مقایسهٔ روش گردش وارون با روش‌های مرسوم حفاری از نظر سرعت، هزینه، نوع نمونه حاصل و راندمان عملکرد، مطالعهٔ موردی: معدن طلای اخترچی خمین

رضا احمدی؛ دانشگاه صنعتی اراک

تاریخ: دریافت ۹۸/۰۱/۱٤ پذیرش ۹۸/۰۲/۰۸

چکیده

در پژوهش حاضر روش حفاری گردش وارون (RC) با دیگر روش‌های مهم، متداول و کاربردی حفاری مانند روش گردش مستقیم و مغزه‌گیری از نظر معیارهای مختلف نظیر سرعت پیش‌روی (زمان) حفاری، قیمت (هزینه)، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان عملکرد حفاری، مقایسه شده است. هم‌چنین به‌عنوان یک بررسی میدانی در این پژوهش، گمانه‌های عمیق حفاری شده در معدن طلای اخترچی خمین واقع در استان مرکزی با دو روش حفاری RC و مغزه‌گیری، از جنبه‌های مختلف بررسی و مقایسه شد. در انتها نیز توانایی انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری از میان روش‌های مختلف بررسی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که روش حفاری RC در مقایسه با دیگر روش‌های حفاری به‌ویژه انواع متداول و پرکاربرد، از نظر معیارهایی مانند هزینه‌های حفاری و سرعت پیش‌روی (زمان) حفاری، بسیار مطلوب و از نظر میزان عمق (متراژ) حفاری، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان کلی عملکرد حفاری، مطلوب است. اگرچه روش حفاری مغزه‌گیری از نظر نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و نیز میزان عمق (متراژ) حفاری، با توانایی حفر گمانه‌های بسیار عمیق و گرفتن نمونه‌های مغزه‌ای، مطلوب‌ترین است اما در ارتباط با حفاری اکتشافی (به ویژه در مراحل اکتشاف تکمیلی) کانسارهایی که عیار پایینی دارند و اثرات ماده معدنی خیلی کم است (همانند کانسار طلای اخترچی خمین) و در نتیجه نیاز به حجم زیاد نمونه است، استفاده از روش حفاری RC مزیت نسبی داشته و دارای صرفه اقتصادی است.

واژه‌های کلیدی: حفاری گردش وارون (RC)، حفاری مغزه‌گیری، سرعت حفاری، هزینه حفاری، نمونه‌های حاصل از حفاری، معدن طلای اخترچی خمین.

*نویسنده مسئول rezahmadi@gmail.com

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

مقدمه

برای دست‌یابی به انواع مواد معدنی در درون زمین، اکتشاف و استخراج ذخایر هیدروکربوری، سفره‌های آب زیرزمینی، پژوهش‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی، نیاز به انجام عملیات حفاری‌های عمیق است. حفاری دارای روش‌های گوناگونی است که از دیدگاه‌های مختلف مانند سازوکار[1] خرد کردن سنگ، نوع انرژی به‌کار رفته و غیره به انواع مختلفی نظیر حفاری دستی[2]، حفاری ضربه‌ای[3]، حفاری کابلی[4]، حفاری دورانی[5] (چرخشی یا گردشی)، حفاری ضربه‌ای- دورانی[6] و حفاری مغزه‌گیری[7] تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. تا چند دههٔ قبل حفاری به‌صورت دستی متداول بود ولی از سال ۱۸۲۰ ماشین وارد کار حفاری شد؛ استفاده از ماشین بخار باعث ایجاد روش حفاری چرخشی شد و سیستم حفاری کابلی را توسعه داد. در سال ۱۸۵۰ لوازم حفاری مجهز به الماس شد و از روش‌های حفاری ضربه‌ای به‌وسیلهٔ انرژی هوای فشرده استفاده شد. در سال ۱۸۹۰ سیستم‌های حفاری ضربه‌ای- دورانی در آمریکا ساخته شد و در سال‌های۱۹۲۰ تا ۱۹٤۰ برای اولین بار مته‌هایی از جنس کربور تنگستن[8] در آلمان به‌کار رفت. از سال ۱۹۷۰ ماشین حفاری هیدرولیک ابداع شد و تلاش‌ها برای دسترسی به نفت و گاز در اوکلاهمای[9] آمریکا و سیبری شوروی با استفاده از این ماشین و حفر چاه‌هایی با عمق بیش از ده هزار متر به نتیجه رسید [۲].

بررسی روش‌های مختلف حفاری

در این بخش ویژگی‌های شاخص، مزایا و معایب روش‌های متداول حفاری، به‌طور مختصر بررسی می‌شود.

1. Mechanism
2. Hand held drilling
3. Percussive drilling
4. Cable-tool drilling
5. Rotary drilling
6. Percussive-rotary drilling
7. Core drilling
8. Tungsten-carbide
9. Oklahoma

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

۱. روش حفاری دستی

قدیمی‌ترین روش حفاری است که در آن نیروی لازم برای حفاری به‌وسیلهٔ خود انسان تأمین می‌شود. راندمان و سرعت کلی این نوع حفاری کم بوده است (حدود ۳۰ سانتی‌متر بر ساعت) که در سنگ‌های سخت این سرعت، کاهش بیش‌تری نشان می‌دهد به‌گونه‌ای‌که برای حفر یک چاه ۲ متری با دو عملگر[1]، حدود ۵ تا ٦ ساعت زمان نیاز است [۱]. افزایش هزینه نیروی کار و هم‌چنین راندمان کم حفاری دستی، باعث منسوخ شدن این روش حفاری شده و فقط در معادنی که به‌روش سنتی استخراج می‌شوند، از این روش برای حفر چال‌های انفجاری استفاده می‌شود.

۲. روش حفاری ضربه ای

حفاری ضربه‌ای تقریباً نوع پیشرفته حفاری دستی است که اساس کار آن اعمال ضربات متوالی است و نیروی لازم برای این ضربات با ماشین آلات تأمین می‌شود. مواردی مثل کاربرد و عملکرد ساده، استفاده در گسترهٔ وسیعی از انواع سنگ‌ها و قابلیت استفاده در زیر و بالای سطح ایستابی را می‌توان از مزایای این روش نام برد [۱]. در مقابل، کند و آهسته بودن در مقایسه با روش‌های دیگر، سنگینی وسایل حفاری، احتمال بروز مشکل در سازندهای تحکیم نیافته، نیاز به آب برای خارج کردن قطعات حفاری شده در چاه‌های خشک، اختلاط خرده سنگ‌های خروجی با دیواره چاه و عدم امکان بررسی‌های سنگ‌شناسی و دیگر پژوهش‌ها روی خرده سنگ‌های خروجی نیز از معایب این روش هستند.

۳. روش حفاری کابلی

روش حفاری کابلی از روش‌های قدیمی حفاری و زیرمجموعه روش ضربه‌ای است که برای حفر چاه‌های نیمه‌عمیق و بیش‌تر در زمین‌های سخت، چسبنده و یا سنگی بدون درزه و شکاف، قابل استفاده است. معمولاً این روش برای عمق کم‌تر از ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر کاربرد دارد [۱]. در حال حاضر در ایران این روش بیش‌تر برای حفر چاه‌های نیمه‌عمیق به‌ویژه چاه‌های اکتشاف آب، استفاده می‌شود. در جدول ۱ مزایا و معایب روش حفاری کابلی آورده شده است.

1. Operator

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ۱. مزایا و معایب روش حفاری کابلی

مزایا	معایب
دستگاه نسبتاً ارزان است و نیاز به انرژی خیلی کمی دارد.	نرخ نفوذ کمی دارد.
به‌دلیل کوچک بودن دستگاه، ماشین‌های این روش در شرایط سخت مثل کوهستانی که فضا کوچک است و شرایط جاده‌ای اجازه استفاده از تجهیزات بزرگ و سنگین را نمی‌دهد، قابل استفاده هستند.	هزینه جدارگذاری نسبتاً بالا است.
	برخی شرایط زمین‌شناسی ممکن است جدارگذاری را سخت کرده و تجهیزات مخصوص لازم باشد.
دست‌یابی به نمونه‌های معتبر از هر عمقی ممکن است.	در زمین‌های دارای شکستگی ممکن است رشته حفاری گیر کند.

٤. روش حفاری دورانی

در روش حفاری دورانی، ضربه و دوران دو عامل مهم برای نفوذ در سنگ است که مته هنگام تماس با سنگ با چرخش خود باعث تراشیده شدن سنگ می‌شود و نمونه مورد نظر و خرده‌های حفاری به‌وسیلهٔ سیال حفاری به سطح زمین منتقل می‌شوند. یکی از برتری‌های این روش نسبت به حفاری ضربه‌ای آن است که در زمین‌های درزه و شکاف دار نیز کارایی دارد و برای تمام سنگ‌ها با درجه سختی متفاوت حفاری، مناسب است. حفاری دورانی با توجه به هزینه زیاد راه‌اندازی اولیه، معمولاً در معادن کوچک کارآیی ندارد و در معادن بزرگ به‌دلیل سرعت چال زنی بالا استفاده می‌شود [۳]. روش حفاری دورانی به سه روش حفاری مغزه‌گیری، حفاری با گردش مستقیم سیال حفاری[1] (DC) و روش حفاری با گردش وارون سیال حفاری[2] (RC) انجام می شود.

۳-۱. روش حفاری مغزه‌گیری

برخی از حفاری‌های دورانی یا چرخشی همراه با مغزه‌گیری هستند، بدین‌صورت که با توجه به شکل و هندسه مته، مته در داخل سنگ فرو رفته و نمونه‌های استوانه‌ای (مغزه) گرفته می‌شود. از مزایای این روش امکان گرفتن نمونه‌هایی از سنگ به طول تا ٤/٥ متر [۱] و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ و از طرفی امکان دیدن نمونه‌ها و بررسی ویژگی‌های خاص مثل کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، درزه و شکاف و شکستگی، حفرات و

1. Direct circulation drilling system
2. Reverse circulation drilling system

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

محل تماس[1] لایه‌های مختلف سنگ در زیر زمین است. یکی از معایب روش مغزه‌گیری آن است که هر بار که عملیات مغزه‌گیری به پایان می‌رسد، برای بیرون آوردن مغزه از لوله درونی باید همه لوله را به سطح زمین آورد و همین عمل باعث اتلاف زمان و افزایش هزینه به‌دلیل باز و بسته کردن لوله‌ها و عملیات‌های دیگر می‌شود.

۳-۲. روش حفاری گردش مستقیم

درصد بسیار زیادی از حفاری‌های دورانی بر پایه به‌کارگیری روش گردش مستقیم استوار هستند. در این روش که یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های حفاری به‌شمار می‌رود، گل حفاری به‌وسیلهٔ یک پمپ از درون لوله حفاری به طرف سرمته تزریق می‌شود که عمل خنک کردن مته و رشته ابزار حفاری را نیز انجام می‌دهد. سپس گل حفاری و مواد کنده شده به‌صورت مخلوط درآمده و از فاصلهٔ لوله حفاری و جدار چاه به‌صورت جریانی نسبتاً آرام خارج می‌شود. مزایا و معایب این روش حفاری در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. مزایا و معایب روش حفاری گردش مستقیم

مزایا	معایب
در همهٔ مواد نرخ نفوذ زیادی دارد.	جمع‌آوری نمونه‌های دقیق نیازمند یک سری فرآیند خاص است.
در حین حفاری نیاز کمی به جداره گذاری دارد.	استفاده از سیال حفاری ممکن است باعث ایجاد شرایط خاص در سازند شود.
	این روش حفاری دشوار است و به خصوص در شرایط هوای سرد، صرفه اقتصادی ندارد.
تجهیز و باز کردن دستگاه خیلی سریع است و نیاز به زمان زیادی ندارد.	دستگاه این روش نگه‌داری زیادی لازم دارد و بیش‌تر دستگاه‌های آن دست کم دو عملگر نیاز دارند.
	مدیریت و نگه‌داری گل حفاری، مستلزم داشتن دانش و تجربه کافی است.

۳-۳. روش حفاری گردش وارون

هرگاه جهت جریان سیال مسیری خلاف جهت روش حفاری مستقیم داشته باشد، یعنی گل از فاصله جدار چاه و لوله حفاری وارد چاه شود و همراه با قطعات کنده شده از داخل لوله حفاری بالا آید، اصطلاحاً به این روش حفاری، روش گردش وارون می‌گویند (شکل ۱). در نوع پیشرفته روش حفاری گردش وارون، از یک لوله حفاری دو جداره استفاده شده و از چکش درون چاهی یا سیستم حفاری چرخشی و سرمته‌های مخصوص بهره می‌گیرند.

1. Contact

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

استفاده از لوله دو جداره باعث می‌شود نمونه‌های برداشت شده در طول مسیر حرکت با جداره چاه در تماس نباشد و کاملاً تمیز به سطح برسند.

سیستم حفاری اکتشافی RC با انجام نمونه‌گیری‌های پودری با درجهٔ خلوص و سرعت حفاری زیاد، کمک زیادی به سرعت و دقت عملیات اکتشاف کانسارها می‌کند. نمونه‌های تولیدی در این روش به‌صورت پودر خاک و سنگ و تکه‌های سنگ قسمت حفاری شده است که این نمونه‌ها ممکن است خشک یا همراه با کمی رطوبت باشند. جریان هوای داخل چرخه باعث می‌شود که نمونه پودری اغلب به‌صورت خشک جمع‌آوری شود ولی گاهی هم به‌دلیل آب‌های زیرزمینی یا آب گل حفاری، مرطوب هستند [۵]. نمونه پس از خروج از لوله داخلی مطابق شکل ۱ به یک سیکلون وارد شده و ذرات سنگین به درون کیسه جمع آوری وارد می‌شوند.

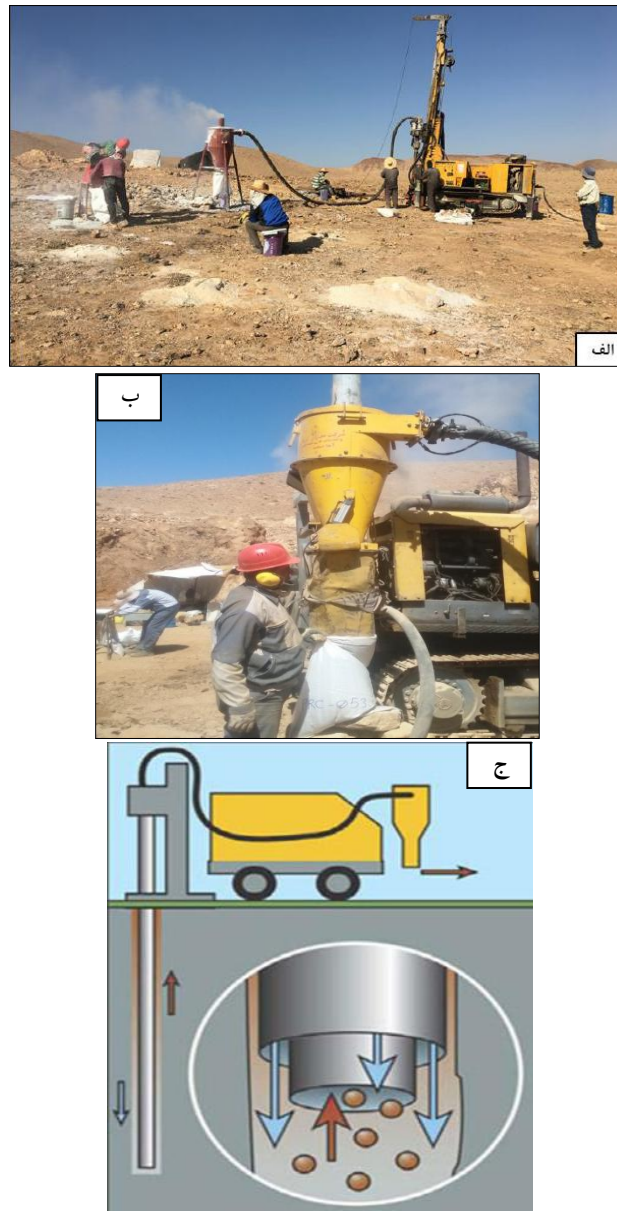
روش حفاری RC در حال حاضر یکی از روش‌های مرسوم حفاری است. رشته لوله حفاری دوقلوی دستگاه RC به‌منظور حفاری در زمین‌هایی مانند زمین‌های دارای درزه و شکاف و شکستگی، توسعه یافته که دیگر روش‌های حفاری در چنین مناطقی یا قادر به حفاری نیستند یا استفاده از آنها زمان بر و پرهزینه است. در سیستم حفاری RC از پمپ گل یا کمپرسور به‌عنوان وسیله به جریان انداختن سیال حفاری می‌توان استفاده کرد. البته استفاده هم‌زمان پمپ و کمپرسور میسر نیست و فقط باید یکی از این دو را مطابق روال زیر استفاده کرد:

تخلیه مکشی

تخلیه مکشی[1] از روش‌های وارون حفاری دورانی با استفاده از پمپ گل است. در این روش ابزاری روی لوله زانویی بالای پاورهد[2] (سر موتور) بسته می‌شود که با عبور سریع گل حفاری از درون آن، حالت مکش ایجاد کرده و از درون میله‌های حفاری که اکنون نقش لوله مکش را بازی می‌کنند، گل حفاری و طبیعتاً مواد کنده شده زیر مته را مکیده و از چاه خارج می‌کند. بیش‌ترین عمق حفاری که عملاً با این روش می‌توان به آن دست یافت، ۳۰ متر یا اندکی بیش‌تر است [۳].

1. Jet suction
2. Power head

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]



شکل ۱. الف) نمایی از عملیات حفاری به‌روش RC در معدن طلای اخترچی خمین، ب) نمایی نزدیک از سیکلون دستگاه حفاری RC، ج) شکل طرح وار از سیستم نمونه‌گیری به‌وسیلهٔ روش RC [٤]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

تخلیه با استفاده از هوای فشرده

روش حفاری تخلیه با استفاده از هوای فشرده[1] (ایرلیفت) از عملی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های حفاری RC است [٦] که در عین سادگی قدرت فوق‌العاده‌ای دارد. از این روش عمدتاً برای حفر چاه‌های عمیق آب، چاه‌های تهویه تونل‌های معدنی و ترافیکی و نیز چاه‌های تخلیه مواد معدنی استفاده می‌شود که در آنها بالابرهایی با ظرافت زیاد نصب می‌کنند. روش ایرلیفت در مناطق دارای تشکیلات شنی و ریگی عمیق، به‌طور متداول استفاده می‌شود و علاوه بر این در تشکیلات آهکی آبدار نیز راندمان زیادی دارد [۳].

مزایای روش RC

در برخی از پروژه‌های اکتشافی مانند پروژه‌های اکتشاف طلا، نقره، الماس یا مس، که با اثرات خیلی کم ماده معدنی مواجه هستند، حجم زیاد نمونه حاصل در روش RC یک مزیت خیلی مهم به حساب می‌آید و می‌تواند بسیار مفید باشد. براساس حفاری‌های انجام شده با روش RC در شمال کانادا، بازیابی نمونه در گمانه‌هایی با قطر ۹۲ میلی‌متر بسته به نوع سنگ، تقریباً برابر با ١٦/٤ کیلوگرم بر متر مکعب است [۷].

مهم‌ترین مزیت روش حفاری RC نسبت به‌روش مغزه‌گیری، میزان نرخ نفوذ (سرعت پیش‌روی) بالای آن است. نرخ نفوذ این روش بسته به شرایط زمین، اغلب از ۱۰۰ متر به ازای هر شیفت تجاوز می‌کند و باعث می‌شود که هزینه‌های عملیات حفاری تا حدود ٤٠ تا ٦٠ درصد کم‌تر از حفاری مغزه‌گیری باشد. به‌کمک حفاری RC می‌توان به عمق حدود ۸۰۰ متر نیز دست یافت. قطر حفاری در این روش بین ۸۹ تا ١٤٦ میلی‌متر است [۷]، [۸].

یکی از مزیت‌های کم‌تر مورد توجه قرار گرفته روش RC، مزیت زیست‌محیطی این روش است. اولین و شاید مهم‌ترین مزیت زیست‌محیطی این روش، نیاز خیلی‌کم و حتی صفر آن به آب است. این مزیت در زمین‌ها و پروژه‌هایی که دسترسی کمی به آب دارند یا آب آنها غیرقابل استفاده است یا نگه‌داری و انتقال آب، خیلی دشوار و پرهزینه است، مشخص می‌شود. در فصل زمستان زمین‌های یخ زده می‌توانند مشکلات خیلی زیادی مانند انجماد و استفاده بیش از اندازه نمک برای روش‌های متداول حفاری ایجاد کنند. به‌دلیل

1. Air lift

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

استفاده خیلی کم و بعضاً صفر آب در روش RC، این روش در چنین زمین‌هایی خیلی مفید و پرکاربرد است [۷]. مزایا و معایب روش حفاری RC در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳. مزایا و معایب روش حفاری RC

مزایا	معایب
در مقایسه با سایر روش‌ها، در این روش تخلخل و نفوذپذیری تأثیر زیادی در حفاری ندارد.	دستگاه حفاری گردش وارون و تجهیزات آن معمولاً خیلی گران و بزرگ هستند.
چاه‌هایی با قطر زیاد را می‌توان خیلی سریع و اقتصادی حفر کرد.	به‌علت بزرگی اندازه دستگاه، امکان حفاری در برخی مناطق وجود ندارد.
در حین حفاری جدارگذاری لازم نیست.	
نرخ نفوذ زیادی دارد.	برای عملکرد مؤثر در این روش، دقت بیش‌تری نسبت به‌روش‌های دیگر لازم است.
قابلیت حفاری در اغلب انواع سازندهای زمین‌شناسی را دارد.	

مقایسهٔ روش حفاری RC با سایر روش‌های حفاری

حفاری از پرهزینه‌ترین فرآیندهای معدن‌کاری به‌شمار می‌رود، بنابراین مهم‌ترین هدف در مهندسی حفاری، کاهش هزینه‌هاست و انتخاب درست روش حفاری می‌تواند در کاهش هزینه‌ها سهم به‌سزایی داشته باشد و هزینه‌ها به حداقل ممکن برسد. همواره تلاش برای کاهش هزینه‌ها در معادن، یکی از دلایل پیشرفت روش‌های موجود حفاری و ابداع روش‌های جدید بوده است. یکی از راهکارهای کاهش هزینه‌ها می‌تواند کاهش زمان حفاری با استفاده از افزایش سرعت پیش‌روی حفاری باشد. بنابراین بهینه‌سازی نرخ نفوذ[1] حفاری، از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در کاهش هزینه‌های حفاری است. به‌طور معمول عملیات بهینه‌سازی، براساس عملکرد حفاری‌های مشابه صورت می‌گیرد و نتایج آن در چاه مورد نظر استفاده می‌شود. از دیگر راهکارهای استفاده شده برای کاهش هزینه‌ها، استفاده بیشینه و بهینه از امکانات، دستگاه‌ها، تجهیزات، ابزارها و ماشین‌آلات است. اما با توجه به هزینه‌های روزانه دکل حفاری و هزینه‌های جانبی روزانه، استفاده بیشینه از ابزارآلات می‌تواند منجر به افزایش زمان عملیات حفاری و درنتیجه افزایش هزینه‌های دکل حفاری شده و صرفه‌جویی ناشی از استفاده بیشینه و بهینه از ابزارآلات را تحت تأثیر قرار دهد و یا حتی باعث افزایش هزینه‌های جانبی شود.

1. Penetration rate

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

تخمین بهترین زمان تعویض سرمته در حفاری، یکی از راهکارهای بهینه‌سازی عملیات حفاری و کاهش زمان حفاری به‌وسیلهٔ کاهش تعداد دفعات تعویض سرمته و تعداد دفعات لوله بالا و لوله پایین است. در صورتی که مته زودتر از زمان مقرر تعویض شود، تعداد دفعات بالا و پایین افزایش یافته و با افزایش زمان حفاری، هزینه‌های کلی حفاری افزایش می‌یابد [۹]. در صورتی که مته دیرتر از زمان مناسب تعویض شود، احتمال گیرافتادن سرمته وجود دارد که هزینه‌های زیادی به‌بار می‌آورد. با در نظر گرفتن همه عوامل مختلف مؤثر بر میزان هزینه‌ها، می‌توان دریافت که بهترین تصمیم ممکن برای بهینه‌سازی هزینهٔ حفاری، انتخاب بهترین روش ممکن برای حفاری است. این انتخاب با توجه به نوع نمونه مورد نیاز، نوع ماده معدنی و حتی مدت زمان منظورشده برای حفاری، صورت می‌گیرد.

در ادامه، روش حفاری گردش وارون با مهم ترین و متداول ترین روش‌های حفاری، از نظر معیارهای مختلف مقایسه شده است.

۱. مقایسه از نظر هزینه

جنس سنگ مورد حفاری، مهم‌ترین عامل در تعیین قیمت حفاری است و با سخت‌تر شدن جنس سنگ‌ها بدون توجه به‌روش استفاده شده، قیمت‌ها افزایش می‌یابد. یکی از علل استقبال زیاد کارفرماها از روش حفاری RC، قیمت مناسب این روش در مقایسه با روش‌های دیگر است. هزینه (قیمت روز در سال ۱۳۹۷) حفاری هر متر سنگ برای دو نوع سنگ یکی تراورتن (نوعی سنگ آهک به‌عنوان نماینده سنگ‌های نرم) و دیگری گرانیت (به‌عنوان نماینده سنگ‌های سخت) با سه روش حفاری RC، گردش مستقیم و مغزه‌گیری در جدول ٤ آورده شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که هزینهٔ حفاری هر متر سنگ از جنس نرم (تراورتن) با روش مغزه‌گیری تقریباً ۳/۳ برابر روش RC و با روش گردش مستقیم تقریباً ۱/۲ برابر روش RC است. هم‌چنین هزینه حفاری هر متر سنگ سخت (گرانیت) با روش مغزه‌گیری تقریباً ۲/٦ برابر روش RC و با روش گردش مستقیم تقریباً ۱/۳ برابر روش RC است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ٤. هزینه (قیمت روز در سال ۱۳۹۷) حفاری هر متر سنگ از نوع تراورتن و گرانیت با روش‌های مختلف حفاری (بر حسب هزار تومان) [۱۰،۱۱].

جنس سنگ / روش حفاری	گرانیت	تراورتن
گردش وارون	۳۵-٤۰	۲۰-۲۵
گردش مستقیم	٤۵-۵۵	۲۵-۳۰
مغزه‌گیری	۸۰-۱۲۰	٦۵-۸۵

علاوه بر هزینه اصلی حفاری که با توجه به متراژ حفاری محاسبه می‌شود، عوامل دیگری نیز در هزینه‌های تمام شده حفاری مؤثر هستند. از جمله این هزینه‌ها می‌توان به هزینه‌های مربوط به مواد مصرفی و ابزار استهلاک‌پذیر حفاری اشاره کرد. به‌طور مثال مته‌هایی که در عملیات حفاری استفاده می‌شوند، یکی از ابزارهای استهلاک‌پذیر به‌حساب می‌آیند و در یک عملیات حفاری ممکن است چندین بار تعویض مته ضرورت پیدا کرده و خرید مته لازم باشد.

قیمت مته‌های استفاده شده در روش RC، به‌مراتب پایین‌تر از مته‌های مورد نیاز در روش مغزه‌گیری است، بنابراین استفاده از روش RC از این جنبه هم اولویت پیدا می‌کند. یکی دیگر از عوامل مؤثر در هزینه‌های کل عملیات حفاری، سیال حفاری است. کنترل سیال حفاری و جلوگیری از هرزروی آن می‌تواند از تحمیل هزینه‌های اضافی جلوگیری کند. در روش RC به‌علت وجود رشته حفاری دوقلو، سیال حفاری از بین این دو لوله حرکت کرده و امکان هرزروی گل وجود ندارد [۱۲]. درحالی‌که در روش‌های گردش مستقیم و مغزه‌گیری احتمال هرزروی گل وجود دارد و در صورت وقوع این رخداد، هزینه‌های حفاری افزایش می‌یابد.

اگر در روش RC از هوا به‌عنوان سیال حفاری استفاده شود، برخلاف روش مغزه‌گیری، آب مورد نیاز در عملیات خیلی کم بوده و یا حتی به صفر می‌رسد. با توجه به این که تأمین آب مورد نیاز حفاری، مستلزم صرف هزینه است و این هزینه در مکان‌های کم آب یا مکان‌هایی که آب آن‌ها قابل استفاده نیست (به‌طور مثال آب‌های منجمد) ممکن است بسیار سنگین باشد، این ویژگی یکی از مزایای روش RC است و باعث کاهش هزینه‌های حفاری

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

می‌شود. از دیگر دلایل ارزان بودن روش حفاری RC نسبت به سایر روش‌ها، نیاز این روش به تعداد نیروی کار کم‌تر است که باعث کاهش هزینه حفاری می‌شود.

با در نظر گرفتن تمام هزینه‌های احتمالی و هم‌چنین بررسی تجربیات گذشته در زمینه حفاری با استفاده از روش‌های مختلف، به‌طورکلی روش RC در مقایسه با روش گردش مستقیم چیزی حدود ۲۰ تا ٤٥ درصد و در مقایسه با روش مغزه‌گیری چیزی حدود ٤٠ تا ٦٠ درصد ارزان تر است و در صورتی که نوع نمونه مورد نیاز، محدود کننده قدرت انتخاب روش حفاری نباشد، این روش نسبت به روش‌های دیگر اولویت بیش‌تری دارد.

۲. مقایسهٔ از نظر سرعت حفاری

مدت زمان انجام عملیات حفاری یکی از عوامل تأثیرگذار بر هزینه حفاری است. زمان حفاری به چندین عامل بستگی دارد که مهم‌ترین این عوامل، سرعت پیش‌روی حفاری است. هرچه سرعت حفاری بیش‌تر باشد، زمان حفاری کاهش یافته و به تبع آن هزینه صرف شده کاهش می‌یابد. به همین دلیل مقدار سرعت یکی از پارامترهای تعیین کننده در انتخاب روش حفاری است. عوامل زیادی مانند خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، عوامل زمین‌شناسی مانند لایه‌بندی، گسل، درزه و شکاف و شکستگی، عوامل دستگاهی، سازوکار پیش‌روی، تعداد دور مته، بار روی مته و قطر سرمته بر سرعت حفاری تأثیرگذارند.

با انتخاب روش حفاری با سرعت مناسب، می‌توان تا حد زیادی از صرف هزینه‌های اضافی ناشی از افزایش زمان، جلوگیری کرد. روش حفاری RC به‌دلیل سازوکار حفاری خود در بین روش‌های متداول حفاری، سرعت بیش‌تری دارد. به‌عنوان مثال در عملیات حفاری در معدن گرانیت اوره واقع در شهر نطنز استان اصفهان، در شیفت‌های ۱۰ ساعته با روش RC به‌طور میانگین حدود ۱۰۰ متر حفاری انجام شده در حالی که با روش گردش مستقیم متراژ حفاری از ۸۰ متر تجاوز نکرده است. در نقطه دیگری از این معدن به‌منظور نمونه‌برداری از اعماق، از روش مغزه‌گیری استفاده شده که میزان حفاری در هر شیفت کاری بین ۵ تا ۱۰ متر متغیر است و با روش‌های دیگر حفاری قابل قیاس نیست [۱۰]. هم‌چنین در حفاری‌های معدن سنگ تراورتن حاجی‌آباد محلات واقع در استان مرکزی، میزان حفاری‌های انجام شده در طول روزهای مختلف با استفاده از روش RC، بین ۱۱۰ تا ۱۵۰ متر متغیر بوده است. در

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

نقاط دیگر این معدن، متراژ حفاری در طول روز با روش گردش مستقیم بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ متر و با روش مغزه‌گیری بین ۱۲ تا ۲۰ متر متغیر بوده است و به‌ندرت از ۲۰ متر تجاوز کرده است [۱۱].

به‌طورکلی سرعت حفاری در سازندهای ماسه‌ای نرم، با روش RC حدود ۱۶ متر بر ساعت، با روش گردش مستقیم حدود ۱۱ متر بر ساعت و با روش مغزه‌گیری حدود ۱/۵ تا ۲ متر بر ساعت است. هم‌چنین سرعت حفاری در سازندهای رسی با روش RC حداکثر ۱۸ متر بر ساعت، با روش گردش مستقیم حدود ۱۰ تا ۱۳ متر بر ساعت و با روش مغزه‌گیری حدود ۱/۵ تا ۱/۹ متر بر ساعت است [۱۳]. در نمودار شکل ۲ سرعت روش‌های گوناگون حفاری (گردش وارون: RC، گردش مستقیم: DC و روش مغزه‌گیری: DD) در جنس‌های مختلف سنگ در یک شیف کاری ۱۰ ساعته مقایسه شده است.

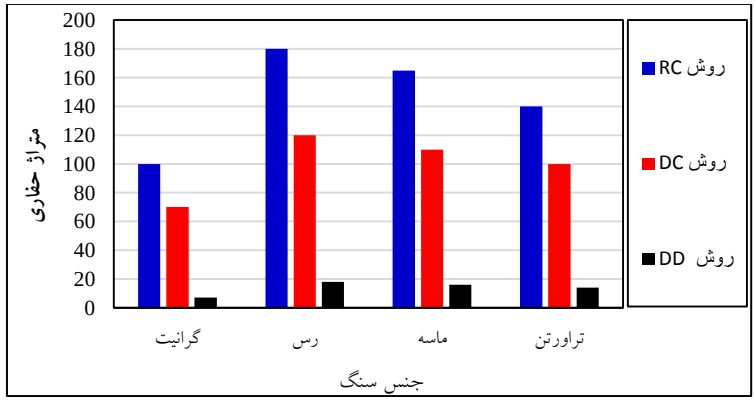
علاوه بر سرعت پیش‌روی مته در داخل سنگ، عوامل دیگری نیز بر سرعت حفاری تأثیرگذار هستند [۱۴]. از جمله این عوامل می‌توان به‌روش استفاده شده برای انتقال نمونه‌های حفاری شده به سطح زمین اشاره کرد. در روش حفاری مغزه‌گیری در هر بار عملیات، بعد از پایان حفاری، به‌منظور بیرون آوردن نمونه باید تمام رشته لوله حفاری را از داخل چاه بیرون کشید. عملیات بالا آوردن رشته لوله حفاری و فرستادن دوباره آن به داخل زمین، زمان زیادی لازم داشته و زمان حفاری را افزایش می‌دهد. در حالی که در روش‌های حفاری گردش مستقیم و RC، نمونه‌برداری به‌صورت پیوسته و در حین عملیات حفاری انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که سرعت بالا آمدن خرده‌های حفاری در روش RC نسبت به‌روش گردش مستقیم ۱۰ تا۳۰ برابر سریع تر است. به‌طورکلی سرعت حفاری RC حدود ۱/۲ تا ۳ برابر روش گردش مستقیم و حدود ۱۰ تا ۱۵ برابر روش حفاری مغزه‌گیری است [۱۳].

۳. مقایسهٔ از نظر نوع نمونهٔ حاصل

یکی از مهم‌ترین اهداف عملیات حفاری، نمونه‌برداری از مواد معدنی است. نمونه‌برداری در تمامی مراحل عملیات معدن‌کاری دارای اهمیت به‌سزایی است و تمام تصمیم‌گیری‌ها بر اساس آن انجام می‌شود. برداشت نمونه مناسب برای انجام پژوهش‌های میکروسکوپی و یا

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

تجزیه شیمیایی می‌تواند اطلاعات دقیقی درمورد میزان عیار، شکل توده و سایر مشخصات کانسار بررسی شده در اختیار گذارد. نکته مهم آن است که براساس اطلاعات به‌دست آمده از نمونه‌ها می‌توان در مورد کل و یا قسمتی از توده کانسار بررسی شده، قضاوت کرد.



شکل ۲. نمودار مقایسه سرعت روش‌های گوناگون حفاری در جنس‌های مختلف سنگ در یک شیف کاری ۱۰ ساعته

نمونه خروجی از دستگاه RC به‌صورت پودری به‌همراه خرده حفاری است و شیوهٔ نمونه‌گیری به این صورت است که معمولاً از هر لوله حفاری با طول ۳ متر، معمولاً ۳ نمونه (به‌ازای هر یک متر، یک گونی یا جعبه نمونه) اخذ می‌شود [٤]. بدین‌صورت که در شروع هر متراژ حفاری، گونی به دهانهٔ خروجی سیکلون متصل شده (شکل ۱ ب) و بسته به این که حفاری در زون کانی‌سازی یا در باطله است، نمونه‌ای در حدود ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم گرفته می‌شود. سپس نمونهٔ حاصل با دستگاه تقسیم‌کننده شانه‌ای[1] (ریفل) تقسیم شده تا علاوه بر دو نیم‌شدن، نمونه به‌خوبی مخلوط شود. نیمی از نمونه مستقیماً به داخل گونی ریخته شده و برای بایگانی به انبار نگه‌داری نمونه‌ها انتقال داده می‌شود و از نیمهٔ دوم ابتدا یک نمونه در حدود ۳۰۰ گرم به‌صورت سرند شده (فقط خرده‌های حفاری) برای انجام شست‌وشو و نگاربرداری گرفته می‌شود و باقی‌مانده نمونهٔ دوم با ریفل‌های پی در پی و مخلوط شدن و دو نیم شدن متعدد به نمونه‌ای با وزن تقریبی ۵۰۰ گرم برای تجزیه آزمایشگاهی تبدیل می‌شود.

1. Riffle

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

بدین‌ترتیب از هر یک متر حفاری، سه نوع نمونه (بایگانی، نگار و آزمایشگاه) گرفته می‌شود [٤].

دستگاه حفاری RC به یک قسمت جداکننده نمونه‌ها (سیکلون) مجهز است. این قسمت دارای یک محفظه مخروطی شکل است که نمونه‌های حفاری از داخل یک لوله لاستیکی مابین رشته حفاری و سیکلون عبور کرده و با فشار هوای زیاد به‌صورت مماس با بدنه داخلی سیکلون حرکت می‌کنند. در اثر این حرکت و وزن قطعات، قسمت‌های خیلی ریز نمونه که همان گرد و غبار هستند، به‌سمت بالا حرکت کرده و قسمت‌های درشت‌تر به سمت پایین رفته، وارد گونی یا جعبه‌های نمونه‌برداری می‌شوند [۱۵]. مطابق شکل ۳ نمونه‌های حاصل از روش RC در اندازه‌های پودر و قطعات کنده شده تا یک سانتی‌متر، متفاوت هستند.

الف ب

شکل ۳. نمونه‌های حاصل از روش حفاری RC، الف) نمونه‌های درشت، ب) نمونه‌های پودری [٤،١٦]

یکی از مزیت‌های نمونه‌برداری روش RC، سیستم نمونه‌برداری ساده آن یعنی فرآیند تقسیم‌بندی نمونه و انتقال مستقیم آن به آزمایشگاه است که این ویژگی باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. مزیت دیگر آن آلودگی ناچیز و نزدیک به صفر نمونه‌ها به‌دلیل وجود رشته لوله حفاری دوقلوی آن است. به‌دلیل مسیر حرکت نمونه‌ها و عبور از داخل رشته لوله حفاری، نمونه‌ها از تماس با دیواره چاه و دیگر مواد در امان است و آلوده نمی‌شوند. این در حالی

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

است که در روش گردش مستقیم به‌دلیل تماس مداوم نمونه‌ها با دیواره و محیط، نمونه‌ها آلوده شده و نتیجه نمونه‌ها با خطا همراه است.

در حفاری مغزه‌گیری هدف برداشت نمونه‌های استوانه‌ای شکل (مغزه) از گمانه مورد نظر با استفاده از هندسه خاص مته است. از مزایای نمونه‌هایی که با روش مغزه‌گیری به‌دست می‌آیند، اطلاعاتی است که می‌توان از آن‌ها به‌دست آورد. به‌عنوان مثال اطلاعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، اطلاعات مربوط به دگرسانی سنگ‌ها، اطلاعات شاخص کیفی سنگ (RQD)[1]، اطلاعات ساختاری (وجود یا نبود درزه و شکاف و شکستگی، وجود یا نبود حفره و فضای خالی) و اطلاعات فسیل‌شناسی که اهمیت بسیار زیادی در تحقیقات دارند و با استفاده از این اطلاعات می‌توان به‌منظور بررسی‌های بیش‌تر، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی متعددی روی مغزه انجام داد.

در مقابل، هزینه‌های جانبی نمونه‌های حاصل از مغزه‌گیری در مقایسه با روش RC بسیار بیش‌تر است. چنان‌که گفته شد نمونه‌برداری در روش RC صرفاً در تقسیم‌بندی و برداشت نمونه‌ها خلاصه می‌شود ولی در روش مغزه‌گیری اخذ نمونه‌های مغزه، تصویربرداری از آن‌ها، جاسازی آنها درون جعبه‌های چوبی مخصوص، تقسیم نمونه‌ها و خرد کردن آنها به‌منظور آماده سازی نمونه‌هایی برای تجزیه شیمیایی، نیاز به زمان، دقت زیاد و در نتیجه هزینه زیادی دارد. به هرجهت علیرغم زیاد بودن هزینه حفاری در روش مغزه‌گیری نسبت به نمونه‌گیری در روش‌های حفاری دیگر از جمله روش RC و بیش‌تر بودن سرعت نمونه‌برداری در روش RC نسبت به‌روش مغزه‌گیری، نمونه‌های حاصل از مغزه‌گیری به‌ویژه در مراحل مختلف اکتشافی اهمیت بیش‌تری دارند زیرا هیچ یک از انواع نمونه‌های اکتشافی، خصوصیات و مزیت‌های مغزه‌ها را ندارند. در مراحل تکمیلی اکتشاف طبیعتاً نمونه‌های حاصل از روش RC در مجموع از نظر میزان هزینه و سرعت نمونه‌گیری به سایر روش‌های دیگر ارجحیت دارند. مزایا و معایب روش‌های مختلف حفاری از نظر نوع نمونه‌های برداشت شده در جدول ۵ خلاصه شده است.

1. Rock quality designation

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ۵. مزایا و معایب روش‌های مختلف حفاری از نظر نوع نمونه‌های حاصل

روش حفاری	مزایا	معایب
گردش وارون	سیستم نمونه‌برداری ساده. آلودگی کم و نزدیک به صفر. استحصال سریع نمونه حتی در حین حفاری.	در صورت نیاز نمی‌توان اطلاعاتی از نمونه به‌منظور بررسی‌های فیزیکی و مکانیکی به‌دست آورد.
گردش مستقیم	سیستم نمونه‌برداری ساده. استحصال سریع نمونه حتی درحین حفاری.	آلوده شدن نمونه‌ها در اثر برخورد با دیواره چاه. در صورت نیاز نمی‌توان اطلاعاتی از نمونه به‌منظور بررسی‌های فیزیکی و مکانیکی به‌دست آورد.
مغزه‌گیری	امکان گرفتن اطلاعات به منظور بررسی‌های فیزیکی و مکانیکی. پیوستگی اطلاعات دریافتی از نمونه.	زمان‌بر بودن عملیات. صرف هزینه زیاد برای دست‌یابی به نمونه.

مقایسه کلی روش‌های حفاری

مقایسهٔ کلی روش‌های مختلف حفاری در جدول ٦ صورت گرفته است. مطابق این جدول مشاهده می شود که جای‌گاه روش حفاری RC در مقایسه با دیگر روش‌های حفاری بویژه انواع متداول و پرکاربرد، از نظر معیارهای مختلف همانند قیمت (هزینه) حفاری و سرعت (زمان) حفاری، بسیار مطلوب و از نظر میزان عمق (متراژ) حفاری، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان کلی عملکرد حفاری، مطلوب است. به هرجهت از نظر نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و نیز میزان عمق (متراژ) حفاری، روش حفاری مغزه‌گیری با توانایی حفر گمانه‌های بسیار عمیق، مطلوب ترین است.

مطالعهٔ موردی: معدن طلای اخترچی خمین

۱. معرفی منطقهٔ بررسی شده

منطقه بررسی شده در فاصلهٔ ۲۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان خمین در استان مرکزی قرار دارد. این منطقه خود متشکل از دو محدوده اکتشافی زرمعدن اختران ۱ به وسعت ۱۳/۲۱ کیلومتر مربع و زرمعدن اختران ۲ به‌وسعت ۲/۸۵ کیلومتر مربع است. دسترسی به منطقهٔ طلای اخترچی از طریق جاده خمین- شهابیه (گلدشت)- محلات امکان‌پذیر است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

پس از حدود ٦ کیلومتر (از شهابیه) در مسیر جاده آسفالته شهابیه- محلات، راه خاکی اختصاصی معدن جدا می‌شود که این راه خاکی امکان دسترسی به بخش‌های داخلی منطقه معدنی را فراهم می کند. نزدیک‌ترین آبادی به محدودهٔ بررسی شده، روستای خوراوند است [٤]، [۱۷].

جدول ٦. مقایسه ویژگی‌های انواع روش‌های حفاری بطور مختصر

روش حفاری / معیار مقایسه	روش گردش وارون	روش گردش مستقیم	روش مغزه‌گیری	روش کابلی
قیمت	معقول	نسبتاً بالا	بالا	پایین
کیفیت نمونه	قابل اعتماد	پایین	بالا	پایین
سرعت حفاری	نسبتاً زیاد	متوسط	پایین	پایین
عمق (متراژ) حفاری	حدود ۸۰۰ متر	حدود ۵۰۰ متر	حدود ۱۸۰۰ متر	حدود ۳۰۰ متر
نحوه عملکرد	خرد کردن سنگ با دوران و ضربه و خارج کردن خرده‌ها از میان لوله داخلی با استفاده از گردش سیال	خرد کردن سنگ با استفاده از ضربه و دوران و خارج کردن خرده‌ها از فاصله بین رشته لوله حفاری و دیواره چاه	گرفتن مغزه با استفاده از مته‌های مخصوص و انتقال آن به سطح با استفاده از لوله داخلی	خردایش سنگ با ضربه حاصل از سقوط سرمته و انتقال خرده‌ها به سطح با استفاده از سیال حفاری

محدودهٔ بررسی شده از دیدگاه ساختاری زمین‌شناسی، در زون سنندج- سیرجان و در گسترهٔ چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلپایگان، ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات و برگه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ خوگان در ناحیه‌ای نیمه کوهستانی و تپه ماهوری قراردارد. رخنمون‌های سنگی منطقه مربوط به زمان پرکامبرین فوقانی (دولومیت‌های سلطانیه)، مزوزوئیک (شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک) و کواترنر است [۱۷]. واحدهای سنگی عمده در محدوده، در نقشهٔ زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از قدیم به جدید شامل واحدهای شیست- اسلیت و شیل کربنیفر (C^{sch})، آهک پرمین (P^{l})، آهک دولومیتی پرمین (P^{dl}) و نهشته‌های آبرفتی جوان کواترنر است.

در منطقهٔ معدنی مجموعه سنگ‌های پرمین شامل دولومیت، سنگ آهک دولومیتی قهوه‌ای تا خاکستری تیره، ماسه‌سنگ آهن‌دار سیاه و سنگ آهک سفید تا شیری است که در نقشه‌های زمین‌شناسی به‌نام واحدهای p^{ds}، p^{dl} و p^{l} شناخته می‌شوند. از واحدهای ژوراسیک منطقه،

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

واحد $J^{sh,s}$ شامل ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی قهوه‌ای، شیل‌های سیلتی خاکستری و آهک ماسه‌ای متوسط تا ضخیم لایه است. در محدودهٔ بررسی شده نهشته‌های به سن کرتاسه نیز دارای گسترش چشم‌گیری هستند [۱۷]. براساس بررسی‌های فسیل‌شناسی و ویژگی‌های سنگ‌شناختی، این سنگ‌ها با واحدهای K^L، K^d و $K^{m,sh}$ به‌ترتیب معرف سنگ آهک ماسه‌ای اربیتولین‌دار، سنگ آهک متبلور و سنگ آهک دولومیتی، شیل آهکی و مارن خاکستری است. نهشته‌های کواترنری هم گسترش زیادی در باختر و جنوب باختری منطقه دارند. این رسوبات متشکل از آبرفت‌های پادگانه‌ای جوان (Q^{t2}) و نهشته‌های جوان رودخانه‌ای (Q^{al}) هستند.

کانی‌زایی در پیکره رگه و رگچه‌های سیلیسی، اکسید و هیدروکسیدهای آهن و در دو بخش مجزای شمالی و جنوبی به فاصله ۱۵۰ متر از یک‌دیگر، در واحد سنگ آهک دولومیتی- دولومیت پرمین (سنگ میزبان کانی زایی) قراردارد. رگه و رگچه‌های کانی‌زایی حاوی طلا در بخش شمالی دارای روند تقریبی خاوری-باختری و در بخش جنوبی دارای روند عمومی شمال خاوری- جنوب باختری است. شیب کلی رگه‌ها حدود ۵۰-۳۵ درجه به‌سمت جنوب- جنوب خاوری است [۱۷].

۲. بررسی حفاری‌های عمیق در منطقه

در منطقهٔ بررسی شده گمانه‌های عمیق زیادی حفاری شده که بیش‌تر آنها با روش RC و تعدادی از آنها نیز با روش مغزه‌گیری حفاری شده اند. به‌طورکلی در منطقه طلای اخترچی در محدوده زرمعدن اختران ۲ تاکنون تعداد ٥٤ حلقه گمانه پودری با روش RC حفاری شده که با شماره‌های RC1 تا RC54 نام‌گذاری شده اند و نیز تعداد ۲۵ حلقه گمانه مغزه‌گیری حفاری شده که در محدوده زرمعدن اختران ۱ تعداد ۱۸ حلقه گمانه با نام‌های BH1 تا BH18 و در محدودهٔ زرمعدن اختران ۲ تعداد ۵ حلقه گمانه با نام‌های BH1 تا BH5 حفاری شده‌اند [٤]، [۱۷]. در حین انجام عملیات حفاری، بیش‌تر با واحدهای سنگی پرمین و کرتاسه برخورد شده است.

جدیدترین حفاری‌های انجام شده در محدوده، مربوط به فصول پاییز و زمستان سال ۱۳۹۷ است که با روش‌های RC و مغزه‌گیری انجام شده‌اند. جزئیات حفاری با روش RC مربوط به ٤ حلقه گمانه با شماره‌های ۵۰، ۵۱، ۵۳ و ٥٤، به‌طور دقیق برداشت شده که به‌عنوان

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

نمونه در جدول ۷ اطلاعات مربوط به دو گمانه با شماره‌های ۵۳ و ٥٤ آورده شده است. فاصلهٔ این دو گمانه از یک‌دیگر حدود ۲۵ متر است و هر دو گمانه به‌وسیلهٔ یک نوع دستگاه، حفاری شده‌اند. حفاری با روش RC در موقعیت دهانه گمانه‌های حفاری از متراژ صفر (سطح زمین) شروع شده و بر مبنای قرارداد فی مابین کارفرما و پیمانکار، فواصل نمونه‌برداری، یک متر به یک متر هستند. زمان‌های حفاری اندازه‌گیری شده از طریق پرسش‌نامه، از پرسنل حفاری معدن دریافت شده و در موارد مورد نیاز، نتایج، به‌طور وزن دار میانگین‌گیری شده‌اند. داده‌های این جدول نشان می دهد که بدون در نظر گرفتن یک متر نخست که مربوط به آبرفت است، متوسط زمان حفاری هر متر سنگ در گمانه‌های ۵۳ و ٥٤ به‌ترتیب برابر با ۲:۱۲ دقیقه و ۲:٥٤ دقیقه است که در هر دو مورد، مدت زمان صرف شده بسیار کوتاه است و این ویژگی از مزایای روش حفاری RC است. طولانی‌تر بودن متوسط مدت زمان حفر هر متر سنگ در گمانه ٥٤ نسبت به گمانه ۵۳، به دلیل عمیق‌تر بودن گمانه ٥٤ و مشکل چکش دستگاه حفاری در حین حفر این گمانه است.

براساس داده‌های جدول ۷ نرخ پیش‌روی عملیات حفاری RC در گمانه ۵۳ حدود ۲۸ متر بر ساعت و در گمانه ٥٤ حدود ۲۳ متر بر ساعت است. این مقادیر در مقایسه با حفاری‌های قبلی صورت گرفته در قسمت‌های مختلف محدوده معدن (که در جدول ۸ مورد بررسی قرار می‌گیرند) بسیار زیاد است که دلیل آن تغییرات خصوصیات لیتولوژی (خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها) در این منطقه، شرایط هیدرولوژیکی منطقه، شرایط بسیار مساعد جوی (آب و هوایی) برای انجام عملیات حفاری، کم بودن متراژ گمانه‌ها و نیز افزایش تجربه و مهارت کارکنان قسمت حفاری براساس کسب تجربه از عملیات‌های قبلی است. هم‌چنین با توجه به داده‌های این جدول، در ۲۲ متر طول نخست هر دو گمانه، لیتولوژی عموماً از جنس سنگ آهک است و در ادامه به شیست منتهی می‌شود. اگر نرخ پیش‌روی عملیات حفاری در گمانه‌های ۵۳ و ٥٤ برای این دو نوع لیتولوژی نیز به‌طور مجزا تعیین شود، مشخص می‌شود که نرخ پیش‌روی حفاری در گمانه ۵۳ در سنگ آهک حدود ۲٤ متر بر ساعت است که در شیست به حدود ۳۷/۵ متر بر ساعت افزایش یافته است. درحالی که در گمانه ٥٤ نرخ پیش‌روی حفاری در سنگ آهک حدود ۲۹ متر بر ساعت است و با ورود به لایه شیست، به ۱۷/۳ متر بر ساعت کاهش یافته است. اختلاف نرخ پیش‌روی

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

در جنس سنگ آهک گمانه‌های ۵۳ و ٥٤ (٢٤ و ۲۹ متر بر ساعت) به‌دلیل تغییرات مقاومت فیزیکی و مکانیکی لیتولوژی سنگ آهک در دو گمانه است. هم‌چنین اختلاف بیش از دو برابری در نرخ پیش‌روی حفاری در سنگ‌های شیستی گمانه‌های ۵۳ و٥٤ (۳۷/۵ و ۱۷/۳ متر بر ساعت) وجود دارد به‌گونه‌ای‌که در گمانه ۵۳ نرخ پیش‌روی با تغییر جنس لیتولوژی از سنگ آهک به شیست به‌شدت افزایش یافته (از ٢٤ به ۳۷/۵ متر بر ساعت) در حالی که در گمانه ٥٤ دقیقاً برعکس است و نرخ پیش‌روی حفاری با ورود از سنگ آهک به شیست به مقدار زیادی کاهش یافته است (از ۲۹ به ۱۷/۳ متر بر ساعت). دلیل این امر آن است که اولاً جنس و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شیست‌ها در دو گمانه یک‌سان نیست به‌گونه‌ای‌که در یک گمانه شیست بسیار سخت و مقاوم و در دیگری شیست به‌صورت دگرسان شده و نرم است. هم‌چنین تغییر وضعیت ساختاری و شیب لایه‌بندی شیست در اعماق زمین در برخی نقاط این شبهه را ایجاد می‌کند که احیاناً در برخی از اعماق، حفاری به موازات سطح شیستوزیته شیست صورت گرفته و در نتیجه به‌دلیل کاهش مقاومت سنگ در این راستا، نرخ پیش‌روی به‌شدت افزایش می‌یابد حال آن‌که در صورت حفاری در راستای عمود بر سطح شیستوزیته، به‌دلیل افزایش مقاومت، میزان پیش‌روی شدیداً کاهش می‌یابد. نکته مهم‌تر آن‌که چکش دستگاه حفاری، روز قبل از عملیات حفر گمانه ٥٤ تعمیر شده که ظاهراً در حین کار باز هم دچار مشکل شده ولی چون نمونه‌های استحصالی، سالم است به‌کار خود ادامه داده است و شاید افزایش مدت زمان حفاری در قسمت شیست‌های گمانه ٥٤ مربوط به همین نقص و خرابی چکش دستگاه حفاری باشد.

در جدول ۸ جزئیات حفاری هر متر سنگ (عمدتاً در آهک متبلور و دولومیت و خیلی کم در آبرفت و شیست) با دو روش حفاری مغزه‌گیری و RC در منطقه معدنی اخترچی براساس نتایج بررسی‌های میدانی در هر شیفت کاری روزانه هشت ساعته، از طریق متوسط‌گیری، مقایسه شده است. در این جدول در ستون اول سمت راست، تفکیک روش حفاری مغزه‌گیری به دو مورد و تفکیک روش حفاری RC به چهار مورد، تنها براساس انجام عملیات حفاری به‌وسیلهٔ دستگاه‌های متعلق به پیمانکاران مختلف، انجام شده است و البته دستگاه‌های استفاده شده، تفاوت چندانی ندارند. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که نرخ پیش‌روی (سرعت) حفاری در این معدن به‌طور متوسط با روش مغزه‌گیری حدود ۱/۲٦

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ۷. جزئیات حفاری با روش RC در گمانه‌های با شمارهٔ ۵۳ و ٥٤ معدن طلای اخترچی

گمانه شمارهٔ ۵۳			گمانه شمارهٔ ٥٤		
فاصله عمقی (متر)	نوع سنگ (لیتولوژی)	مدت زمان حفاری (دقیقه و ثانیه)	فاصله عمقی (متر)	نوع سنگ (لیتولوژی)	مدت زمان حفاری (دقیقه و ثانیه)
۰–۱	آبرفت تا سنگ آهک	۱:٤٥	۰–۱	نهشته‌های آبرفتی جوان	۱:۲٤
۱–۲	سنگ آهک	۷:۱۵	۱–۲	سنگ آهک	٦:۲۰
۲–۳	سنگ آهک		۲–۳	سنگ آهک	
۳–٤	سنگ آهک		۳–٤	سنگ آهک	
٤–٥	سنگ آهک	۷:۰۰	٤–٥	سنگ آهک	٥:۲۰
٥–٦	سنگ آهک		٥–٦	سنگ آهک	
٦–۷	سنگ آهک		٦–۷	سنگ آهک	
۷–۸	سنگ آهک	۷:۳۰	۷–۸	سنگ آهک	٥:۳۰
۸–۹	سنگ آهک		۸–۹	سنگ آهک	
۹–۱۰	سنگ آهک		۹–۱۰	سنگ آهک	
۱۰–۱۱	سنگ آهک	۸:۰۰	۱۰–۱۱	سنگ آهک	٥:٤٥
۱۱–۱۲	سنگ آهک		۱۱–۱۲	سنگ آهک تا دیوریت	
۱۲–۱۳	سنگ آهک		۱۲–۱۳	سنگ آهک	
۱۳–۱٤	سنگ آهک	۸:۱۰	۱۳–۱٤	سنگ آهک	٦:۱۰
۱٤–۱٥	سنگ آهک		۱٤–۱٥	سنگ آهک	
۱٥–۱٦	سنگ آهک		۱٥–۱٦	سنگ آهک تا دیوریت	
۱٦–۱۷	سنگ آهک	۸:۰۰	۱٦–۱۷	سنگ آهک	٦:٥۰
۱۷–۱۸	سنگ آهک		۱۷–۱۸	دولومیت تا سنگ آهک	
۱۸–۱۹	سنگ آهک		۱۸–۱۹	سنگ آهک	
۱۹–۲۰	سنگ آهک	۷:٥۰	۱۹–۲۰	سنگ آهک	۸:٤٥
۲۰–۲۱	سنگ آهک		۲۰–۲۱	سنگ آهک	
۲۱–۲۲	سنگ آهک تا دولومیت		۲۱–۲۲	سنگ آهک تا دولومیت	
۲۲–۲۳	دولومیت تا شیست	٥:٤٥	۲۲–۲۳	دولومیت تا شیست	۹:۱۰
۲۳–۲٤	شیست		۲۳–۲٤	شیست	
۲٤–۲٥	شیست		۲٤–۲٥	شیست	
۲٥–۲٦	شیست	٥:۰۰	۲٥–۲٦	شیست	۹:۲۰

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

۲۶–۲۷	شیست		۲۶–۲۷	سنگ آهک تا شیست	
۲۷–۲۸	شیست		۲۷–۲۸	فضای خالی (حفره)	
۲۸–۲۹	شیست	٤:۲۰	۲۸–۲۹	شیست	۱۱:۱۰
۲۹–۳۰	شیست		۲۹–۳۰	شیست	
۳۰–۳۱	شیست		۳۰–۳۱	شیست	
۳۱–۳۲	شیست	٤:۱۰	۳۱–۳۲	شیست	۱۰:۵۰
۳۲–۳۳	شیست		۳۲–۳۳	شیست	
۳۳–۳٤	شیست		۳۳–۳٤	شیست	
۳٤–۳۵	شیست	٤:۳۰	۳٤–۳۵	شیست	۱۰:۳۰
۳۵–۳٦	شیست		۳۵–۳٦	شیست	
۳٦–۳۷	شیست		۳٦–۳۷	شیست	
			۳۷–۳۸	شیست	۱۱:۲۰
			۳۸–۳۹	شیست	
			۳۹–٤۰	شیست	
			٤۰–٤۱	شیست	۱۰:٤۰
			٤۱–٤۲	شیست	
			٤۲–٤۳	شیست	
			٤۳–٤٤	شیست	۱۰:۱۰
			٤٤–٤۵	شیست	
			٤۵–٤٦	دیوریت	
			٤٦–٤۷	دیوریت	۱۰:۲۰
			٤۷–٤۸	دیوریت	
			٤۸–٤۹	دیوریت تا شیست	

و با روش RC حدود ۸/۱٦ متربرساعت است؛ بدین معنا که در این معدن سرعت حفاری با روش RC به‌طور متوسط ٦/٤۷ برابر روش مغزه‌گیری است. هم‌چنین مطابق داده‌های این جدول، بیشینهٔ نرخ حفاری براساس بیشینهٔ متراژ حفاری هر شیفت کاری روزانه هشت ساعته، به‌طور متوسط با روش مغزه‌گیری حدود ۳/٦ و با روش RC حدود ۱۵/٤۷ متربرساعت است که اختلاف چشم‌گیری با یک‌دیگر دارند. بیش‌ترین زمان صرف شده برای حفر یک متر سنگ در این معدن (ستون آخر سمت چپ جدول) با روش‌های مغزه‌گیری و RC به‌ترتیب حدود ٤۳ و ۵ دقیقه است که در این مورد نیز تفاوت چشم‌گیری وجود دارد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ۸. جزئیات حفاری هر متر سنگ در معدن طلای اخترچی با دو روش حفاری مغزه‌گیری و RC

روش حفاری	جمع کل متراژ حفاری (متر)	جمع کل مدت زمان حفاری (ساعت)	نرخ پیشروی حفاری (متر بر ساعت)	مدت زمان یک متر حفاری (ساعت و دقیقه و ثانیه)	بیشینه متراژ حفاری هر شیفت کاری روزانه هشت ساعته (متر)	بیشینه نرخ حفاری بر اساس بیشینهٔ متراژ حفاری هر شیفت کاری روزانه هشت ساعته (متر بر ساعت)	بیش‌ترین زمان حفر یک متر سنگ (دقیقه و ثانیه)
مغزه‌گیری	۱۷۵/۲۵	۲۳۱	۰/۸	۱:۱۹:۰٦	۱۱/۰۸	۱/٤	٤۳:۱۸
مغزه‌گیری	۱۹۷۵/٦۵	۱٤۸۱	۱/۳	۰:٤۵:۰۰	۳۰/۳	۳/۸	۱۵:٤۸
گردش وارون	۱۷۳۹۰	۲۲۳۷	۷/۸	۰:۰۷:٤۲	۱۰۳	۱۲/۹	٤:٤۲
گردش وارون	۱۵۳٤۳	۲۲۷۳	٦/۸	۰:۰۸:٤۸	۱۰۳	۱۲/۹	٤:٤۲
گردش وارون	۱۲۹۳٦	۱۱٤۸	۱۱/۳	۰:۰۵:۱۸	۱۷٦	۲۲/۰	۲:٤۲
گردش وارون	۳۵۵٤	۳۷٤	۹/۵	۰:۰٦:۱۸	۱۲۳	۱۵/٤	۳:۵٤

در جدول ۹ توسط مدت زمان انجام عملیات حفاری هر متر سنگ در معدن طلای اخترچی با توجه به نوع جنس سنگ (لیتولوژی) در فواصل عمقی مشخص، براساس بررسی‌های میدانی آورده شده است. مطابق داده‌های این جدول، مدت زمان حفر هر متر سنگ در اعماق بیش‌تر، افزایش می‌یابد که دلایل افزایش مدت زمان حفر هر متر سنگ در اعماق بیشتر، دشوار شدن حفاری در نتیجه افزایش طول رشته ابزار حفاری، کاهش میزان انرژی انتقالی به سر مته، احتمال انحراف بیش‌تر گمانه، افزایش تراکم و درنتیجه مقاومت سنگ‌ها در اعماق و فشارهای هیدروستاتیک و لیتوستاتیک بیش‌تر در اعماق زیاد است و در اعماق زیاد، احتمال گیرافتادن رشته ابزار حفاری نیز زیاد است [۱۸]. هزینه (قیمت روز) حفاری هر متر سنگ در این معدن نیز براساس شیب و عمق حفاری، با روش RC بین حدود ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ هزار ریال و با روش مغزه‌گیری بین حدود ۲٦۲۰ تا ٤۲۵۰ هزار ریال متغیر است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

جدول ۹. متوسط مدت زمان انجام عملیات حفاری هر متر سنگ در معدن طلای اخترچی با توجه به جنس سنگ (لیتولوژی) و فواصل عمقی

نوع سنگ (لیتولوژی)	فاصله عمقی حفاری (متر)	مدت زمان انجام یک متر حفاری (برحسب دقیقه و ثانیه)
آبرفت	۰ تا ۵۰ متر	۱:۰۵
آهک متبلور	۰ تا ۵۰ متر	۱:۴۵
	۵۰ تا ۱۰۰ متر	۲:۴۰
	۱۰۰ تا ۱۵۰ متر	۳:۳۰
دولومیت	۰ تا ۵۰ متر	۳:۰۰
	۵۰ تا ۱۰۰ متر	۳:۵۰
	۱۰۰ تا ۱۵۰ متر	۴:۲۰

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر روش‌های گوناگون متداول حفاری از نظر معیارهای مختلف ازجمله سرعت پیش‌روی (زمان) حفاری، قیمت (هزینه)، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان کلی عملکرد حفاری، با یک‌دیگر مقایسه شدند و مزایا و معایب هر روش نسبت به روش‌های دیگر به‌طور مختصر و مفید ارائه شد. نتایج این بخش از پژوهش نشان می‌دهد که جای‌گاه روش حفاری RC در مقایسه با دیگر روش‌های حفاری به‌ویژه انواع متداول و پرکاربرد، از نظر معیارهای مختلف همانند قیمت (هزینه) حفاری و سرعت (زمان) حفاری، بسیار مطلوب و از نظر میزان عمق (متراژ) حفاری، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان کلی عملکرد حفاری، مطلوب است. هم‌چنین در مجتمع معدنی طلای اخترچی خمین دو روش حفاری مهم گردش وارون و مغزه‌گیری در نوع سنگ‌های با لیتولوژی معین و یک‌سان از نظر معیارهای فوق مقایسه شدند. به‌عنوان نتیجه گیری نهایی پژوهش، در خصوص به‌کارگیری روش حفاری RC در مطالعه موردی یعنی معدن طلای اخترچی خمین، مشخص شد که روش RC در مقایسه با روش حفاری مغزه‌گیری، از نظر مدت زمان انجام عملیات حفاری یا سرعت پیش‌روی (نرخ نفوذ سرمته در سنگ)، هزینه‌های حفاری و راندمان عملکرد، مطلوب است. هم‌چنین با توجه به نوع ماده معدنی (کانسار طلا)، که عیار پایینی داشته و اثرات ماده معدنی خیلی‌کم است و در نتیجه نیاز به حجم زیاد نمونه است، بنابراین از نظر نوع

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

نمونه‌های حاصل نیز استفاده از روش حفاری RC در این مورد نسبت به اغلب روش‌های حفاری دیگر مانند روش گردش مستقیم (از نظر دقت) و روش مغزه‌گیری (از نظر هزینه)، مزیتی خیلی مهم به‌حساب می‌آید.

اگرچه در مورد معدن طلای اخترچی خمین به‌طورکلی سرعت حفاری روش RC نسبت به‌روش مغزه‌گیری خیلی بیش‌تر است اما مقدار نرخ پیش‌روی حفاری در برخی از بخش‌های این معدن در مقایسه با برخی موارد دیگر به‌کارگیری روش حفاری RC در ایران و یا سایر نقاط جهان، قدری کم‌تر است. دلیل این امر آن است که عوامل مختلفی روی راندمان عملیات حفاری RC تأثیرگذارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نوع لیتولوژی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، شرایط هیدروژئولوژی منطقه، نوع دستگاه حفاری RC، مهارت و تجربه عملگرهای دستگاه حفاری و عمق (متراژ) حفاری اشاره کرد.

نتایج این پژوهش برای همهٔ کاربران عملیات حفاری از جمله مهندسان و تکنسین‌های حفاری، فعالان حوزهٔ زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، مهندسین اکتشاف انواع مواد معدنی، سفره‌های آب زیرزمینی و ذخایر هیدروکربوری (نفت و گاز) در انتخاب روش حفاری بهینه در شرایط مختلف محیطی و اقتصادی براساس معیارهایی مانند هدف عملیات حفاری، هزینه، نرخ پیش‌روی، نوع و کیفیت نمونه‌های حاصل و راندمان عملیات حفاری، مفید است. هم‌چنین به‌کارگیری روش حفاری RC به‌عنوان یک روش حفاری دارای مزیت نسبت به دیگر روش‌های حفاری، در اکتشاف کانسارهای کم عیار همانند طلا، نقره و مس به‌ویژه در مراحل پایانی همانند اکتشاف تفصیلی و اکتشاف حین استخراج توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از شرکت محترم زرمعدن اختران، آقای مهندس حیدری سرپرست محترم مجتمع معدنی طلای اخترچی و آقای مهندس امید ملک مسئول بخش اکتشافات معدن و دستگاه‌های حفاری، به‌دلیل همکاری‌های ارزنده درخصوص زمینه‌سازی امکان بازدید از محدوده و در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، تقدیر و تشکر می‌کنیم.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

منابع

۱. اصانلو م.، "روشهای حفاری"، مرکز نشر صدا، (۱۳۹۲) ٤٩٤.

2. www.petro-parsi.ir

۳. حسین‌نژاد م.ر.، ابره ب.، "روش‌های حفاری"، انتشارات دانشگاه اراک (۱۳۸۷) اراک.

٤. شرکت زرمعدن اختران، "گزارش عملیات اکتشاف در محدوده زرمعدن اختران ۲" (۱۳۹٦) ۱۹۸.

5. Zhang Y., Zhang L., Wang H., "The reverse circulation (RC) drilling techniques for the mineral resources exploration and production in ocean", Eleventh Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, 21-27 June, Kona, Hawaii, USA, International Society of Offshore and Polar Engineers (2015).

6. Xiumin M., Yue C., Luheng Q., "Research and application of Gas-lift reverse circulation drilling technology to geothermal well construction in Dalian Jiaoliu Island", Procedia Engineering, 73 (2014) 252-257.

7. http//:www.hardrockdrills.com, "6 advantages of reverse circulation vs direct circulation on borehole drilling" (2018).

8. Thomas G. P., "Reverse circulation (RC) drilling: theory, mechanisms and applications", (2012) http//:www.azomining.com.

۹. سرباز حسینی م.ج.، "مهندسی مته‌های حفاری"، انتشارات ستایش (۱۳۹۳) ۲۲۹.

۱۰. رحمتی ع.ر.، "گزارش عملیات انجام شده در معدن گرانیت اوره نطنز واقع در استان اصفهان"، (۱۳۹۷).

۱۱. رحمتی ع.ر.، "گزارش عملیات انجام شده در معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات واقع در استان مرکزی" (۱۳۹۷).

12. Ravia H., "Oilwell drilling engineering: principles and practice", Springer (1986).

13. www.hardrockdrills.com

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]

14. Zou D., "Theory and technology of rock excavation for civil engineering", Springer Singapore, ISBN: 978-981-10-1988-3, 699 (2017).

15. Utah Division of Water Resources, "Guide to well drilling for groundwater development", 1594 West North Temple, Suite 310 (2016) 52.

۱۶. عبادی ر.، "گزارش کارآموزی معدن طلای اخترچی خمین"، دانشگاه صنعتی اراک (۱۳۹۵).

۱۷. شرکت زرمعدن اختران، "گزارش عملیات اکتشاف در محدوده زرمعدن اختران ۱"، (۱۳۹۶) ٤٤٨.

18. Crawford S., "Drilling methods used by the Western Region Research Drilling Program", USGS, science for a changing world, (2019) https://ca.water.usgs.gov/temecula/abstracts/drilling.pdf .

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-04-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.1.8.6]