

روش های بهینه حفاری خاک و معدن

سیدرضا حسینی لرگانی^{۱*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران ۱۵۷۱۹-۱۴۹۱۱، ایران.

خلاصه

حفاری در محیط های خاکی و معدنی یکی از فرآیندهای کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک، معدن و تونل سازی است و عملکرد صحیح آن نقش تعیین کننده ای در سرعت اجرا، پایداری پروژه و هزینه های عملیاتی دارد. بهینه سازی روش حفاری نیازمند شناخت دقیق شرایط زمین، ویژگی های مکانیکی محیط، تجهیزات قابل استفاده، روش های کنترل حفاری و سامانه های نوین پایش است. در این مقاله، با مرور جامع منابع معتبر داخلی و بین المللی، روش های رایج حفاری در خاک و معدن شامل حفاری دورانی، ضربه ای، دورانی-ضربه ای، DTH، حفاری RC، حفاری شستشی، حفاری با گل، و حفاری مکانیزه ارزیابی شده است. همچنین معیارهای کلیدی انتخاب روش بهینه شامل مقاومت خاک و سنگ، نفوذپذیری، وضعیت تنش در توده سنگ، وجود آب، نرخ نفوذ (ROP)، مصرف انرژی، میزان سایش ابزار و پایداری جداره تحلیل شده است. نتایج نشان می دهد ترکیب تحلیل ژئومکانیکی، مدل سازی عددی رفتار توده سنگ و استفاده از فناوری های هوشمند حفاری می تواند موجب افزایش ۲۵ تا ۶۰ درصدی راندمان عملیات شود. در انتها، چارچوبی عملی برای انتخاب روش حفاری بهینه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: حفاری، ژئوتکنیک، معدن، توده سنگ، بهینه سازی، نرخ نفوذ، حفاری DTH

مقدمه

حفاری به عنوان نخستین عملیات اجرایی در بسیاری از پروژه‌های زیرسطحی از جمله شمع‌زنی، گمانه‌زنی ژئوتکنیکی، استخراج مواد معدنی، پایدارسازی شیب‌ها، احداث تونل و پایش‌های زمین‌شناسی شناخته می‌شود. انتخاب روش مناسب حفاری، هنگامی اهمیت می‌یابد که شرایط زمین‌شناسی، جنس لایه‌ها، درزه‌داری توده‌سنگ، وضعیت تنش-کرنش محیط و سطح آب زیرزمینی در پروژه‌های مختلف تغییرات چشمگیری دارند. بررسی‌های انجام‌شده توسط ISRM نشان می‌دهد که در بیش از ۴۰ درصد پروژه‌های زیرسطحی، دلیل اصلی افزایش هزینه و زمان، انتخاب نادرست روش حفاری بوده است [۱].

حفاری در خاک و محیط‌های ریزدانه نیازمند کنترل دقیق پایداری جداره، مدیریت جریان آب و حفظ یکپارچگی لایه‌هاست. در مقابل، حفاری در سنگ و معادن نیازمند شکست مؤثر توده‌سنگ، مدیریت تنش‌های درونی و کاهش سایش ابزار است. مطالعات Bray & Hoek [۲] نشان می‌دهد که مقاومت توده‌سنگ، شاخص RQD، تراکم درزه‌ها و شرایط تنش افقی نقش قابل توجهی در عملکرد حفاری دارند.

پیشرفت‌های اخیر شامل حفاری مکانیزه، سیستم‌های Down-The-Hole، ابزارهای مجهز به حسگرهای ارتعاشی، سامانه‌های هوشمند کنترل وزن روی مته (WOB) و تحلیل داده‌های لحظه‌ای ROP، امکان بهینه‌سازی عملیاتی را فراهم کرده‌اند [۳، ۴]. از این رو، لازم است تحلیل مناسبی از روش‌های حفاری با در نظر گرفتن شرایط پروژه ارائه شود.

هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب جامع برای انتخاب روش بهینه حفاری در محیط‌های خاکی و معدنی بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و عملیاتی است.

شکل ۱- روش‌های متداول حفاری در خاک و سنگ را نشان می‌دهد:

(۱) حفاری دورانی با گردش گل حفاری برای انتقال کنده‌ها و پایدارسازی گمانه؛

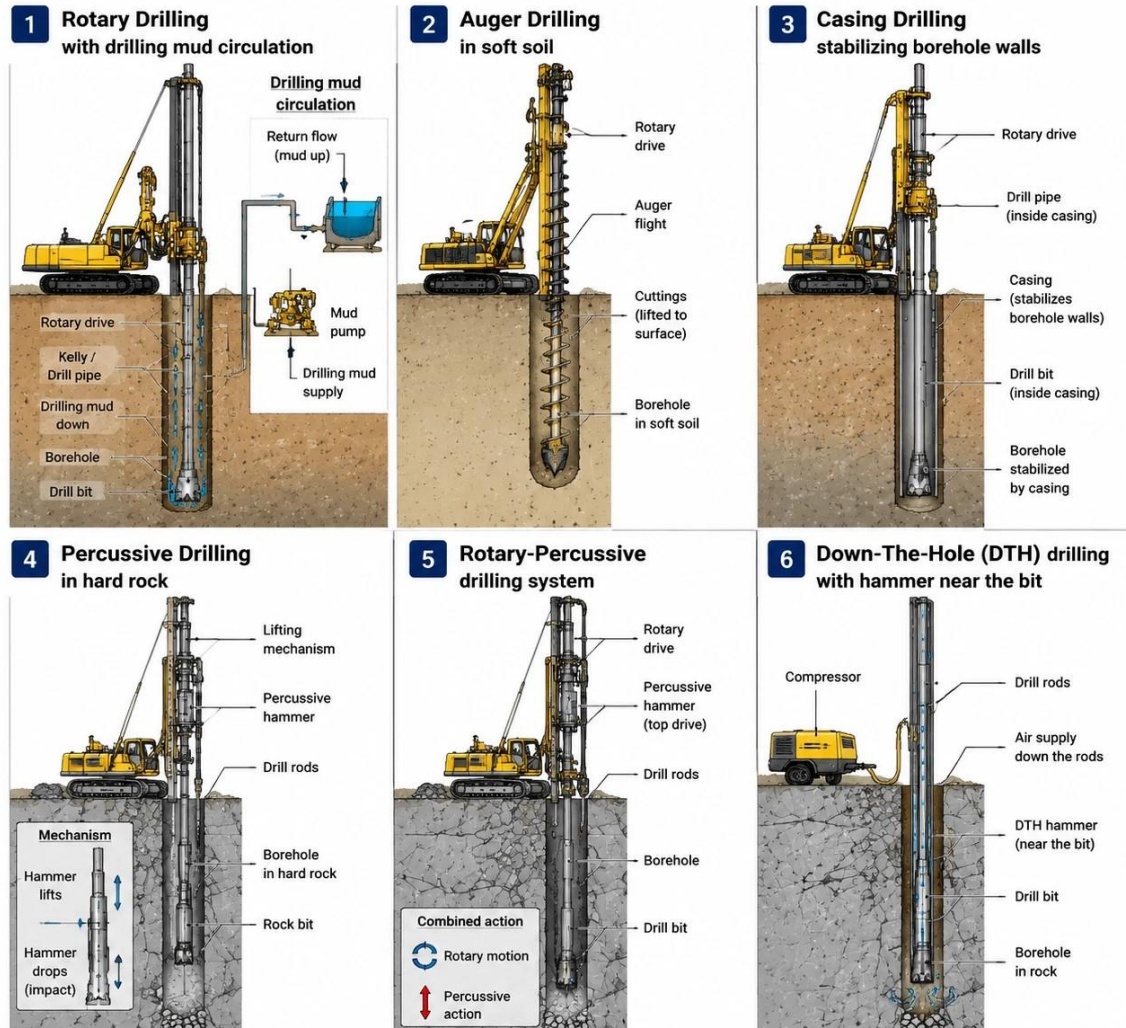
(۲) حفاری مارپیچی در خاک نرم برای جابه‌جایی خاک به سطح؛

(۳) حفاری با جداره‌گذاری برای تثبیت دیواره گمانه در خاک‌های ناپایدار؛

(۴) حفاری ضربه‌ای در سنگ سخت با انتقال انرژی کوبشی به مته؛

(۵) سامانه حفاری دورانی-ضربه‌ای برای افزایش نرخ نفوذ در لایه‌های متوسط تا سخت؛

(۶) حفاری DTH با قرارگیری چکش نزدیک مته برای انتقال مستقیم انرژی به سنگ.



Note: Illustrations are schematic and not to scale. Actual equipment and configurations may vary.

شکل ۱ - شماتیک روش‌های متداول حفاری در خاک و سنگ

روش‌های حفاری در خاک

حفاری دورانی (Rotary Drilling)

این روش در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی رایج است و در خاک‌های نرم تا نیمه‌سخت بهترین عملکرد را دارد. استفاده از گل حفاری با خاصیت کنترل فشار منفذی و روان‌سازی فرایند، نقش کلیدی در پایداری جداره دارد [۵]. انتخاب نوع گل (بنتونیتی، پلیمری، یا مخلوط) بر اساس خاک و فشار آب زیرزمینی ضروری است [۶].

حفاری عمیق ژئوتکنیکی خط ۶ مترو تهران - محدوده دولت آباد تا حرم عبدالعظیم

- پیمانکاران ژئوتکنیک: مشاور طرح و توسعه، شرکت حفاری اندیشه ورزان، ...
- مسیر پیشنهادی عملیات حفاری و گمانه زنی در محدوده جنوب تهران در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ - مسیر پیشنهادی عملیات حفاری و گمانه زنی در محدوده جنوب تهران

مراحل انجام کار

۱. آماده سازی محل و تثبیت دستگاه

- جانمایی دستگاه، تراز کردن و نصب تانک گل.

۲. اختلاط و آماده سازی گل بنتونیتی

- تنظیم وزن مخصوص، ویسکوزیته و فیلترکیک.

۳. شروع حفاری و گردش گل

- چرخش Kelly/Drill Pipe و پمپ کردن گل به پاشنه مته.

۴. بالاروی گل به همراه کنده ها

- انتقال کنده ها به سطح و ته نشینی در حوضچه.

۵. عبور از لایه های مختلف خاکی

- کنترل فشار گل برای جلوگیری از ریزش.

۶. پایان حفاری و تمیزکاری گمانه

- گردش نهایی گل، لاگ برداری، آماده سازی برای آزمایش یا بتن ریزی.

حفاری مته مارپیچی (Auger)

مناسب برای حفاری های سطحی تا عمق متوسط و خاک های کم چسبنده است. اگرچه سرعت بالایی دارد، اما در خاک های اشباع عملکرد ضعیف دارد زیرا انتقال مواد حفاری مشکل می شود [۷].

نمونه پروژه در ایران

گمانه زنی سطحی و میان عمقی پروژه مسکن مهر پردیس و پرند

- شرکت های ژئوتکنیکی مانند پویش زمین، گستره نگر، ره سازان از مته مارپیچی برای حفاری سریع استفاده کرده اند.

مراحل انجام کار

۱. نصب مته مارپیچی روی دریل واگن سبک
۲. چرخش پیوسته Auger و نفوذ در خاک
۳. انتقال خاک ها از مسیر مارپیچ به سطح
۴. وقفه های دوره ای جهت نمونه برداری دست خورده
۵. بررسی لایه بندی و پهنه بندی خاک
۶. توقف حفاری هنگام رسیدن به سنگ بستر یا لایه متراکم

حفاری جداره گذاری شده

در شرایط ناپایدار، استفاده از لوله جداره گذار باعث جلوگیری از ریزش دیواره می شود. مطالعات نشان داده است استفاده از کیسینگ در خاک های ریزدانه اشباع می تواند ریزش جداره را تا ۸۰٪ کاهش دهد [۸].

نمونه پروژه در ایران

پروژه پایدارسازی گود کنار بزرگراه نیایش – بلوار آفریقا تهران

- جهت جلوگیری از ریزش در خاک های ریزدانه و اشباع.

مراحل انجام

۱. راه اندازی سیستم حفاری و آماده سازی لوله های Casing

۲. شروع حفاری و همزمان راندن جداره به داخل گمانه

۳. کنترل ترازبندی Casing و جلوگیری از انحراف

۴. رسیدن به تراز موردنظر و توقف حفاری

۵. نصب میکروپایل یا انکراژ داخل گمانه

۶. برداشت یا باقی گذاشتن Casing طبق طراحی

روش های حفاری در معدن و سنگ

حفاری چکشی (Percussive Drilling)

در سنگ های سخت مؤثر است. با اعمال انرژی ضربه ای، شکست موضعی توده سنگ ایجاد می شود. نرخ نفوذ بالاتر و سایش کمتر از مزایای آن است [۹].

نمونه پروژه در ایران

حفاری چال های انفجاری معدن سنگ آهک هرمزگان (کارخانه سیمان هرمز) که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ - حفاری چال های انفجاری معدن

- روش کاملاً ضربه ای با چکش های Down-Hole و Top-Hammer انجام می شود.

مراحل انجام

۱. جانمایی چاله ها و شبکه انفجار
۲. نصب دستگاه حفاری ضربه ای و تنظیم چکش
۳. اعمال ضربه پیوسته و خرد شدن سنگ
۴. خروج پودر و خرده سنگ با هوای فشرده
۵. پاکسازی چال و کنترل عمق
۶. خرج گذاری، نوارگذاری و انفجار کنترل شده

حفاری دورانی-ضربه ای (Rotary Percussive)

ترکیبی از چرخش و ضربه، مناسب برای سنگ های متوسط تا سخت. مطالعات Fjaer نشان می دهد که این روش می تواند ROP را ۲۰-۴۰٪ نسبت به حالت دورانی افزایش دهد [۱۰].

نمونه پروژه در ایران

حفاری شفت های تونل انتقال آب کرج-تهران و تونل شهری خط ۷ مترو

- در سنگ های متوسط تا سخت، دستگاه های "Top Drive Rotary-Percussive" استفاده شده اند.

مراحل انجام

۱. آماده سازی مسیر و نصب دستگاه چندمنظوره

۲. شروع حفاری با ترکیب حرکت چرخشی و ضربه ای

۳. افزایش نرخ نفوذ در لایه های سخت

۴. خروج کنده ها توسط هوای فشرده/گل سبک

۵. کنترل انحراف گمانه با سنسورها

۶. پایان حفاری و تهیه Log پیشرفته

حفاری DTH (Down-The-Hole)

در این روش، چکش در نزدیکی مته قرار گرفته و انرژی ضربه را مستقیماً به سنگ منتقل می کند. این امر موجب افزایش راندمان و کاهش انحراف حفاری در گمانه های عمیق می شود [۱۱].

نمونه پروژه در ایران

حفاری چال های انفجاری معدن چغارت (بافق یزد) و معدن گل گهر سیرجان

- به دلیل سختی بالای سنگ، چکش در عمق و نزدیک مته قرار می گیرد.

•

مراحل انجام

۱. استقرار کمپرسور و دستگاه حفاری
۲. ارسال هوای فشرده به درون لوله ها
۳. قرارگیری چکش DTH در نزدیکی مته و شروع ضربه گذاری عمقی
۴. خرد شدن سنگ و خروج ذرات با فشار هوا
۵. افزایش عمق تا میزان طراحی شده
۶. پاکسازی نهایی و خروج تجهیزات

حفاری (RC (Reverse Circulation

در پروژه های معدنی برای نمونه برداری با کیفیت استفاده می شود. RC موجب کاهش تداخل مواد لایه ها و افزایش دقت مغزه برداری می شود [۱۲].

عوامل مؤثر در انتخاب روش حفاری

ویژگی های ژئوتکنیکی و مکانیک سنگ

پارامترهایی مانند مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، شاخص ضربه پذیری، RQD، تراکم درزه ها و تنش های درجا تأثیر مستقیم بر روش حفاری دارند [۱۳].

شرایط هیدروژئولوژیکی

وجود آب زیرزمینی بر پایداری جداره، عملکرد گل حفاری و توانایی انتقال مواد حفاری اثرگذار است [۱۴].

پارامترهای عملیاتی

- وزن روی مته (WOB)

• سرعت چرخش (RPM)

• فشار هوای حفاری

• نرخ نفوذ (ROP)

تحلیل هم‌زمان این پارامترها با ابزار هوشمند موجب بهینه‌سازی عملیات می‌شود [۱۵].

تحلیل هزینه-زمان

روش حفاری بهینه باید حداقل هزینه عملیاتی، سایش ابزار و زمان توقف را داشته باشد [۱۶].

نتیجه‌گیری

براساس تحلیل مطالعات میدانی، استفاده از روش‌های دورانی در خاک‌های نرم، روش‌های ضربه‌ای در سنگ‌های سخت و روش‌های ترکیبی در خاک‌های لایه‌لایه بهترین عملکرد را دارند. [17]

همچنین بررسی داده‌های سامانه‌های پایش لحظه‌ای نشان می‌دهد که:

• استفاده از کنترل WOB می‌تواند عمر مته را تا ۳۰٪ افزایش دهد

• روش DTH نسبت به حفاری روتاری در سنگ‌های سخت ۵۰٪ نرخ نفوذ بیشتری ارائه می‌دهد [18]

• روش RC در نمونه‌برداری معدنی تا ۹۰٪ کاهش آلودگی نمونه دارد [19]

مدل‌سازی عددی با ابزار FLAC3D و PLAXIS نشان می‌دهد که تنش‌های جانبی در خاک‌های ریزدانه تأثیر زیادی بر پایداری جداره دارد و روش‌های جداره‌گذاری شده عملکرد بهتری ارائه می‌دهند [20]. هر مقاله باید با ارائه توضیحات مشخص به جمع‌بندی نتایج تحقیق ارائه شده در بخش نتیجه‌گیری بپردازد. در این مقاله، روش‌های مختلف حفاری خاک و معدن و معیارهای تعیین‌کننده در انتخاب روش بهینه بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که هیچ روش واحدی برای تمام شرایط مناسب نیست و انتخاب بهینه باید بر پایه تحلیل ژئومکانیکی، شرایط هیدروژئولوژیکی، هزینه-زمان و مدل‌سازی عددی انجام شود. استفاده از سیستم‌های حفاری پیشرفته مانند RC، DTH و سامانه‌های هوشمند پایش توانسته است راندمان عملیات را افزایش داده و هزینه‌های تعمیرات و سایش تجهیزات را کاهش دهد. توصیه می‌شود در پروژه‌های حساس، انتخاب روش با ترکیبی از آزمایش‌های میدانی، تحلیل عددی و پردازش داده‌های لحظه‌ای انجام شود.

مراجع

1. ISRM (2017). Suggested methods for rock characterization.
2. Hoek, E., & Bray, J. (2018). Rock Slope Engineering.
3. Fjaer, E. et al. (2020). Drilling performance in hard rocks.
4. Brown, E. T. (2019). Rock Mechanics for Underground Mining.
5. Mitchell, J.K. & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior.
6. Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering.
7. Alizadeh, M. (1400). Principles of Soil Drilling.
8. Hashemi, R. (1399). Drilling with Casing Methods.
9. Rabia, H. (2015). Drilling Engineering.
10. Fjaer, E. (2019). Mechanics of Drilling Tools.
11. Scott, D. (2021). Down-The-Hole Drilling Systems.
12. Connor, J. (2020). Reverse Circulation Drilling Methods.
13. Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering.
14. Freeze, R. (1979). Groundwater Hydrology.
15. Osgouei, P. (2021). ROP Optimization Techniques.
16. Arefnia, P. (1398). Cost Analysis in Drilling.
17. Ghiasi, A. (1401). Comparative Study of Soil Drilling Methods.
18. ISRM Journal (2020). DTH vs Rotary Drilling.
19. Mining Engineering (2019). Sampling Accuracy in RC Drilling.
20. FLAC3D Manual (2022). Numerical Modeling of Boreholes.
21. PLAXIS 2D Manual (2021). Soil–Structure Interaction in Drilling.