و نرخ چرخش مته با ۷۰ دور در دقیقه، نرخ نفوذ بهتری را نسبت به چرخش ۸۰ دور در دقیقه تأمین کرده است.

شکل (۳ الف.) نشان می دهد با افزایش دبی سیال حفاری و وزن روی مته، از آنجایی که با افزایش وزن نیروی ورودی به نمونه حفاری افزایش می یابد و با افزایش دبی سیال، تمیزکاری خرده های حفاری بهبود می یابد، نرخ نفوذ به فزونی می گذارد. با این تفاوت که افزایش دبی سیال حفاری به صورت یکنواخت ولی با شیب کم سبب افزایش نرخ نفوذ شده اما افزایش وزن به شکل غیر یکنواخت ولی با تأثیرگذاری بیشتر از دبی سیال حفاری، سبب افزایش نرخ نفوذ گردیده است. نکته مهمی که در نمودار قابل برداشت می باشد آن است که اعمال وزن حدود ۵۰۰ پوند و دبی سیال در حدود ۲۰ لیتر در دقیقه شرایط بسیار مناسبی را برای نرخ نفوذ مته حفاری فراهم نموده است اما پس از اعمال وزن بیشتر، نیاز به افزایش دبی سیال حفاری با هدف تمیز سازی چاه، نرخ نفوذ مته را



ب. نمودار گشتاور اعمالی در قبال وزن و دبی سیال



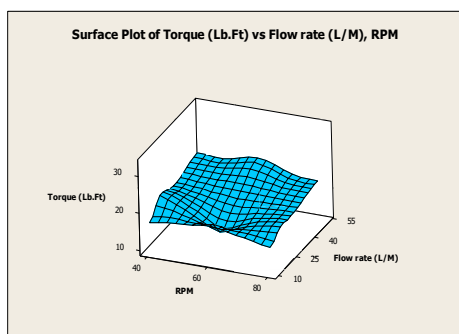
الف. نمودار نفوذ مته در قبال دبی سیال و نرخ چرخش مته

شکل ۴. نمودار گشتاور اعمالی در قبال وزن و دبی سیال (الف) - نمودار نفوذ مته در قبال دبی سیال و نرخ چرخش مته (ب)

افزایش این دو عامل افزایش چشم گیر نرخ نفوذ را در پی خواهد داشت. البته که شایان ذکر است با توجه به نمودارهای بررسی شده قبلی تأثیر وزن اعمالی بر سر مته بیش از سرعت

در شکل (۴ الف.) افزایش سرعت چرخش سر مته باعث هرچه بیشتر شدن برش های مته شده و دبی سیال حفاری سبب بهتر شدن تمیزکاری خرده های حفاری می شود بنابراین

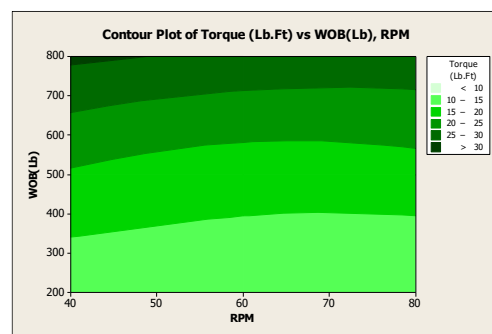
شد و این مهم عاملی است برای افزایش گشتاور اعمالی. البته در وزن‌های اعمالی پایین افزایش نرخ پمپاژ سیال از حدود ۲۰ لیتر در دقیقه تا حدود ۳۰ لیتر در دقیقه سبب کاهش گشتاور اعمالی شده ولی این مهم در وزن‌های بالای ۶۰۰ پوند اتفاق نمی‌افتد. در کل می‌توان گفت افزایش وزن و نرخ پمپاژ سیال حفاری توأمان باهم، سبب افزایش گشتاور اعمالی سر مته بر محیط حفاری می‌شود.



ب. نمودار گشتاور اعمالی در قبال دبی سیال حفاری و نرخ چرخش مته

چرخش سرمته و دبی سیال حفاری می‌باشد. در کل می‌توان نتیجه گرفت انتخاب متعادل توأمان دبی سیال حفاری و نرخ چرخش مته، عاملی کلیدی و حیاتی در بهینه‌سازی نرخ نفوذ می‌باشد.

شکل (۴ ب.) نشان‌دهنده نمودار سه‌بعدی کانترپلات می‌باشد در این نمودار به‌وضوح تأثیر وزن بر روی گشتاور اعمالی مته مشخص است و نشان داده می‌شود که در اثر افزایش نرخ پمپاژ سیال حفاری فضای تحت حفاری هر چه بهتر پاک‌سازی شده که این عامل باعث تماس هر چه بیشتر سرمته با نمونه خواهد

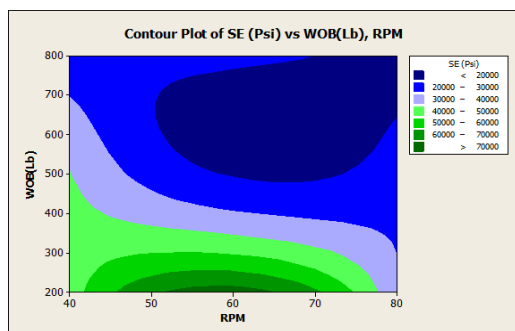


الف. نمودار گشتاور اعمالی در قبال وزن و نرخ چرخش مته

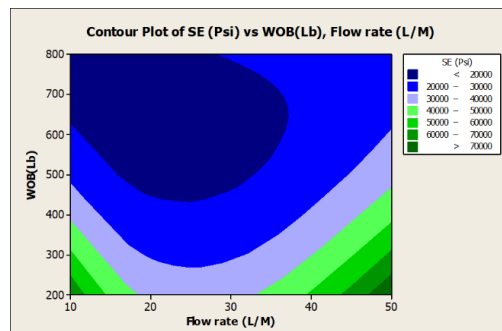
شکل ۵. نمودار گشتاور اعمالی در برابر وزن و نرخ چرخش مته (الف) در برابر سیال حفاری، نرخ چرخش مته (ب)

نمودار *surface plot* در شکل (۵ ب.) نشانگر این مهم است که با توجه به تأثیر کم هر دو شاخص نرخ چرخش مته و همچنین دبی سیال حفاری، در اثر تغییرات این دو پارامتر، گشتاور اعمالی بر روی مته دستخوش تغییرات زیادی نخواهد شد. باین حال کم بودن نرخ چرخش مته و زیاد بودن نرخ پمپاژ سیال حفاری بیشترین گشتاور اعمالی ممکن را تأمین کرده است زیرا که افزایش دبی سیال باعث تمیزکاری بهتر فضای نمونه شده پس بنابراین درگیری مته با نمونه حفاری افزایش یافته و گشتاور اعمالی رو به فزونی می‌گذارد اما افزایش سرعت چرخش مته به دلیل اعمال برش‌های بهتر باعث درگیری کمتر سر مته با نمونه حفاری خواهد شد که این مهم عاملی برای کاهش گشتاور اعمالی سر مته بر نمونه حفاری است. در هنگامی که نرخ چرخش مته حدود ۶۰ دور در دقیقه بوده و حداقل درگیری در اثر چرخش مته با نمونه سیمان در حال حفاری وجود داشته است، شاهد کمترین گشتاور اعمالی بوده‌ایم.

در شکل (۵ الف.) می‌توان تأثیر بسیار بیشتر وزن بر گشتاور اعمالی را نسبت به نرخ چرخش مته مشاهده نمود؛ زیرا که نیروی اعمالی بسیار بیش از سرعت چرخش مته سبب درگیری مته با نمونه مورد حفاری می‌شود. مشخص است که برای اعمال گشتاور حداکثری باید از حداقل سرعت چرخش مته با بیشترین وزن اعمالی ممکن بهره جست زیرا که افزایش سرعت چرخش مته سبب برش بهتر نمونه حفاری شده پس درگیری با نمونه را در هنگام حفاری کاهش داده و گشتاور اعمالی (البته با ضریب همبستگی پایین) کاهش می‌یابد؛ اما از آنجایی که پارامتر تأثیرگذار بر گشتاور اعمالی در بین سرعت چرخش مته و وزن اعمالی، در اصل تنها وزن اعمالی است لذا طبق نمودار، امکان دسترسی به گشتاور اعمالی بالایی با لحاظ کردن تنها این دو شاخص وجود ندارد و برای اعمال گشتاور بیشتر، نیاز به افزایش نرخ پمپاژ سیال حفاری می‌باشد. افزایش سرعت چرخش مته نیز اثر خود را بر کاهش گشتاور اعمالی نموده است.



ب. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال وزن و نرخ چرخش مته

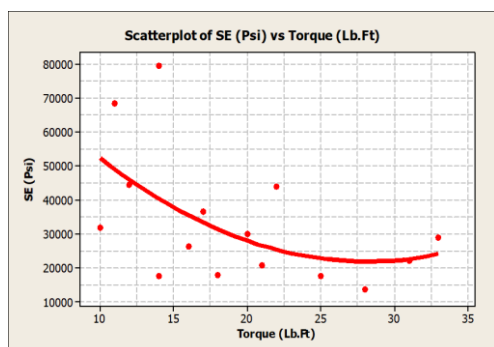


الف. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال وزن و نرخ پمپاژ سیال حفاری

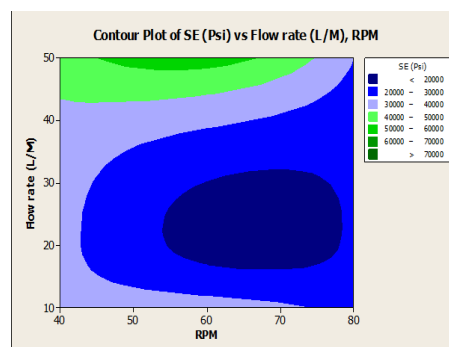
شکل ۶. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال وزن، نرخ چرخش مته و نرخ پمپاژ سیال حفاری

مته نیز گاهی توانایی جبران آن را ندارد و انرژی ویژه حفاری با وجود افزایش وزن سرمته افزایش می‌یابد. از آنجایی که به ازای افزایش نرخ چرخش مته در راستای افق نمودار قرار گرفته در شکل (۶ ب)، تغییرات زیادی در انرژی ویژه حفاری دیده نمی‌شود لذا می‌توان دریافت که تغییرات انرژی ویژه حفاری در اثر تغییرات وزن اعمالی نسبت به تغییرات سرعت چرخش مته بسیار بیشتر و چشم‌گیرتر می‌باشد. با این حال افزایش سرعت چرخش مته و به خصوص رسیدن آن به بازه ۶۰ تا ۷۰ دور در دقیقه تأثیر مثبتی در کاهش انرژی ویژه حفاری داشته است زیرا که با افزایش توان برش مته با صرف انرژی کمتر امکان حفاری بیشتر مهیا خواهد شد و به شاخص وزن اعمالی در این راستا کمک می‌شود.

نمودار زیر در قالب شکل (۶ الف) نشان می‌دهد که اگر نرخ پمپاژ مته به صورت بهینه انتخاب گردد (بین ۲۰ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه) با تأثیر مثبت و مؤثر سیال حفاری در وزن‌های پایین‌تر از ۵۰۰ پوند نیز امکان رسیدن به حداقل انرژی ویژه حفاری وجود دارد چرا که با انتخاب دبی بین ۲۰ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه نیاز تمیزکاری فضای حفاری تا حد مورد قبولی تأمین می‌شود و همچنین با جلوگیری از پمپاژ بیش از نیاز سیال حفاری توسط پمپ، انرژی الکتریسیته اضافی به وسیله پمپ مصرف نمی‌شود؛ اما اگر دبی سیال حفاری به شکل بهینه انتخاب نگردد اعمال وزن ۸۰۰ پوندی نیز امکان رسیدن به مصرف انرژی ویژه حفاری پایین را سلب می‌کند زیرا الکتریسیته مصرفی پمپ با دبی بالا به قدری بر انرژی ویژه حفاری تأثیر منفی می‌گذارد که حتی اثر مثبت افزایش وزن بر روی سر



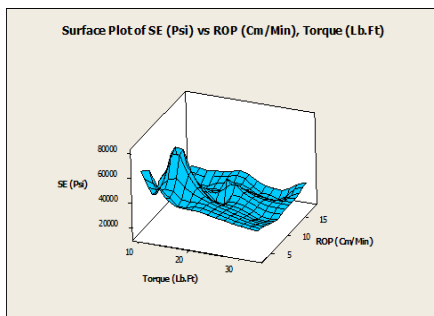
ب. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال گشتاور اعمالی



الف. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال دبی سیال حفاری و نرخ چرخش مته

شکل ۷. نمودار انرژی ویژه حفاری در برابر گشتاور اعمالی، دبی سیال حفاری و نرخ چرخش مته

و نرخ چرخش مته کم باعث مصرف انرژی ویژه بسیار زیاد و نامناسب می‌شود. افزایش گشتاور اعمالی در ابتدا با شیب تند سبب کاهش انرژی مصرفی ویژه می‌شود زیرا که گشتاور اعمالی بر سر مته، عاملی به جهت بهبود شرایط حفاری می‌باشد ولی پس از رسیدن به نقطه کمینه بهینه (۲۸ پوند. فوت) رفتار انرژی ویژه حفاری تغییر کرده و با افزایش گشتاور اعمالی انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد چرا که انرژی مصرف شده برای اعمال گشتاور مد نظر بیشتر از بازدهی آن انرژی بود و حفاری را از شرایط بهینه خارج نموده است. شکل (۷ ب.) نشان‌دهنده توضیحات ارائه شده می‌باشد.

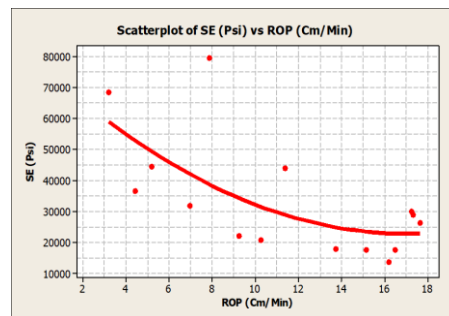


ب. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال نرخ نفوذ مته و گشتاور اعمالی

شکل ۸. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال نرخ نفوذ مته و گشتاور اعمالی

می‌کند چرا که توأمان مترای حفاری برحسب زمان و همچنین نیروی گشتاور اعمالی سر مته به نمونه به جهت حفاری افزایش می‌یابند و این مهم تأثیر مثبتی بر عملیات حفاری خواهد داشت و سبب کاهش انرژی ویژه حفاری خواهد شد. هنگامی که این مقادیر به حدود گشتاور ۲۸ (پوند. فوت) و حدود نرخ نفوذ ۱۵ (سانتی‌متر بر دقیقه) برسند، پس از افزایش هر دو شاخص و فراتر رفتن آن‌ها از موارد ذکر شده به‌طور مجدد انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد زیرا از نقطه کمینه به بعد طبق شکل (۷ ب.) افزایش گشتاور اعمالی سبب بیشتر شدن انرژی ویژه حفاری خواهد شد و طبق شکل (۸ ب.) افزایش نرخ نفوذ مته نیز تأثیری در کاهش انرژی ویژه حفاری نخواهد داشت بنابراین شاهد افزایش انرژی ویژه حفاری خواهیم بود.

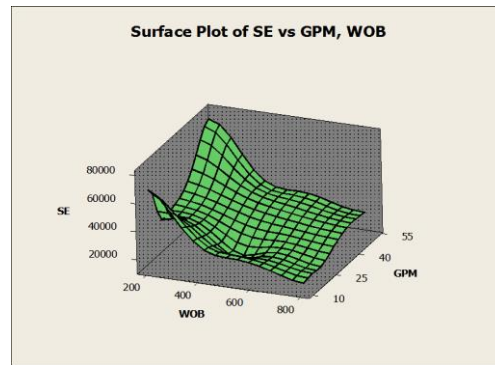
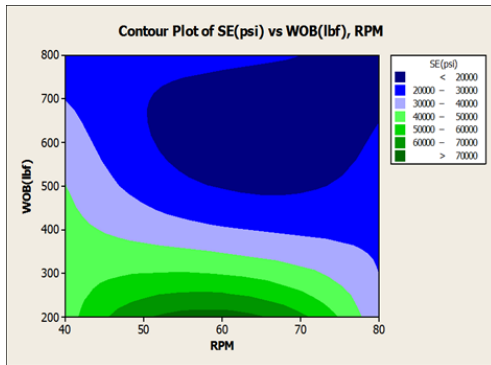
شکل (۷ الف.) نشان می‌دهد که برای به دست آمدن حداقل انرژی ویژه حفاری ممکن، باید مقادیر بهینه‌ای برای نرخ چرخش مته و نرخ پمپاژ سیال حفاری انتخاب گردد. چرا که انتخاب دبی بین ۲۰ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه هم امکان تمیزکاری مناسب و مقبول را فراهم آورده و هم باعث مصرف انرژی بهینه توسط پمپ سیال حفاری می‌شود و در کنار آن افزایش سرعت چرخش مته سبب افزایش توان حفاری شده و انرژی ویژه حفاری را بهینه می‌نماید. همان‌طور که مشخص است بهترین ناحیه برای حفاری با انتخاب دبی سیال حفاری در حدود ۲۰ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه به همراه نرخ چرخش مته در حدود ۵۵ تا ۷۵ دور در دقیقه حاصل شده و پمپاژ حداکثری سیال حفاری



الف. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال نرخ نفوذ مته

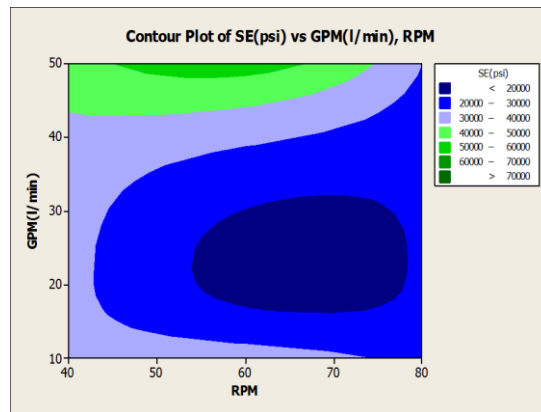
شکل (۸ الف.) نشان می‌دهد که در اثر افزایش نرخ نفوذ مته، انرژی ویژه حفاری به شدت کاهش می‌یابد. می‌توان گفت هرچه نرخ نفوذ بیشتر افزایش پیدا کند به این معنا است که سه پارامتر اعمالی ورودی تأثیرگذار بر نرخ نفوذ (وزن روی مته، سرعت چرخش مته و دبی سیال) بهینگی انتخاب بیشتری خواهد داشت بنابراین انرژی ویژه حفاری کمتری به جهت حفاری مصرف خواهد شد ولی پس از رسیدن به مقداری کمینه کاهش انرژی ویژه حفاری متوقف می‌شود زیرا در آن لحظه عملیات در نقطه کمینه قرار گرفته و امکان کاهش بیشتر انرژی ویژه حفاری وجود نخواهد داشت و مقدار آن ثابت خواهد ماند.

شکل (۸ ب.) به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش هم‌زمان گشتاور اعمالی و نرخ نفوذ مته، انرژی ویژه حفاری کاهش پیدا



ب. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال وزن و نرخ چرخش مته

الف. نمودار سه بعدی انرژی ویژه حفاری در قبال وزن روی مته و دبی سیال حفاری

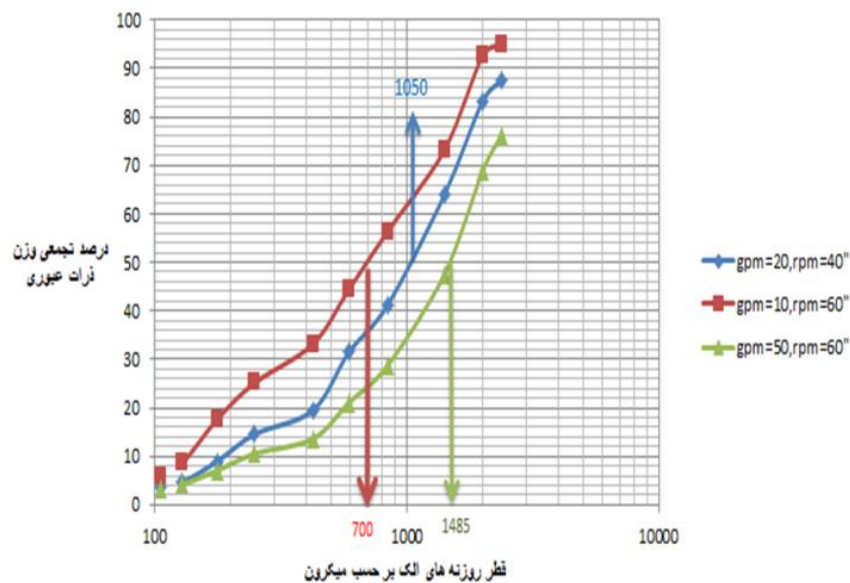


پ. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال نرخ سیال تزریقی و نرخ چرخش مته
شکل ۹. نمودار انرژی ویژه حفاری در قبال وزن روی مته، دبی سیال و نرخ چرخش مته

می باشد. در شکل (۹ پ) رنگ آبی پر رنگ نشانگر محل هایی با کمترین انرژی ویژه است که در دورهای بالا و دبی ۱۵ تا ۳۰ لیتر بر دقیقه قرار گرفته است با بررسی این شکل می توان دریافت که دبی سیال از اهمیت بیشتری نسبت به دور مته برخوردار است به طوریکه در دبی های پایین و بالا اثری از نقطه بهینه تابع هدف موجود نمی باشد. همچنین بیشترین مقادیر تابع هدف نیز در دبی های بالا رخ داده که نشان از تأثیر زیاد این عامل در تابع هدف می باشد.

نمودار سه بعدی شکل (۹ الف) نشان می دهد که انرژی ویژه با وزن روی مته رابطه ای معکوس با ضریب همبستگی بالا دارد به طوریکه با افزایش بار روی مته، انرژی ویژه به طور محسوسی کاهش می یابد. با بررسی دبی سیال می توان یافت که با افزایش آن تا ۲۰ لیتر بر دقیقه سبب کاهش انرژی ویژه شده ولی پس از آن، بالا بردن دبی سیال می تواند انرژی ویژه را افزایش دهد.

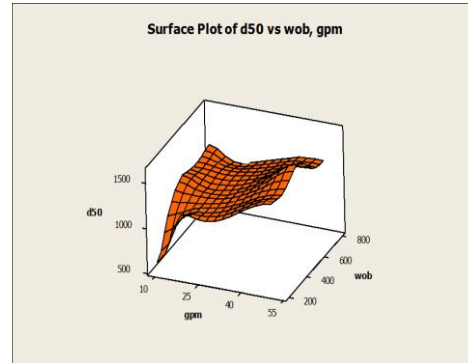
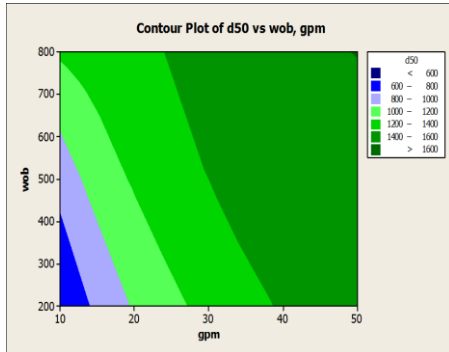
در شکل (۹ ب) نمودار کانترپلات انرژی ویژه بر حسب وزن و دور مته رسم شده است. رنگ آبی پررنگ، نقاط با کمترین انرژی ویژه را نمایش می دهند. نمودار به خوبی نشان می دهد که مقادیر کم انرژی ویژه در دورها و وزن های بالا اتفاق می افتد از طرفی قرار گرفتن نقاط آبی پررنگ در قسمت بالای نمودار نشانگر اهمیت بالای وزن و اثر آن بر تابع هدف



شکل ۱۰. نمودار دانه‌بندی نمونه‌های حفاری شده با وزن ۲۰۰ پوند

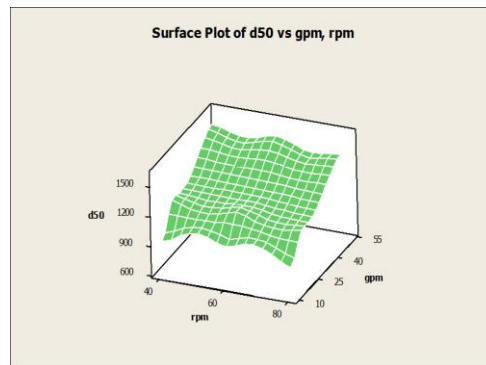
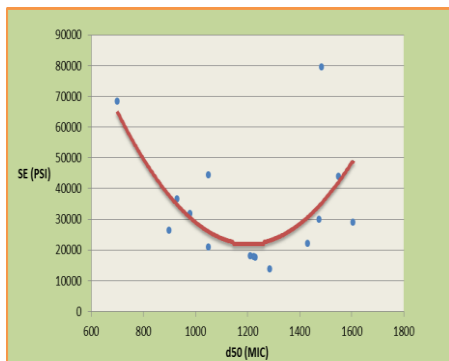
به شیب نمودار می‌توان دریافت که دبی سیال تأثیر بسزایی در تابع هدف دارد. همچنین همان‌طور که پیداست با افزایش دور مته عمدتاً سایز ذرات کاهش یافته است، به‌طور کلی دور مته رابطه معکوس با همبستگی ضعیف با تابع هدف دارد. این پارامتر نسبت به دبی سیال از اهمیت کمتری برخوردار است. در شکل ۱۱ ت، نمودار انرژی ویژه حفاری برحسب d_{50} نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست با افزایش سایز ذرات مقدار انرژی ویژه کاهش یافته اما رفته‌رفته با بیشتر شدن سایز آن‌ها از ۱۳۰۰ میکرون میزان تابع هدف افزایش یافته است بدین‌صورت می‌توان روند ارتباط بین این دو پارامتر را با معادله درجه دوم نشان داد که اکسترمم این نمودار شرایط بهینه مورد نظر ماست. با بررسی نقاطی که پس از نقطه اکسترمم قرار گرفته‌اند می‌توان یافت که همگی آن‌ها دارای ماکزیمم دبی سیال ۵۰ لیتر بر دقیقه می‌باشند و عامل افزایش انرژی آن‌ها بالا بودن بیش از حد این پارامتر می‌باشد. با استفاده از ریگرسیون در نرم‌افزار مینی تب ۱۶ برای هر یک از متغیرهای خروجی در این مطالعه، همان‌گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، رابطه‌ای بر اساس پارامترهای کلیدی عملیاتی ارائه شده است. برای ساده‌سازی و افزایش دقت فرمول ضرایبی که (P value) بالای ۰,۰۵ داشته‌اند حذف گردیده‌اند.

در شکل ۱۰، نمودار دانه‌بندی نمونه‌های حفاری شده با وزن ۲۰۰ پوند نشان داده شده است و مقادیر d_{50} بر روی آن‌ها مشخص شده است. با توجه به نمودار می‌توان یافت که با افزایش دبی در وزن ثابت، نمودارها به سمت راست رفته و سایز ذرات بزرگ‌تر شده است. با توجه به شکل (۱۱ الف) می‌توان یافت که با افزایش وزن، سایز ذرات نیز افزایش می‌یابد. بالا بردن بار روی مته سبب شده تا عمق نفوذ مته بیشتر شده و حجم بزرگ‌تری از سنگ را خراش دهد. همچنین با افزایش دبی سیال، مقدار d_{50} رشد پیدا می‌کند که می‌توان به تمیز سازی مؤثر ته چاه و جلوگیری از خرد شدن مجدد ذرات در زیر مته اشاره کرد. با توجه به نمودار کانتربلات شکل ۱۱ ب، می‌توان یافت که هر دو عامل وزن و دبی سیال رابطه مستقیم با همبستگی بالا نسبت به تابع هدف دارند. کمترین مقدار سایز ذرات در نواحی با دبی و وزن کم می‌باشد که با رنگ آبی پررنگ نشان داده شده است و بزرگ‌ترین سایز ذرات در نواحی با وزن و دبی بالا مشاهده می‌شود که با رنگ سبز پررنگ نشان داده شده است همچنین واضح است که تأثیر دبی سیال بیشتر از وزن روی مته می‌باشد. در شکل ۱۱ پ. نمودار سه‌بعدی d_{50} برحسب وزن روی مته و دور مته رسم شده است. بر طبق این شکل با افزایش دبی سیال، رشد تابع هدف مشاهده شده است با توجه



ب. نمودار کانطور d50 برحسب وزن روی مته و دبی سیال

الف. نمودار سه بعدی d50 در قبال وزن روی مته و دبی سیال



ت. نمودار انرژی ویژه حفاری برحسب d50

پ. نمودار سه بعدی d50 برحسب دبی سیال و دور مته

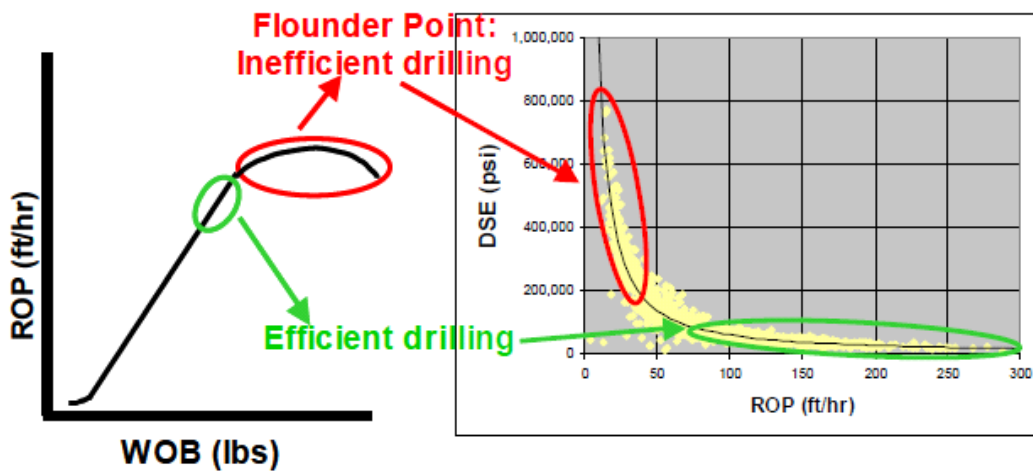
شکل ۱۱. نمودارهای d50 برای پارامترهای انرژی ویژه حفاری، وزن روی مته، دبی سیال و دور مته

جدول ۲. روابط ارائه شده برای محاسبه نرخ نفوذ، گشتاور اعمالی و انرژی ویژه

مشخصات	رابطه ارائه شده	R Square
نرخ نفوذ	$ROP = -3 \cdot 0.06703 + 0 \cdot 0.0199878 \cdot WOB + 0 \cdot 0.0824086 \cdot Q - 0 \cdot 0.000237015 \cdot WOB^2 + 0 \cdot 0.000312517 \cdot RPM \cdot WOB$	84.00%
گشتاور اعمالی	$T = 12 \cdot 4.973 - 0.0438823 \cdot RPM + 0.0000410328 \cdot [WOB]^2 + 0 \cdot 0.000202622 \cdot WOB \cdot Q$	94.16%
انرژی ویژه	$SE = 130798 - 203 \cdot 0.352 \cdot WOB - 2657 \cdot 0.61 \cdot Q - 245 \cdot 0.339 \cdot RPM + 0 \cdot 144356 \cdot [WOB]^2 + 48 \cdot 0.6135 \cdot Q^2$	87.69%

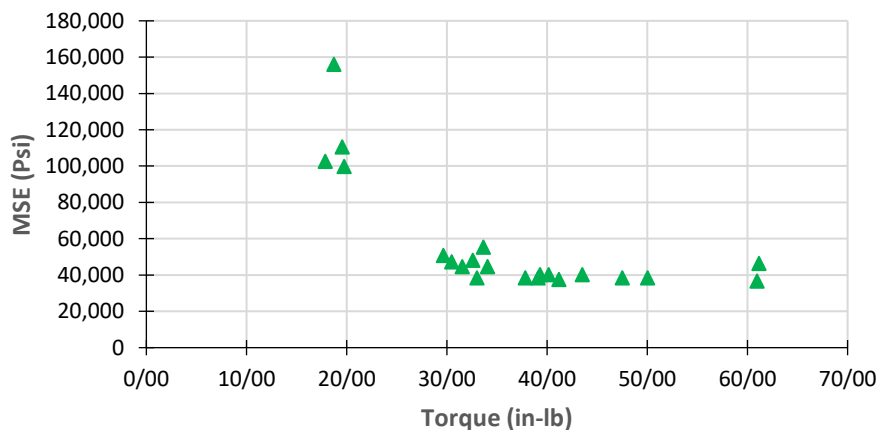
نمودار ارائه گشته در مطالعه، افزایش نرخ نفوذ تأثیر چندانی در انرژی مصرفی حفاری نخواهد داشت. بر طبق شکل ۱۳ هامریک^۷ نیز در سال ۲۰۱۱ با پژوهش خود بیان کرد که در ابتدا با افزایش گشتاور اعمالی بر نمونه حفاری انرژی ویژه حفاری افزایش یافته و پس از یک نقطه کمینه با افزایش گشتاور اعمالی، انرژی ویژه حفاری رو به فزونی می‌گذارد. (Hamrick, 2011)

آرمنتا^۶ نیز در سال ۲۰۰۸ همانند این مطالعه طبق شکل ۱۲ اثر وزن بر روی سر مته بر نرخ نفوذ را بسیار کلیدی دانسته و ذکر می‌نماید که اعمال بیش از حد وزن بر روی سر مته به علت گیرش سر مته شرایط بهینه نرخ نفوذ را از بین برده و سبب کاهش این شاخص می‌گردد. (Armenta, 2008, January) همچنین در بررسی صورت گرفته بر روی نرخ نفوذ و انرژی مصرفی، افزایش نرخ نفوذ در ابتدا با سرعت چشم‌گیری سبب کاهش انرژی ویژه حفاری شده و پس از مقداری مشخص همانند



شکل ۱۲. نمودار نرخ نفوذ برحسب انرژی مصرفی (Armenta, 2008, January)

MSE Optimization of Torque



شکل ۱۳. نمودار انرژی مصرفی برحسب گشتاور اعمالی

^۶ Armenta

^۷ Hamrick

۵. نتیجه گیری

مته بیشتر شده و حجم بزرگ تری از سنگ را خراش می دهد. با افزایش دبی سیال، مقدار $d50$ رشد پیدا می کند که می توان به تمیز سازی مؤثر ته چاه و جلوگیری از خرد شدن مجدد ذرات در زیر مته اشاره کرد. در رابطه با پارامتر دور مته رابطه دقیق و صریحی مشاهده نمی شود اما عمدتاً با افزایش آن سایز ذرات کاهش یافته است. با افزایش سایز ذرات مقدار انرژی ویژه کاهش یافته اما رفته رفته با بیشتر شدن سایز آن ها از ۱۳۰۰ میکرون، میزان تابع هدف افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش دبی بیش از نیاز جهت تمیز سازی چاه می باشد. سایز بهینه $d50$ که کمترین مقدار تابع هدف را داریم در مقدار ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ میکرون رخ می دهد. با توجه به معادله ارائه شده و آنالیز دیتاهای حاصل از آزمایشگاه، به ترتیب وزن روی مته، دبی سیال و دور مته بیشترین تأثیر را بر تابع هدف انرژی ویژه گذاشته و مینیمم تابع هدف در وزن ۷۰۰ پوند، دبی ۲۷ لیتر بر دقیقه و دور ۸۰ اتفاق می افتد.

۶. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۲. سیاهه‌ی نمادها

نماد	شرح
T	گشتاور اعمالی (پوند. فوت)
WOB	وزن روی مته (پوند)
Q	دبی سیال حفاری (لیتر/ دقیقه)
RPM	نرخ چرخش مته (دور/ دقیقه)
ROP	نرخ نفوذ مته (سانتی متر/ دقیقه)
SE	انرژی ویژه حفاری (psi)

در این مطالعه با بررسی پارامترهای عملیاتی کلیدی حفاری مانند وزن روی سرمته، دبی سیال حفاری و سرعت چرخش سرمته، رفتار متغیرهای مهمی چون نرخ نفوذ سرمته، گشتاور اعمالی بر نمونه و انرژی ویژه حفاری نمونه‌های سیمانی با هدف بهینه‌سازی عملیات حفاری و کاهش انرژی مصرفی در محل دکل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در انتها به بررسی ارتباط سایز خرده‌های حفاری با متغیرهای عملیاتی و انرژی ویژه پرداخته شده است.

انرژی ویژه حفاری، پارامتر مناسبی جهت اندازه‌گیری بازدهی عملیات حفاری می باشد که با بهینه کردن پارامترهای حفاری می توان آن را کاهش داد. این کار با طراحی دستگاه اندازه‌گیری انرژی مصرفی در مسیر جریان الکتریسیته انجام شد که این وسیله می تواند بر روی دستگاه‌های حفاری نیز تعبیه شود. در میان پارامترهای مذکور، وزن روی سرمته مهم‌ترین تأثیر را بر هر سه متغیر خروجی نشان داده است. این سه پارامتر اثر مستقیمی بر نرخ نفوذ سرمته داشته‌اند.

وزن روی سرمته و دبی سیال حفاری باعث افزایش گشتاور اعمالی بر نمونه شده و سرعت چرخش سرمته با تأثیر کمی سبب کاهش گشتاور اعمالی بر نمونه خواهد شد. با افزایش دبی سیال و یا وزن روی سرمته، نقاط کمینه در نمودار انرژی ویژه حفاری حاصل می شود که پس از این نقطه افزایش پارامترها سبب رشد در انرژی ویژه حفاری خواهد شد. با افزایش متغیر نرخ نفوذ سرمته، در ابتدا انرژی ویژه حفاری با روند قابل توجهی کاهش یافته ولی پس از یک حد آستانه، این روند ثابت خواهد شد. با افزایش متغیر گشتاور اعمالی بر نمونه حفاری، انرژی ویژه حفاری دارای یک نقطه کمینه خواهد بود. با افزایش وزن، سایز ذرات افزایش می یابد؛ زیرا که عمق نفوذ

۷. مراجع

Amadi, W.K., Iyalla, I.; "Application of Mechanical Specific Energy Techniques in Reducing Drilling Cost in Deepwater Development". In: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Society of Petroleum Engineers, 2012.

Armenta, M. (2008, January). Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Bataee, M., Irawan, S., & Kamyab, M. (2014). Artificial neural network model for prediction of drilling rate of penetration and optimization of parameters. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 57(2), 65-70.

Bharadwajç, A. M., & Vinayaka, S. (2013). Drilling optimization: a review. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*.

Burmester, K., Chando, J. M., & Vaczi, K. (2009, January). Execution Success in a Platform Drilling Campaign. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Caicedo, H.; Calhoun, W; "Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding Friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling Performance", *AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition*, Houston, TX, American Association of Drilling Engineers, 2005.

Dupriest, F. E., & Koederitz, W. L. (2005, January). Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. In *SPE/IADC drilling conference*. Society of Petroleum Engineers.

Erdoğan, Y., YILDIZ, M. İ., & Kök, O. E. (2018). Correlating Rate of Penetration with the Weighth on Bit, Rotation per Minute, Flow Rate and Mud Weight of Rotary Drilling. *Natural and Engineering Sciences*, 3(3), 378-385.

Hamrick, T. (2011). Optimization of operating parameters for minimum mechanical specific energy in drilling (No. TPR-3609). National Energy Technology Lab.(NETL), Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV (United States).

KRALL, M., DUPRIEST, F., & HARTLEY, F. (2006). New drilling process increases rate of penetration, footage per day. *Offshore (Conroe, Tex.)*, 66(1).

Nguyen, J. P. (1996). *Oil and Gas Field Development Technique: Drilling*. Éditions Technip.

Teale, R. (1965, March). The concept of specific energy in rock drilling. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73)*. Pergamon.

Tuna, E; "Real-Time-Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations". A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of Middle East Technical University. 2010.

مجتبی لیبب زاده ، بهزاد ذهبی زاده. " بررسی تغییرات مقاومت فشاری سیمان چاه‌های نفت و گاز تحت اثر تغییرات دما و فشار درون چاهی کامل " ششمین کنگره ملی مهندسان عمران ، دانشگاه سمنان. ۱۳۹۰