

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بر روی نرخ نفوذ حفاری چاههای نفت با
استفاده از رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES)

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر مهدی نوروزی

استاد مشاور:

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

نگارنده:

حمیدرضا سعیدی

بهمن ۱۳۹۶

تقدیم به:

والدین مهربانم که دعایشان بدرقه مسیر زندگیم است

تقدیر و تشکر:

نخست شکر ایزد بی‌همتا، که جان را در انسان دمید و پرورید و بعد سپاس از آنان که یار و همیار این کوچک بوده‌اند تا این مرحله را پشت سر گذارد، که زندگی همه خود تعریفی و درکی از مجموعه این مراحل است و خدای را سپاس می‌گوییم که به من توان داد تا این مراحل را پشت سر بگذارم و به آغازی دگر بیندیشم؛ بدین وسیله زحمات کلیه‌ی اساتیدی که مرا در نوشتن این پایان‌نامه یاری نمودند، گرامی می‌دارم.

در پیش‌برد این پایان‌نامه، از راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی‌ام، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی، جناب آقای دکتر مهدی نوروزی و جناب آقای دکتر مهرداد سلیمانی منفرد بهره‌ها برده‌ام بر خود لازم می‌دانم از ایشان، به‌خاطر زحمات بی‌دریغشان صمیمانه قدردانی کنم.

در نهایت افتخار دارم از داوران این تحقیق، جناب آقای دکتر مجید نیکخواه و جناب آقای رامین رفیعی قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا سعیدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن- مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بر روی نرخ نفوذ حفاری چاه‌های نفت با استفاده از رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES) تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مهدی نوروزی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

حفاری یک عملیات گران قیمت و لازم برای اکتشاف و بهره‌برداری مواد هیدروکربنی است. یکی از اهداف مهم در عملیات حفاری دستیابی به سرعت حفاری بالاتر با صرف هزینه کمتر همراه با حفظ ایمنی است. در عملیات حفاری، زمان و راندمان عملیات به عنوان عواملی که ارتباط مستقیم با هزینه‌های حفاری دارند، از اهمیت فراوان برخوردارند. یکی از معیارهای راندمان عملیات حفاری، میزان نرخ نفوذ مته حفاری است. برآورد این پارامتر و اطلاع از آن هنگام برنامه‌ریزی برای حفر یک چاه، می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر مدت زمان حفاری و برآورد هزینه آن کمک شایانی نماید. همچنین دانش معقول از خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و انتخاب مناسب پارامترهای عملیات حفاری کمک زیادی در کاهش هزینه‌های حفاری و تولید می‌کند. در این پژوهش به منظور بررسی عوامل موثر بر نرخ نفوذ ابتدا سابقه علمی موضوع با استفاده از مقالات و متون علمی موجود مورد بررسی قرار گرفت و مهم‌ترین عوامل موثر به دو دسته عوامل قابل کنترل (عملیاتی) و غیرقابل کنترل (محیطی) تقسیم‌بندی شدند. به دست آوردن مدلی که بتواند ارتباط میان این عوامل و نرخ نفوذ را به دست آورد همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. با این وجود مدل‌های ریاضی ارایه شده در این راستا بیشتر بر روی عوامل قابل کنترل و عملیاتی تاکید داشته‌اند. پیچیدگی تقابل مته و سنگ و همچنین تاثیر توام عوامل موثر بر نرخ نفوذ سبب شده است که روش‌های معمول به طور کامل قادر به تحلیل و پیش‌بینی نرخ نفوذ نباشند. علت اصلی این امر را می‌توان به متعدد بودن عوامل موثر بر نرخ نفوذ و از طرف دیگر اندرکنش میان این عوامل ربط داد. برای غلبه بر این مشکل، رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی تاثیر عوامل موثر بر نرخ نفوذ از اطلاعات یکی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان استفاده شده است. در این راستا، ابتدا عوامل تاثیرگذار بر نرخ نفوذ مشتمل بر ۱۱ عامل، شناسایی شده و سپس با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) شاخصی با عنوان شاخص نفوذ (PI) پیش‌بینی شده است. این شاخص برای چهار عمق مختلف از چاه موردنظر محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در میدان مورد مطالعه، عمق‌های ۲۷۲۸ و ۳۵۷۴ متر به ترتیب دارای بالاترین

و پایین‌ترین شاخص نفوذ هستند. همچنین از میان عوامل موثر بر نرخ نفوذ، عامل تداخل به عنوان تاثیرگذارترین عامل بر نرخ نفوذ شناخته شد.

کلمات کلیدی: نرخ نفوذ حفاری، عوامل عملیاتی، عوامل محیطی، سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات پژوهش..... ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مساله ۲

۱-۳- ضرورت تحقیق ۳

۱-۴- اهداف و روش انجام تحقیق ۳

۱-۵- ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: تاثیر عوامل مختلف بر نرخ نفوذ حفاری..... ۷

۱-۲- مقدمه ۸

۲-۲- حفاری ۸

۲-۲-۱- حفاری ضربه‌ای ۹

۲-۲-۲- حفاری دورانی..... ۱۰

۲-۳- مته‌های حفاری..... ۱۱

۲-۳-۱- مته تیغه متحرک (غلتمی مخروطی)..... ۱۱

۲-۳-۱-۱- مته دندان کن‌گره‌ای (فولادی)..... ۱۲

۲-۳-۱-۲- مته‌های دکمه‌ای..... ۱۳

۲-۳-۲- مته‌های تیغه ثابت (سایشی)..... ۱۴

۲-۳-۲-۱- مته‌های الماس معمولی..... ۱۴

۲-۳-۲-۲- مته الماس مصنوعی..... ۱۵

۲-۳-۲-۳- مته الماس مصنوعی پایدار..... ۱۶

۲-۴- معرفی میدان مورد مطالعه..... ۱۷

۲-۴-۱- موقعیت چاه مورد نظر..... ۱۷

۱۸.....	۲-۴-۲- سنگ شناسی سازندهای میدان.....
۲۱.....	۳-۴-۲- تشکیل پایگاه داده‌ها.....
۲۲.....	۵-۲- نرخ نفوذ حفاری و عوامل موثر بر آن.....
۲۴.....	۱-۵-۲- عوامل قابل کنترل.....
۲۴.....	۱-۱-۵-۲- بار روی مته.....
۲۷.....	۲-۱-۵-۲- سرعت دوران مته.....
۲۹.....	۳-۱-۵-۲- سیال حفاری.....
۳۱.....	۴-۱-۵-۲- سیستم هیدرولیک مته.....
۳۲.....	۲-۵-۲- عوامل محیطی.....
۳۳.....	۱-۲-۵-۲- چگالی.....
۳۶.....	۲-۲-۵-۲- تخلخل.....
۳۹.....	۳-۲-۵-۲- مقاومت فشاری تک محوره.....
۴۳.....	۴-۲-۵-۲- مقاومت کششی.....
۴۵.....	۵-۲-۵-۲- سفتی سنگ.....
۴۷.....	۶-۲-۵-۲- ساینده‌گی.....
۵۰.....	۷-۲-۵-۲- مدول یانگ.....
۵۳.....	۳-۵-۲- مروری بر الگوهای ارایه شده برای ارزیابی نرخ نفوذ.....
۶۰.....	۶-۲- جمع‌بندی.....

۶۳..... فصل سوم: رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES)

۶۴.....	۱-۳- مقدمه.....
۶۴.....	۲-۳- تفکر سیستمی.....
۶۶.....	۳-۳- رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES).....
۶۷.....	۴-۳- کدگذاری ماتریس اندرکنش.....
۶۹.....	۵-۳- نمودار علت و اثر.....

۶-۳- پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه RES ۷۲

۷-۳- تلاش های انجام شده جهت بهبود رویکرد RES ۷۶

۸-۳- جمع بندی ۸۲

فصل چهارم: برآورد شاخص نفوذ و بررسی عوامل موثر بر نرخ نفوذ ۸۳

۱-۴- مقدمه ۸۴

۲-۴- تحلیل اندرکنش عوامل با استفاده از رویکرد RES ۸۴

۱-۲-۴- ماتریس اندرکنش میانگین ۸۴

۲-۲-۴- کد گذاری ماتریس اندرکنش ۸۵

۳-۲-۴- شدت اندرکنش ۸۶

۴-۲-۴- تعیین وزن عوامل تاثیرگذار بر مساله ۸۹

۳-۴- برآورد شاخص نفوذ ۹۱

۴-۴- جمع بندی ۹۳

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۵

۱-۵- نتیجه گیری ۹۶

۲-۵- پیشنهادات ۹۷

پیوست ۹۹

منابع ۱۰۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش ۵
- شکل ۱-۲: نمونه‌ای از مته دندان‌کنگره‌ای ۱۲
- شکل ۲-۲: نمونه‌ای از مته دکمه‌ای ۱۳
- شکل ۳-۲: نمونه‌هایی از مته‌های الماسی ۱۵
- شکل ۴-۲: نمونه‌ای از مته PDC ۱۶
- شکل ۵-۲: نمونه‌ای از مته‌های TSP ۱۶
- شکل ۶-۲: موقعیت میدان و چاه مورد مطالعه ۱۸
- شکل ۷-۲: رابطه‌ی نرخ نفوذ و بار روی مته ۲۵
- شکل ۸-۲: نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش بار مته ۲۶
- شکل ۹-۲: امتیازدهی بار روی مته برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۲۶
- شکل ۱۰-۲: ارتباط بین نرخ نفوذ و سرعت دوران مته ۲۸
- شکل ۱۱-۲: نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش سرعت دوران ۲۸
- شکل ۱۲-۲: امتیازدهی سرعت دوران مته برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۲۹
- شکل ۱۳-۲: امتیازدهی وزن گل برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۳۰
- شکل ۱۴-۲: امتیازدهی نرخ جریان سیال برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۳۲
- شکل ۱۵-۲: ارتباط چگالی سنگ و قابلیت حفاری ۳۴
- شکل ۱۶-۲: امتیازدهی چگالی برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۳۵
- شکل ۱۷-۲: رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ ۳۸
- شکل ۱۸-۲: رابطه نرخ نفوذ با تخلخل به‌دست آمده از داده‌های چاه پیمایی ۳۸
- شکل ۱۹-۲: امتیازدهی تخلخل برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر ۳۹
- شکل ۲۰-۲: ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری ۴۲
- شکل ۲۱-۲: امتیازدهی مقاومت فشاری تک محوره برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۴۳
- شکل ۲۲-۲: ارتباط مقاومت کششی سنگ و قابلیت حفاری ۴۴
- شکل ۲۳-۲: امتیازدهی مقاومت کششی برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۴۵

- شکل ۲-۲۴: ارتباط میان سفتی سنگ با نرخ نفوذ حفاری ۴۶
- شکل ۲-۲۵: امتیازدهی سفتی سنگ برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۴۷
- شکل ۲-۲۶: امتیازدهی ساینده‌گی سنگ برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۵۰
- شکل ۲-۲۷: ارتباط بین نرخ نفوذ و مدول الاستیسیته سنگ‌ها ۵۲
- شکل ۲-۲۸: امتیازدهی مدول یانگ برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر ۵۳
- شکل ۳-۱: مفهوم تفکر سیستمی ۶۵
- شکل ۳-۲: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها ۶۵
- شکل ۳-۳: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B ۶۶
- شکل ۳-۴: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب خط نمودار ۶۸
- شکل ۳-۵: نحوه شکل‌گیری محورهای علت-اثر در ماتریس‌های اندرکنش ۷۰
- شکل ۳-۶: نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش کدگذاری شده ۲*۲ و نمودار علت-اثر آن ۷۰
- شکل ۳-۷: نمونه‌ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش ۴*۴ ۷۱
- شکل ۳-۸: شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر ۷۲
- شکل ۳-۹: خط سیرهای یک ماتریس با ۵ عامل ۷۸
- شکل ۳-۱۰: شبکه مکانیزم‌های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط ۷۹
- شکل ۳-۱۱: نحوه قرارگیری پارامترهای ماتریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی ۸۰
- شکل ۳-۱۲: شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس ۸۰
- شکل ۴-۱: میزان اثرگذاری عوامل موثر بر نرخ نفوذ ۸۷
- شکل ۴-۲: میزان اثرپذیری عوامل موثر از نرخ نفوذ ۸۷
- شکل ۴-۳: شدت اندرکنش عوامل موثر بر نرخ نفوذ ۸۸
- شکل ۴-۴: نمودار علت-اثر عوامل ۸۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱: توالی سازندها در چاه مورد مطالعه.....	۱۹
جدول ۲-۲: نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده.....	۲۲
جدول ۲-۳: معیار طبقه‌بندی بار روی مته.....	۲۶
جدول ۲-۴: معیار طبقه‌بندی سرعت دوران مته.....	۲۹
جدول ۲-۵: معیار طبقه‌بندی سیال حفاری بر اساس وزن گل.....	۳۰
جدول ۲-۶: معیار طبقه‌بندی نرخ جریان سیال.....	۳۱
جدول ۲-۷: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس چگالی.....	۳۵
جدول ۲-۸: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس تخلخل.....	۳۹
جدول ۲-۹: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت فشاری تک محوره.....	۴۲
جدول ۲-۱۰: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی.....	۴۴
جدول ۲-۱۱: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سفتی.....	۴۷
جدول ۲-۱۲: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس ساینده‌گی.....	۵۰
جدول ۲-۱۳: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مدول یانگ.....	۵۲
جدول ۴-۱: ماتریس اندرکنش میانگین.....	۸۶
جدول ۴-۲: تفسیر نمودار علت-اثر عوامل.....	۸۹
جدول ۴-۳: خلاصه تحلیل اندرکنش عوامل.....	۹۰
جدول ۴-۴: محاسبه شاخص نفوذ در عمق‌های مختلف چاه مورد نظر.....	۹۲
جدول ۴-۵: ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص PI.....	۹۳

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

حفاری سازندها یکی از مراحل اولیه و مهم تولید نفت، گاز طبیعی، آب و مواد معدنی است. احداث چاهها همواره مستلزم عبور از سازندهای مختلف تشکیل دهنده زمین است. این سازندها از سنگهای بسیار نرم تا بسیار سخت تشکیل شدهاند. حفاری سریع و کم هزینه این سازندها به منظور دستیابی به منابع نفتی، آبی و گازی در کمترین زمان ممکن، همیشه از دغدغههای مهندسين و شرکت‌های حفاری بوده است. از این‌رو، مهندسين حفاری برای توصیف ویژگی‌های سازندها از پارامترهای نرخ حفاری و قابلیت حفاری استفاده می‌کنند.

نرخ نفوذ یا نرخ حفاری فاصله حفر شده در واحد زمان است. اهمیت نرخ نفوذ مدت زمان زیادی است که توسط مهندسين حفاری نفت شناسایی شده است. در حقیقت هزینه حفاری یک چاه ۷۵ درصد هزینه کل چاه است. از طرفی اکثر هزینه‌های حفاری وابسته به زمان است؛ از این‌رو، هزینه‌های حفاری با افزایش عمق به صورت نمایی رشد می‌کنند. روشی که موجب افزایش نرخ نفوذ شود؛ هزینه‌های حفاری را کاهش خواهد داد. افزایش سرعت حفاری نیازمند مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ است. تخمین دقیق و صحیح نرخ نفوذ، علاوه بر افزایش سرعت حفاری، می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی بهتر فرآیند حفاری و کاهش مخاطرات طبیعی شود. آگاهی کامل از پارامترهایی که بر نرخ نفوذ تاثیر می‌گذارند قبل از مدل‌سازی نرخ نفوذ ضروری است. لذا در ادامه به ضرورت بررسی این پارامترها پرداخته می‌شود.

۱-۲- بیان مساله

مخازن هیدروکربنی جزء یکی از منابع اصلی تولید انرژی و پایه اصلی اقتصاد کشور محسوب می‌شوند. از آنجا که عملیات حفاری سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های اکتشاف و بهره‌برداری مواد هیدروکربنی را به خود اختصاص می‌دهند، لذا به‌منظور مدیریت در زمان و بهینه‌سازی فرآیند حفاری به دست آوردن مدلی که بتواند ارتباط بین نرخ نفوذ و سایر عوامل کنترلی و محیطی موثر بر حفاری را با دقت کافی بیان کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

عوامل موثر بر نرخ نفوذ (ROP^1) به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: دسته اول عوامل قابل کنترل مانند گشتاور، دبی سیال حفاری، وزن روی مته (WOB^2)، سرعت چرخش مته و ... هستند و دسته دوم عوامل غیرقابل کنترل یا محیطی مانند مقاومت سنگ، مدول الاستیک، درزه‌داری و ... هستند که به کمک نگاره‌های پتروفیزیکی مانند صوتی، چگالی و ... برآورد خواهند شد. این تحقیق با توجه به اهمیت نقش عوامل ژئومکانیکی بر نرخ نفوذ مته حفاری، به مطالعه تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگ بر روی نرخ نفوذ حفاری خواهد پرداخت.

۳-۱- ضرورت تحقیق

افزایش راندمان حفاری و در نتیجه کاهش هزینه‌ها، دغدغه اصلی شرکت‌های فعال در زمینه حفاری و بهره‌برداری نفت و گاز است. دلیل این امر را می‌توان در بالا بودن سهم هزینه‌ی عملیات حفاری در مجموعه عملیات اکتشاف و بهره‌برداری میدین نفت و گاز جستجو کرد. از این رو یافتن مدلی که بتواند ارتباط بین عوامل مؤثر در حفاری و نرخ نفوذ را بیان کند دارای اهمیت زیادی است. تا به حال تحقیقات زیادی در مورد تاثیر عوامل عملیاتی بر روی نرخ نفوذ صورت گرفته است. اما همواره عدم توجه کافی به تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگ در این تحقیقات احساس شده است. در مجموع می‌توان با شناخت و ارزیابی عوامل ژئومکانیکی و همچنین انتخاب صحیح عوامل عملیاتی سرعت حفاری را بالا و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش داد. البته باید توجه داشت که عوامل عملیاتی قابل کنترل و عوامل محیطی غیر قابل تغییر هستند.

۴-۱- اهداف و روش انجام تحقیق

همواره یافتن مدلی که بتواند ارتباط بین عوامل موثر بر نرخ نفوذ را برقرار سازد از اهمیت بسزایی برخوردار است. این مدل می‌تواند نمایانگر قابلیت حفاری^۳ سازندهای تحت حفاری و ابزاری برای تخمین

1-Rate Of Penetration

2-Weight On Bit

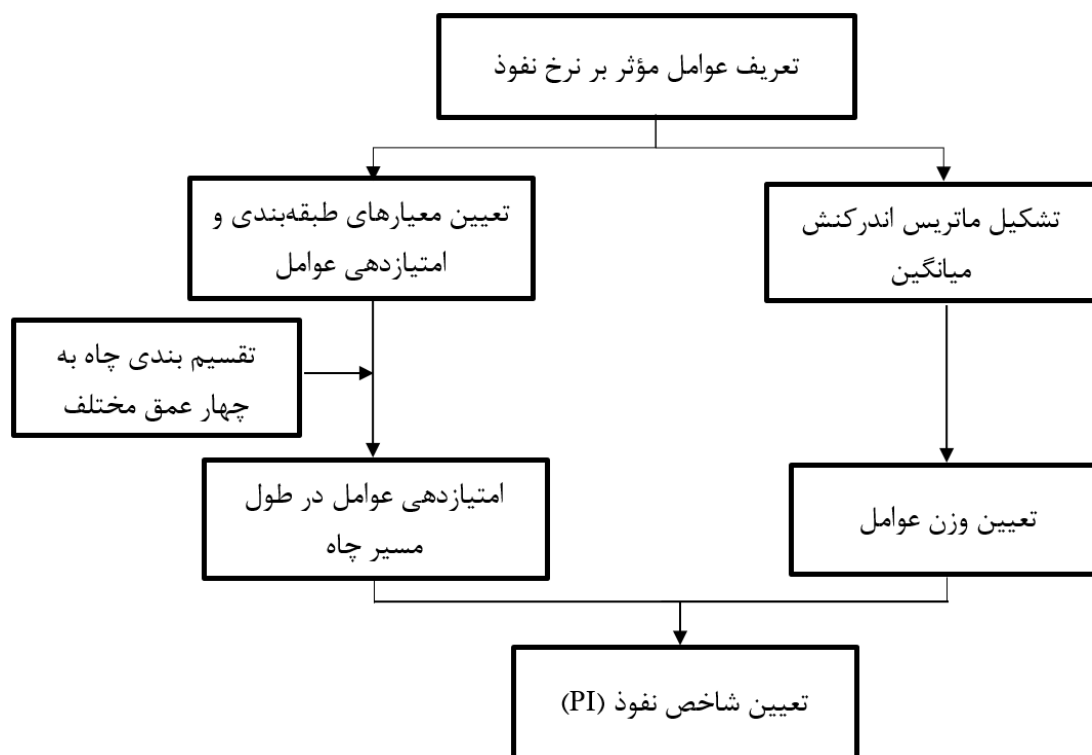
3-Drillability

میزان نرخ نفوذ حفاری در چاه‌های بعدی میدان مورد نظر و میدان‌هایی با ویژگی‌های ساختاری مشابه باشد.

توده سنگ یا به عبارتی دیگر سازند مورد نظر حفاری به عنوان محیط نقش بسیار اساسی بر قابلیت حفاری دارد. از این رو تحقیقات متعددی در راستای تاثیر پارامترهای سنگ بر نرخ نفوذ حفاری صورت گرفته است. طبق بررسی‌ها و مطالعات کتابخانه‌ای به عمل آمده عوامل ژئومکانیکی موثر بر نرخ نفوذ شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت تراکمی همه جانبه، مقاومت کششی سنگ، سختی، چگالی، تخلخل، عمق سازند، فشار منفذی، مدول الاستیک و ... می باشند (Terralog Technologies Inc, 2005; Kahraman, 2003; Bourgoyne et al., 1986).

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر عوامل ژئومکانیکی و عملیاتی از جمله مقاومت فشاری تک محوره، تخلخل، چگالی سنگ، مدول یانگ، سفتی سنگ، ساینده‌گی سنگ، مقاومت کششی، وزن روی مته، سرعت دوران مته، نرخ جریان سیال و وزن گل بر روی نرخ نفوذ از کاربرد روش سیستم‌های مهندسی سنگ^۱ (RES) که توسط هادسون^۲ (۱۹۹۲) ارائه گردید، استفاده می‌شود. سپس چاه مورد نظر با توجه به داده‌های موجود به چهار عمق مختلف تقسیم‌بندی می‌شود و شاخص نفوذ این چاه در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای انجام این پژوهش، یکی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان است. مراحل انجام پژوهش در شکل ۱-۱ آمده است.

1-Rock Engineering Systems
2-Hudson



شکل ۱-۱: مراحل انجام پژوهش

۵-۱- ساختار پایان نامه

در این فصل کلیات موضوع مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. در فصل دوم ابتدا به انواع روش‌های حفاری و انواع مت‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه به معرفی مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر پرداخته شده است. همچنین چاه به چهار عمق مختلف تقسیم بندی شده، تا بتوان برای هر یک از عمق‌ها، شاخص نفوذ تعیین نمود. سپس به مفهوم نرخ نفوذ به طور اجمالی اشاره می‌شود و در نهایت ارتباط عوامل مختلف بر نرخ نفوذ بررسی می‌شود. برای هر یک از عوامل نیز معیاری ارایه شده است. سپس اطلاعات پروژه‌ی مورد بررسی بر اساس آن‌ها طبقه‌بندی شده است. در فصل سوم به معرفی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و پیشینه‌ی کاربرد آن در علوم مختلف پرداخته شده است. همچنین پیشرفت‌های صورت گرفته در نحوه‌ی کدگذاری ماتریس اندرکنش مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم با استفاده از رویکرد RES، پس از بررسی تاثیر عوامل بر نرخ نفوذ، وزن هر یک از عوامل مؤثر بر نرخ نفوذ تعیین شده و در ادامه شاخصی با عنوان شاخص نفوذ (PI) برای هر یک از عمق‌های

مسیر چاه برآورد شده است. در فصل آخر نتایج و پیشنهادهای از کار موردنظر ارایه می گردد.

فصل دوم

تأثیر عوامل مختلف بر نرخ نفوذ

حفاری

۱-۲- مقدمه

حفاری نقش مهمی را در اکتشاف و استخراج نفت و گاز ایفا می‌کند. با توجه به هزینه‌های بالای عملیات حفاری، پیش‌بینی مدت زمان حفاری و ایجاد یک برنامه زمان‌بندی برای این فرآیند، می‌تواند راندمان عملیات را به نحو موثری افزایش و هزینه‌های مرتبط با آنها را کاهش دهد. مفهوم زمان برای هر عملیات حفاری را می‌توان با نرخ نفوذ بیان کرد. عوامل زیادی بر روی نرخ نفوذ تأثیر دارند که در صورت یافتن ارتباط بین این عامل‌ها و نرخ نفوذ می‌توان به مدلی جهت بهینه‌سازی عملیات حفاری دست پیدا کرد.

از این‌رو در این تحقیق سعی بر این است که با توجه به اهمیت و نقش حفاری در پروژه‌های نفتی و عمرانی، عوامل موثر بر نرخ نفوذ حفاری در سنگ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی عوامل موثر بر نرخ نفوذ حفاری به دو گروه اصلی عوامل قابل کنترل و عوامل محیطی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این میان خصوصیات سنگ (محیطی) به جهت غیر قابل تغییر بودن، از اهمیت بسزایی جهت تعیین نرخ نفوذ برخوردار است.

در این فصل ابتدا انواع روش‌های حفاری مرسوم و متدهای مختلف تشریح شده است. سپس به معرفی میدان و چاه موردنظر پرداخته می‌شود. در نهایت عوامل مختلف تأثیرگذار بر روی نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که مطالعه این عوامل با جزئیات و حواشی بسیاری همراه است، سعی شده در حین مختصر بودن نسبتاً کامل و دربرگیرنده‌ی بیشتر عوامل تأثیرگذار باشد.

۲-۲- حفاری

از زمان‌های دور، ملت‌های متمدن، به منظور دسترسی به آب و بعضی مواد معدنی، اقدام به انجام عملیات حفاری می‌کردند. هنوز آثاری از تونل، قنات و چاه‌های عمیق حفر شده توسط ایرانیان و چینیان

قدیم دیده می‌شود. تا چند دهه قبل سیستم حفاری دست^۱ جهت ایجاد چال برای احداث تونل خط راه‌آهن و معدن متداول بود. حفر اولین چاه توسط شخصی به نام دریک^۲ در ایالت پنسیلوانیا را باید سرآغاز شکل‌گیری صنعت نفت در جهان دانست. از همان ابتدا حفاری به عنوان یکی از مهمترین مراحل عملیات اکتشاف و بهره‌برداری چاه‌های نفت و گاز مطرح بوده است. دلیل این امر را می‌توان در دسترسی مستقیم به هیدروکربن‌های نفتی از طریق چاه حفر شده و استحصال آنها از اعماق بسیار زیاد جستجو کرد (Bourgoyne et al., 1986).

حفاری، فروپاشی توده سنگ در تقابل بین مته و سنگ، و اعمال نیروهای برشی مختلف است. با این حال بازده حفاری یا عبارت دیگر نرخ نفوذ مته، مشخصاً به نحوه انتقال انرژی بین مته و سنگ بستگی دارد (Karanam and Misra, 1998).

سه مولفه اصلی برای هر نوع سیستم حفاری می‌توان برشمرد:

۱- ماشین حفاری (منبع انرژی^۳ یا تولید کننده)

۲- رشته‌ی حفاری (انتقال دهنده^۴)

۳- مته (مصرف کننده^۵)

به این سه مولفه در حفاری دورانی، مولفه‌ی چهارمی نیز به نام سیال حفاری اضافه می‌شود که وظایفی همچون پاکسازی چاه، کنترل گرد و غبار، خنک‌کاری مته و در مواقعی پایدار سازی دیواره‌های چاه را برعهده دارد (Karanam and Misra, 1998).

۲-۲-۱- حفاری ضربه‌ای

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفاری چاه‌های نفت است که هنوز هم از آن در حفاری چاه‌های آب استفاده می‌شود. مکانیزم کار بدین ترتیب است که توسط یک رشته لوله سنگین یا یک وزنه

1-Hand hold drilling

2-Drake

3-Source of energy

4-Transmitter

5-Applicator

که بالا و پایین می‌رود به سازند نیرو وارد شده و عمل حفاری صورت می‌پذیرد. سپس مخلوطی از خرده‌ها و آب توسط پمپ خارج می‌شود. همچنین دیواره چاه توسط لوله جداری پابرجا می‌ماند. عمیق‌ترین چاه حفر شده با این روش مربوط به سال ۱۹۱۸ است که عمق آن ۲۲۵۰ متر بوده است (Nguyen, 1996).

۲-۲-۲- حفاری دورانی

حفاری دورانی رایج‌ترین و پرکاربردترین روش حفاری در صنعت نفت و گاز می‌باشد. هرچند اولین چاه‌های نفت به روش کابلی حفر شدند ولی از اوایل قرن بیستم برتری حفاری دورانی آشکار شد. تحقیقات فراوانی در این مدت صورت گرفته و پیشرفت‌هایی که مخصوصاً در زمینه طراحی و ساخت مته‌های حفاری دورانی به وجود آمده، سبب افزایش کارایی و بهینه شدن این روش شده است تا آنجا که امروزه برای دستیابی به نفت و گاز چاه‌هایی با عمق بیش از ۱۰۰۰۰ متر حفر شده است (Bourgoyne et al., 1986). فرآیند حفاری دورانی توسط مجموعه‌ای از تجهیزات که به‌طور کلی دکل^۱ حفاری نامیده می‌شود، صورت می‌گیرد. همواره چهار عمل اصلی بر روی آن انجام می‌گیرد که عبارت اند از: بالابری^۲، چرخش رشته‌ی حفاری^۳، گردش سیال حفاری^۴ و کنترل چاه^۵.

در این روش حفاری، لوله سنگین حفاری^۶ با عمل چرخش روی سرمته حفاری و وزن اعمالی روی آن موجب خردایش و ساییدگی سنگ می‌شود. همچنین دکل حفاری مجهز به اتاقک و مکانی برای ذخیره‌سازی گل حفاری جهت کنترل جریان در طول مدت حفاری است. گل حفاری به هنگام چرخش از نازل‌های مته خارج شده خرده‌های حفاری را از زیر مته‌ها پاک‌سازی می‌کند (Osguie, 2007).

بعلاوه زمانی که چاهی حفاری می‌گردد، لوله‌گذاری در جداره آن انجام می‌شود. لوله‌های جداری روی سکو به یکدیگر متصل شده و به ترتیب به درون چاه فرستاده می‌شوند تا ابتدای لوله که کفشک

1-Rig
2-Hoisting
3-Rotating
4-Circulating
5-Controlling
6-Drill Collar

نامیده می‌شود به آخرین عمق چاه برسد. در این زمان عملیات سیمان‌کاری آغاز می‌گردد. سر لوله جداری پایه^۱ به لوله‌گذاری سطحی بسته می‌شود و وزن تمام لوله‌های جداری یک چاه را تحمل می‌کند. همچنین نیروهای وارد بر آن از طریق لوله جداری سطحی به زمین منتقل می‌شود. پس از پایان لوله‌گذاری در مرحله اول حفاری، عملیات توسط مته‌ای با قطر کمتر از ناحیه‌ی لوله گذاری شده و سیمان کاری شده ادامه پیدا خواهد کرد. این روند تا دسترسی به پایین‌ترین نقطه چاه ادامه خواهد داشت (Osguie, 2007).

۲-۳- مته‌های حفاری

در فرآیند حفاری یک چاه، مته حفاری جز اساسی‌ترین ابزار مورد استفاده است. شرایط مختلف در حین حفاری طراحی متنوع مته‌ها را به دنبال دارد (Bourgoyne et al., 1986). در انتخاب مته کارکرد مته قبلی، مطالعات سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی و هزینه‌های حفاری به دلار در فوت مورد نظر قرار می‌گیرد. گاهی اوقات تغییر دائم طرح و نوع مته‌های تولیدی، انتخاب را دشوار می‌سازد (Moore, 1986). به طور کلی مته‌های دورانی به دو گروه کلی مته‌های تیغه متحرک (غلطکی مخروطی)^۲ و مته‌های تیغه ثابت (سایشی)^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲-۳-۱- مته تیغه متحرک (غلطکی مخروطی)

این نوع مته‌ها از دو یا چند مخروط که دارای عناصر برنده هستند تشکیل شده‌اند و در حالی که کل مته در ته چاه می‌چرخد، هر کدام از مخروط‌ها حول محور خود در حال چرخش هستند و سپس در اثر وزن اعمالی روی مته، دندانه‌های مته در سنگ فرو رفته و باعث خرد شدن سنگ می‌گردند. استفاده از این نوع مته‌ها، با معرفی مته دو مخروطی در ۱۹۰۹ آغاز شد و به تدریج گسترش یافت تا آنجا که امروزه ۹۵٪ چاه‌های نفت با این نوع مته‌ها حفاری می‌شوند. اندازه و ضخامت قسمت‌های مختلف مته‌های

1-Casing Head Housing

2-Roller Cutter or Roller cone Bits

3-Fixed Cutter or Drag Bits

غلطکی مخروطی به نوع سازند تحت حفاری بستگی دارد و می‌توانند با ترکیب‌های مختلف اندازه، شکل و نوع دندان، فاصله محوری، نوع یاتاقان و مکانیزم روانکاری تولید شوند. این نوع مته‌ها که به آن‌ها مته‌های سنگی^۱ نیز می‌گویند، به دو صورت دندانه‌ای و دکمه‌ای دیده می‌شوند (Rabia, 1991 ; Osguie, 2007).

۲-۱-۳-۱- مته دندانه کنگره‌ای (فولادی)^۲

این مته‌ها بیشتر مخصوص حفاری سازندهای نرم بوده و در ابتدای حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع مته‌ها، دندانه‌های فولادی را کنگره‌ای شکل (هرمی شکل) و از همان فلزی که برای ساخت مخروط‌ها استفاده شده می‌سازند. متداول‌ترین نوع این مته‌ها، مته‌های سه مخروطی^۳ می‌باشند که در مقاطع بالایی چاه جهت حفاری سازندهای نرم و چسبنده به کار می‌روند. در شکل ۱-۲ نمونه‌ای از مته دندانه‌ای فولادی سه مخروطی نشان داده شده است (Bourgoyne et al., 1986; Nguyen, 1996).



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از مته دندانه کنگره‌ای (www.moabbbit.com)

این مته‌ها براساس طراحی‌شان در سازندهای مختلف دارای کاربرد هستند. برای حفاری سازندهای نرم از مته‌های غلطکی دندانه‌ای با دندانه بلند و فاصله زیاد دندانه‌ها و در نظر گرفتن زاویه مرکزی^۴ زیاد استفاده می‌شود. در سنگ‌های سخت طول دندانه‌ها باید کوتاه‌تر و تعداد آن‌ها در واحد سطح باید بیشتر

1-Rock Bit

2-Milled or Steel Tooth Cutter

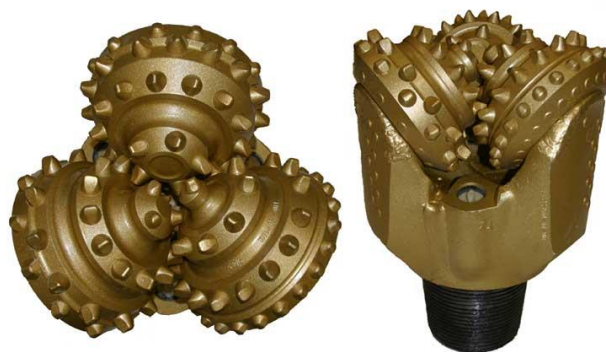
3-Tri-Cone Bit

4-Offset

باشد. این مته‌ها به اقتضای کاربردشان به سه گروه یک، دو و سه مخروطی تقسیم‌بندی می‌شوند (schlumberger,2000). همچنین مته‌های دندانه‌ای جثه‌ی خیلی درشتی داشته و قادرند شرایط دشوار حفاری را تحمل کنند، با این حال نسبتاً سریع فرسوده شده و از کار می‌افتند. جهت جلوگیری از فرسایش سریع دندانه‌های مته، سطح آن را توسط پودر تنگستن کاربید روسخت‌کاری^۱ می‌کنند (Devereux, 1999).

۲-۱-۳-۲- مته‌های دکمه‌ای

در این نوع مته‌ها که به مته‌های تنگستن کاربید^۲ نیز معروف‌اند دندانه‌ها از جنس تنگستن کاربید بوده و بر روی سطح مخروط مته نصب می‌شوند (شکل ۲-۲). این مته‌ها معمولاً در سنگ‌های سخت با زاویه مرکزی پایین یا صفر استفاده می‌شوند. این مسئله باعث می‌شود که آن‌ها در مسیر درستی چرخش کرده و از این‌رو حفاری در یک پروسه ضربه‌ای انجام می‌شود. دکمه‌های به کار رفته در مته‌های مخصوص سازندهای سخت، کوتاه و دارای نوک نیمه‌کروی^۳ هستند. بعلاوه دندانه‌های تنگستن کاربید طراحی شده برای حفاری در سازندهای نرم، بلند بوده و دارای نوک اسکنه‌ای شکل^۴ (قلمی شکل) هستند. این مته‌ها نیز با توجه به نوع کاربردشان به سه گروه یک، دو و سه مخروطه تقسیم می‌شوند (Prassl,2001 ;Nguyen, 1996 ; Bourgoyne et al., 1986).



شکل ۲-۲: نمونه‌ای از مته دکمه‌ای (www.moabbit.com)

-
- 1-Hard Facing
 - 2-Tungstan Carbide Insert Cutters(TCI)
 - 3-Hemispherical end
 - 4-Chisel Shaped end

۲-۳-۲- مت‌های تیغه ثابت (سایشی)

تقریباً همه‌ی این نوع مت‌ها از تیغه‌های برنده‌ی ثابت که با بدنه‌ی مت‌ یکپارچه هستند، تشکیل شده‌اند و چرخش آنها از چرخش رشته حفاری جدا نیست. مزیت مت‌های تیغه ثابت بر مت‌های غلتکی مخروطی در نداشتن هیچ گونه بخش‌های چرخنده است که این مسئله در چاه‌های کم قطر که فضای کافی برای طراحی عناصر برنده و یاتاقان‌هایی با مقاومت مناسب وجود ندارد، بسیار مهم می‌باشد. از طرف دیگر یک تکه بودن مت‌ها امکان شکستن آن را نیز کاهش می‌دهد (Bourgoyne et., al 1986). استفاده از این نوع مت‌ها به زمان معرفی حفاری دورانی در اواخر قرن نوزدهم برمی‌گردد. نوع ابتدایی این مت‌ها، مت‌های دُم ماهی^۱ بودند که خیلی زود کنار گذاشته شدند. در ادامه با پیشرفت متالورژی مت‌های مختلف از قبیل مت‌های الماس طبیعی، مت‌های الماس مصنوعی عادی و پایدار در حرارت بالا طراحی و ساخته شدند (Prassl, 2001).

۲-۳-۱- مت‌های الماس معمولی

این ابزار دارای دانه‌های الماسی بسیار ریز است که در سطح و اطراف مت‌ قرار گرفته و بدنه آن‌ها از فولاد و تنگستن کاربید است. از مت‌های الماسی بیشتر در سازندهایی که در شرایط تنشی ته چاه دارای حالت شکست پلاستیک هستند، استفاده می‌شوند. اندازه و تعداد الماس‌های بکار رفته در مت‌های الماسی به سختی سازند تحت حفاری بستگی دارد. مت‌های مربوط به سازندهای سخت دارای دانه‌های خیلی کوچک الماس هستند در صورتی که مت‌های مربوط به سازندهای نرم دارای دانه‌های نسبتاً بزرگ الماس هستند. این مت‌ها در حین حفاری گرمای زیادی را ایجاد می‌کنند که در این حالت به دبی بالای گل برای خنک و تمیز شدن نیاز دارند. نمونه‌هایی از مت‌های الماسی در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود (Prassl, 2001 ; Nguyen, 1996).



شکل ۲-۳: نمونه‌هایی از مته‌های الماسی (www.drillingcourse.com)

۲-۲-۳-۲- مته الماس مصنوعی

از اواسط دهه ۱۹۷۰ خانواده‌ی جدیدی از مته‌های تیغه ثابت به نام مته‌های الماس مصنوعی^۱ (PDC) معرفی شدند. قیمت بالای مته‌های الماس طبیعی باعث ایجاد چنین نوع مته‌هایی شد. این مته‌ها دارای دانه‌ها یا دکمه‌های چند بلوری الماس بوده که بر بدنه مته فلزکاری شده‌اند و عناصر برنده مته را تشکیل می‌دهند (Nguyen, 1996).

این نوع الماس بسیار مقاوم بوده و هنگامی که افزایش بار روی مته دارای محدودیت است بهترین انتخاب می‌باشد که در نتیجه باعث بالا بردن سرعت حفاری نسبت به مته‌های غلتکی مخروطی و کاهش هزینه حفاری می‌گردد. بهترین عملکرد آنها در سازندهای نرم، سفت، نسبتاً سخت و ساینده که چسبنده نیستند (مقاومت فشاری حدود ۲۰۰ Mpa)، می‌باشد. نمونه‌هایی از این نوع مته در شکل ۲-۴ نشان داده شده است (Raymond, 2001; Prassl, 2001).

1-Polycrystalline Diamond Compact (PDC)



شکل ۲-۴: نمونه‌ای از مته PDC (www.vareloilandgas.com)

۳-۲-۳-۲- مته الماس مصنوعی پایدار

مته‌های الماس مصنوعی پایدار^۱ (TSP) نسل توسعه یافته مته‌های الماسی هستند. کلایتون^۲ برای اولین بار این ابزار را که ۱۳/۵ برابر در مقابل سایش از PDC مقاوم‌تر بود را معرفی کرد. این نوع مته‌ها در حرارت بالاتری از مته‌های PDC ساخته می‌شوند و در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کارایی مناسبی دارند. همچنین کارایی بهتری از حفاری در سازندهای خیلی سخت و ساینده تا مقاومت ۳۴۰ مگاپاسکال را نسبت به سایر مته‌ها از خود نشان می‌دهند. الماس TSP به واسطه‌ی شکل مثلی‌شان دارای لبه‌های تیزی برای برش سنگ هستند و غالباً همراه الماس‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Demeng, Che et al, 2012).



شکل ۲-۵: نمونه‌ای از مته‌های TSP (www.vareloilandgas.com)

1-Thermally Stable Pdc (TSP)
2-Clayton

۴-۲- معرفی میدان مورد مطالعه

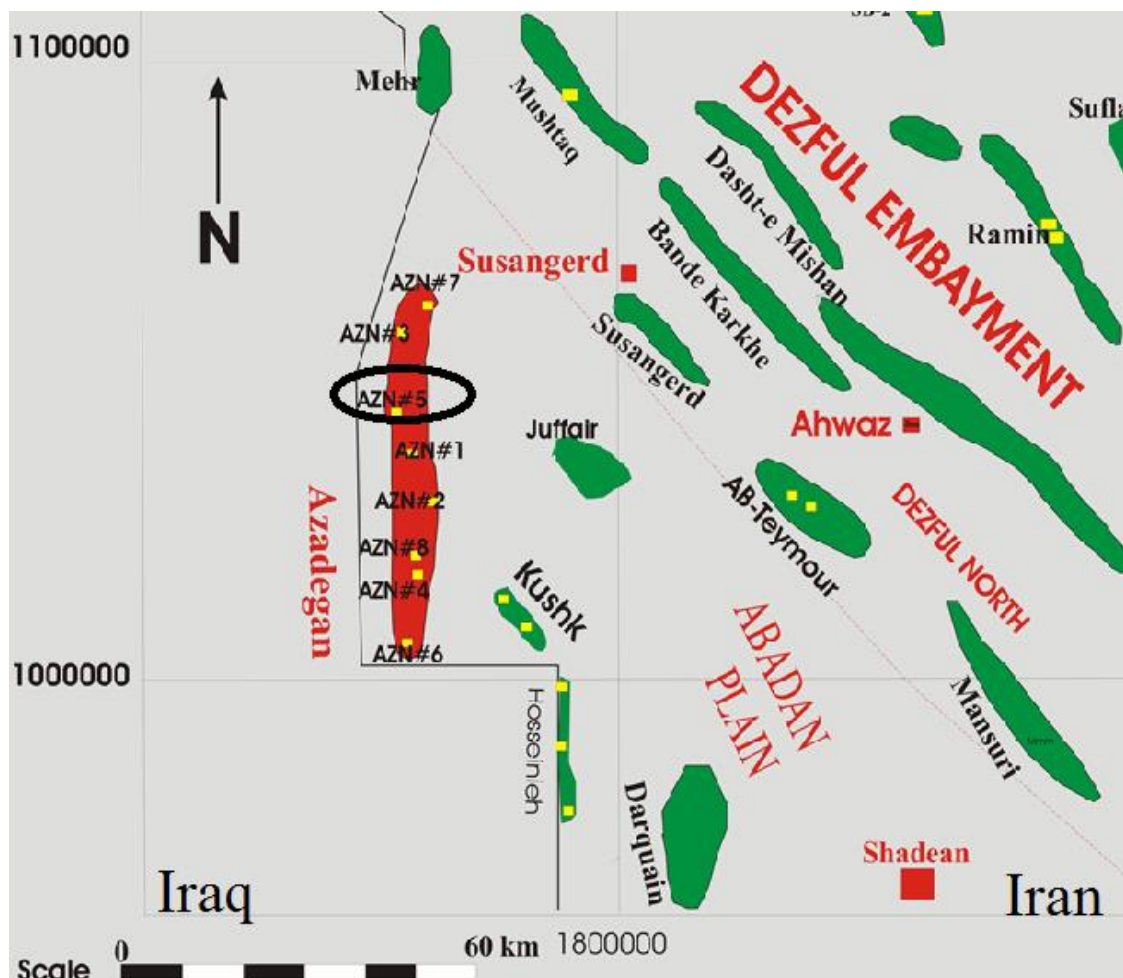
مطالعه موردی که برای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده یکی از چاه‌های میدان آزادگان است. در ادامه به معرفی این میدان و چاه مورد نظر پرداخته می‌شود.

میدان آزادگان، بزرگترین میدان نفتی ایران و یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جهان است که کشف آن به سال ۱۳۷۶ باز می‌گردد. این میدان در محدوده‌ای به وسعت ۲۰ در ۶۰ کیلومتر، در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب اهواز، جنوب غربی دزفول و موازی با خط مرزی ایران و عراق قرار دارد. این میدان در شمال میدان یادآوران (منطقه کوشک-حسینیه) و غرب میدان جفیر واقع شده است. لازم به ذکر است که در مجاورت این میدان، میدان مجنون عراق قرار دارد (جدباوی، ۱۳۹۱).

ذخیره اثبات شده این میدان ۳۳ میلیارد بشکه تخمین زده شده است. در این میدان چهار لایه سروک، کژدمی، گدوان و فهلپان به عنوان مخازن قابل بهره‌برداری شناخته شده و با حفر چاه شماره ۷ این میدان، سازند نفتی ایلام و لایه ماسه سنگی بورگان نیز حاوی نفت قابل تولید ارزیابی شده‌اند (جدباوی، ۱۳۹۱؛ ثانی، ۱۳۹۲). میدان آزادگان دارای دو بخش شمالی و جنوبی است. تحقیقات به عمل آمده در این گزارش مربوط به یکی از چاه‌های واقع در میدان آزادگان شمالی است.

۴-۲-۱- موقعیت چاه مورد نظر

چاه مورد مطالعه با طول و عرض جغرافیایی ۱۹۲۳۵۵ و ۳۴۷۴۰۴۹ در میدان شمالی آزادگان واقع شده است. این میدان با مساحتی حدود ۴۶۰ کیلومتر مربع بخشی از میدان نفتی آزادگان است که در منطقه مرز مشترک بین ایران و عراق در جنوب غرب ایران واقع شده که عمدتاً در تالاب هورالهویزه قرار گرفته است (جدباوی، ۱۳۹۱). موقعیت منطقه‌ای میدان آزادگان و همچنین چاه‌های حفر شده در این میدان در شکل ۲-۶ مشخص گردیده است. چاه مورد نظر تحقیق نیز به صورت مشخص در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: موقعیت میدان و چاه مورد مطالعه (ثانی، ۱۳۹۲)

۲-۴-۲- سنگ‌شناسی سازندهای میدان

میدان نفتی آزادگان یک تاق‌دیس تحت‌الارضی با امتداد شمالی - جنوبی است که از نظر تقسیم بندی ساختاری ناحیه‌ای، در پهنه چین خورده-رورانده زاگرس و در زیر حوضه فرو افتادگی دزفول واقع شده است (محبوبی و همکاران، ۱۳۹۳). سازندهای میدان مورد مطالعه شامل سازندهای آغاجاری، گچساران، آسماری، پابده، گورپی، ایلام، لافان، سروک، کژدمی، داریان، گدوان و فلهیان می‌باشند. توالی این سازندها در چاه مورد نظر از جدید به قدیم بر اساس عمق در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- ۱: توالی سازندها در چاه مورد مطالعه (جدباوی، ۱۳۹۱)

سازند	سر سازند(متر)-عمق
آغاجاری	۸/۹۸
گچساران	۱۲۷۲
آسماری	۱۸۸۰
پابده	۲۱۸۰
گورپی	۲۴۱۵
ایلام	۲۶۷۲
لافان	۲۷۵۱
سروک	۲۷۶۰
کژدمی	۳۳۷۶
داریان	۳۶۱۹/۳
گدوان	۳۸۰۲
فهلپان	۴۱۷۲

با توجه به اطلاعات نگارهای چاه‌پیمایی موجود در بازه ۲۶۶۰ تا ۳۶۱۰ متر اطلاعات مربوط به سازندهای این بازه از عمق مورد بررسی قرار گرفت. عمده این سازندها در گروه بنگستان قرار گرفته‌اند که بخش قابل توجهی از مخزن چاه مورد نظر را تشکیل می‌دهد. بر اساس گزارش جیمز و واند (۱۹۶۵) از آلبین تا کامپین، یک چرخه رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام را می‌توان در زاگرس شناسایی کرد. به مجموعه سازندهای یاد شده گروه بنگستان نام داده شده است که نام آن از کوه بنگستان در شمال بهبهان گرفته شده است.

بخش میانی کرتاسه‌ی زاگرس شامل دو سازند کژدمی و سروک می‌باشد که مرز پایینی آنها ناپیوستگی آپتین و مرز بالایی آنها ناپیوستگی تورنین است. با این حال، در ناحیه مورد بررسی، بخش شیلی لافان را می‌توان جزو کرتاسه میانی دانست (آقانباتی، ۱۳۸۵).

مشخصات سازندهای مورد بررسی به شرح زیر است:

- سازند گورپی: محل الگوی این سازند در لرستان است و متشکل از آهک مارنی و مارن خاکستری و در انتها شامل سنگ آهک و شیل است که دارای سنگواره‌های ذره‌بینی پلانگتون‌هاست. این سازند تنها در شمال فارس و شمال شرقی فرو افتادگی دزفول، مشارکت مختصری در تشکیل نفت دارد. سن نهشته‌های منتسب به این سازند سانتونین تا ماستریشین می‌باشد.
- سازند ایلام: محل الگوی این سازند در ایلام است. جنس آن اغلب آهکی و آهک مارنی و مارن است. سن تشکیل این سازند از کنیاسین تا کامپانین می‌باشد. این سازند دارای ذخایر فرعی و کوچک نفتی در میادین آب تیمور، اهواز، امام حسن، منصوری و دارخوین و همچنین دارای ذخایر گاز در میدان هلووش است.
- سازند لافان: در فارس ساحلی، یک واحد شیلی سازند سروک (در زیر) و سازند ایلام (در بالا) را جدا می‌کند. این واحد شیلی که بخش شیلی لافان نام‌گذاری شده، از دیدگاه متفاوت هم‌ارز سازند سورگاه است. تغییرات سنی این شیل‌ها زیاد است، ولی سن سنونین پیشین، منطقی‌تر است (مطیعی، ۱۳۷۲).
- سازند سروک: بطور کلی این سازند از سنگ آهک تشکیل شده است که بتدریج در بعضی نقاط همراه با مقداری آهک مارنی و کچی و همچنین شیل همراه است. محل الگوی سازند سروک در گروه بنگستان در شمال خوزستان است. عمده تخلخل این سازند از نوع بین دانه ای و بین بلوری است. سن این سازند به دوره آلبین تا تورونین بر می‌گردد. میدان مهم گازی این مخزن شامل میادین بی‌بی حکیمه، دال پری و کوه موند است و میدان‌های مهم نفتی این مخزن شامل میادین: اهواز، بی‌بی حکیمه، کیلور کریم، سروستان و سیاه مکان است.
- سازند کژدمی: این سازند از سنگ آهک با مقداری آهک مارنی و شیل با سن آلبین تا سنومانین تشکیل شده که قاعده آن یک لایه ماسه سنگ خاکستری و قهوه‌ای با دانه‌بندی

متوسط تا درشت گلوکونیتی و همچنین گل سنگ‌های سیاه رنگ قرار گرفته است. سازند کژدمی بصورت دگر شیب بر روی رسوبات کرتاسه تحتانی قرار گرفته است. این سازند دارای قابلیت تولید نفت به مقدار قابل توجهی در لرستان و خوزستان بوده و تحقیقات نشان می‌دهد نفت بیشتر مخازن این مناطق از این سنگ منشا تامین شده و مهمترین سنگ منشا ایران است.

اطلاعات زمین شناسی بدست آمده حاصل مطالعات لرزه‌نگاری و خرده‌های حفاری است. این اطلاعات شامل نوع سنگ‌های موجود در ترکیب سازندهای مختلف می‌باشد.

۲-۴-۳- تشکیل پایگاه داده‌ها

بر مبنای داده‌های بدست آمده از چاه مورد نظر و سطح اطلاعات موجود، پایگاه داده‌ها تشکیل شد. اطلاعات مورد نیاز جهت تشکیل این بانک اطلاعاتی به شرح زیر است:

- گزارش نمودارگیری گل^۱
- نگارهای پتروفیزیکی
- گزارش‌های روزانه حفاری

طی بررسی‌های به عمل آمده داده‌های نمودارگیری گل و نگارهای پتروفیزیکی در بازه مخزنی ۲۶۶۰ تا ۳۵۸۷ دارای بازه مشترک بوده‌اند که بدین ترتیب بررسی در این عمق خاص انجام خواهد شد. حفاری این بازه خاص مخزنی توسط مته‌های PDC و مغزه‌گیر با قطر ۸/۵ اینچ انجام شده است که باتوجه به جامعیت اطلاعات مربوط به مته PDC و گستردگی استفاده از این نوع مته خاص در طول حفاری یک چاه، به بررسی اطلاعات مربوط به آن پرداخته شده است. در این مجموعه داده‌های متناظر با قطر چاه بیش از ۱۰ اینچ به دلیل عدم دقت بالا در عملیات نگارگیری حذف گردید. بدین ترتیب تعداد داده‌های نهایی شده برای ارزیابی ۶۷۶ داده است که مربوط به بخش زیرین سازند گورپی و همچنین

1- Mud Logging

بخش اعظمی از سازندهای ایلام، سروک و کژدمی است. نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده در جدول ۲-۲ آورده شده است. این مجموعه اطلاعات شامل دو دسته پارامترهای حفاری (عملیاتی) و پارامترهای ژئومکانیکی هستند که مربوط به چهار عمق مختلف چاه است.

جدول ۲-۲: نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده (نوروزی بزمین آبادی، ۱۳۹۳)

۳۵۷۴	۳۳۷۱	۳۱۱۳	۲۷۲۸	عمق (متر)
۱۰/۵	۱۴/۵	۱۳/۷	۱۱	وزن روی مته (کیلوپوند)
۱۲۰	۱۲۰	۱۱۹	۱۲۰	سرعت دوران مته (دور بر دقیقه)
۳۴۸/۶۲	۳۴۴/۷۷	۳۴۷/۸۳	۳۴۹/۰۶	نرخ جریان سیال (گالن بر دقیقه)
۷۹/۸۷	۷۹/۸	۷۹/۹۶	۸۱/۷۸	وزن گل (پوند بر فوت مکعب)
۳/۹۶	۲/۳	۰/۸	۰/۲۸	ضریب سایش دندان مته
۰/۰۲۵	۰/۰۴۷	۰/۰۸	۰/۲۳	تخلخل
۲/۶۹	۲/۶۱	۲/۵۵	۲/۳۳	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۲۴/۷۴	۲۱/۳۷	۱۸/۴۹	۸/۵۱	مدول یانگ استاتیک (گیگاپاسکال)
۱۱۰/۲۴	۷۸/۳۹	۸۷/۳	۴۴/۲۳	مقاومت فشاری تک محوره (مگاپاسکال)
۱۶/۷۴	۱۲/۷۷	۱۲/۷۶	۸/۱۳	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۰/۵۷	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	فشار منفذی (پوند بر اینچ مربع بر فوت)

۲-۵- نرخ نفوذ حفاری و عوامل موثر بر آن

نرخ نفوذ حفاری عبارت است از میزان پیشروی متهی حفاری در سنگ‌ها و سازندهای تحت حفاری در واحد زمان. این پارامتر با واحد فوت بر دقیقه یا متر بر ساعت شناخته شده است. نرخ نفوذ متهی حفاری به همراه نرخ فرسودگی مته، دو عاملی هستند که تأثیر قطعی و مستقیم بر هزینه‌های حفاری به ازای هر فوت دارند. اندازه‌گیری نرخ نفوذ در صنعت حفاری بسیار حائز اهمیت است و در

مواردی از قبیل بررسی چگونگی عملکرد مته‌ها (به عنوان مثال فرسودگی و شکستگی دندانهای مته) و بهینه‌سازی عوامل قابل کنترل حفاری (بار روی مته و سرعت دوران) به حفار کمک می‌کند. این شاخص توسط پایش عملیات حفاری و چاه‌نگاری، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. به‌طور کلی نرخ نفوذ به دو شکل لحظه‌ای^۱ و متوسط بررسی می‌شود (Nguyen, 1996; Mensa et al., 2010). نرخ نفوذ آنی (لحظه‌ای) در مدت زمان یا مسافت محدود و در واقع تنها در حین حفاری ثبت می‌شود. با توجه به ارزیابی این میزان می‌توان به توصیف حفاری در هر سازند خاص و تاثیر پارامترهای حفاری بر عملیات حفاری پرداخت. نوع دیگر نرخ نفوذ محاسبه شده که به نرخ نفوذ متوسط معروف است، در طول مدت حفاری و در بازه زمانی که تجهیزات لوله حفاری وارد چاه می‌شوند تا برگشت آن محاسبه می‌شود. البته امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در چاه‌نگاری و فناوری‌های پایش عملیات حفاری برای اندازه‌گیری از ابزار و حسگرهای الکترونیکی استفاده می‌شود.

عوامل موثر بر نرخ نفوذ را می‌توان به دو دسته کلی عوامل قابل کنترل (عملیاتی) و عوامل محیطی (عوامل غیر قابل کنترل) تقسیم کرد (Karanam and Misra, 1998).

همان‌طور که از نام عوامل قابل کنترل پیدا است تغییر این عوامل در اختیار انسان است. در صورتی که عوامل غیر قابل کنترل یا عوامل محیطی از جانب محیط حفاری یعنی زمین و سازندهای تشکیل دهنده‌ی آن بر عملیات حفاری تحمیل می‌شوند و حفار در تغییر آنها نقشی ندارد.

با شبیه‌سازی عملیات حفاری و اضافه کردن نتایج خصوصیات سنگ در آن می‌توان به نحو قابل ملاحظه‌ای فرآیند حفاری را بهینه‌سازی و بهبود بخشید (Andrews et al., 2007). در تحقیق پیش‌رو تاثیر عوامل موثر بر نرخ نفوذ با تاکید بر شناخت و تاثیر پارامترهای مکانیکی صورت گرفته است. در ادامه پس از معرفی هر عامل، معیاری برای طبقه‌بندی آن ارائه گردیده است. هر معیار طبقه‌بندی شامل پنج دسته بوده و با توجه به شرایط حفاری به هر یک از دسته‌ها امتیازی از صفر تا چهار اختصاص داده

1-Instantaneous ROP

می‌شود. هر قدر شرایط حفاری و نرخ نفوذ بهتر باشد امتیاز بالاتری به آن تعلق می‌گیرد. امتیازهای معیارهای طبقه‌بندی، بر اساس نظر کارشناسان تعیین می‌شود. در نهایت نیز اطلاعات چاه مورد نظر بر اساس معیارهای ارایه شده، طبقه‌بندی می‌گردد.

۲-۵-۱- عوامل قابل کنترل

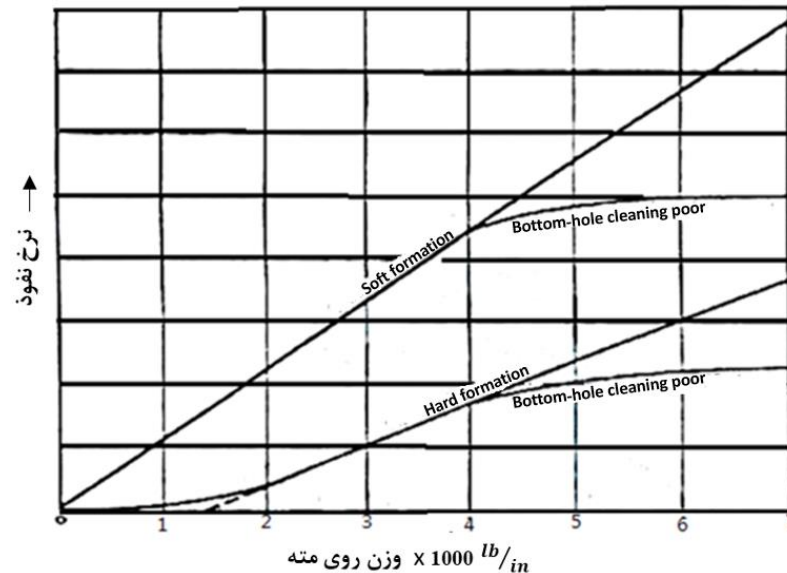
عوامل قابل کنترل در اختیار عامل انسانی بوده و نسبت به عوامل محیط، قابلیت انعطاف بیشتری دارند. کنترل این عوامل نسبت به عوامل محیطی به دلیل شرایط اقتصادی و زمین‌شناسی، قابل دسترس خواهد بود (Osguie, 2007; Eren and Ozbayoglu, 2010). انتخاب بهینه مقادیر این عوامل باعث بهبود نرخ نفوذ حفاری می‌شود. برای انجام یک حفاری بدون ریسک کنترل مقادیر عوامل عملیاتی تاثیر بسزایی دارد. برای مثال کنترل وزن گل باعث جلوگیری از ریزش در دیواره و فوران چاه می‌شود. همچنین با افزایش پارامترهای وزن روی مته و سرعت چرخش باید دقت داشت که علاوه بر کمترین میزان هزینه حفاری، پایداری رشته لوله حفاری تامین شود. با توجه به هیدرولیک مته و پاکسازی کامل چاه، مقدار جریان نیز باید به صورت بهینه انتخاب شود (Akgun, 2002). مهمترین عوامل قابل کنترل به شرح زیر است:

۲-۵-۱-۱- بار روی مته

آزمایش‌های صحرایی نشان می‌دهد که نرخ نفوذ به طور مستقیم با بار روی مته افزایش می‌یابد (Irawan et al., 2012). شکل ۲-۷ نمونه‌ای از نتایج عملیات میدانی است.

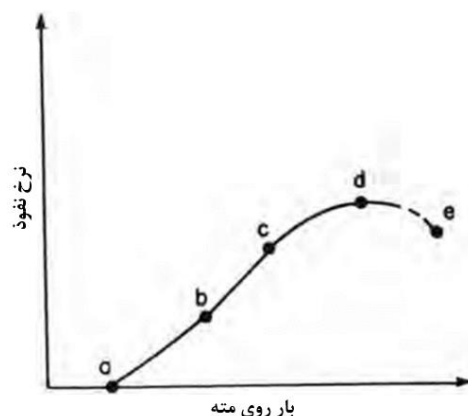
با توجه به شکل ۲-۷، تناسبی بین نرخ‌های نفوذ در سازند سخت با بارهای کمتر از ۲۰۰۰ پوند بر اینچ وجود ندارد. صرف نظر از نوع مته، فشار وارده‌ی مته به سنگ باید به اندازه‌ای باشد که بتواند بر مقاومت فشاری سنگ‌های سازند غلبه کند. در این مورد برای شکستن سنگ حدود ۱۵۰۰ پوند بر اینچ بار مته نیاز است. برای هر دو سازند نرم و سخت، تا زمانی که پاکسازی ته چاه به شکل مناسبی انجام گیرد، نرخ نفوذ به صورت مستقیم با بار مته افزایش پیدا می‌کند. به‌طور کلی این رابطه برای هر نوع مته

از جمله مته‌های دکمه‌دار برقرار است. حد بالای این رابطه هنگامی اتفاق می‌افتد که بدنه‌ی مته در تماس با سازند قرار گیرد (Moore, 1986).



شکل ۷-۲: رابطه‌ی نرخ نفوذ و بار روی مته (Moore, 1986)

همچنین در شکل ۸-۲ نمودار نمونه‌ی نرخ نفوذ-بار مته که به صورت تجربی با فرض ثابت بودن سایر متغیرهای حفاری بدست آمده و از شکل خاصی برخوردار است، نشان داده شده است. تا زمانی که بار روی مته به مقدار آستانه‌ای خود نرسد، نرخ نفوذ تغییر آنچنانی پیدا نخواهد کرد (نقطه a). از این قسمت به بعد با افزایش بار مته، نرخ نفوذ به سرعت برای مقادیر متوسط بار مته افزایش خواهد یافت (بخش ab). اغلب می‌توان رفتاری خطی را برای مقادیر متوسط بار مته مشاهده کرد (بخش bc). با این حال، در مقادیر بالاتر بار مته، افزایش پی‌درپی بار مته تنها اندکی بهبود را در نرخ نفوذ به دنبال خواهد داشت (بخش cd). در بعضی موارد، در مقادیر بسیار بالای بار مته، کاهش نرخ نفوذ قابل مشاهده است (بخش dc). غالباً این نوع رفتار "افت کارایی مته" نامیده می‌شود. پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در مقادیر بالای بار مته معمولاً ناشی از پاکسازی ناکافی ته چاه متناسب با تولید بیشتر خرده‌های حفاری یا فرو رفتن کامل عناصر برنده‌ی مته به درون سازند است (Bourgoyne et al., 1986).



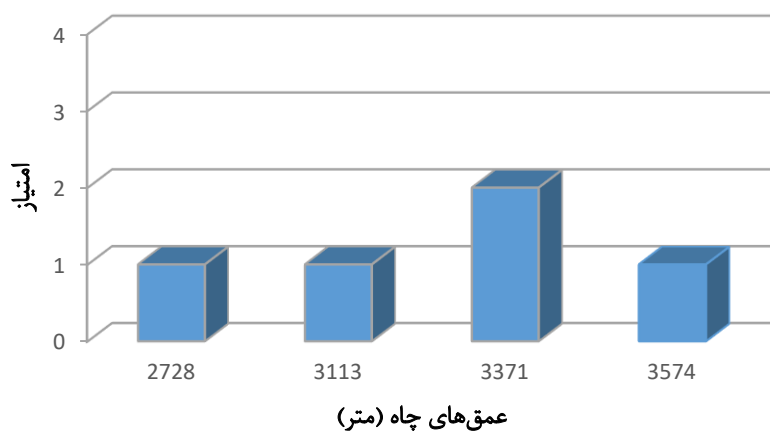
شکل ۲-۸: نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش بار مته (Bourgoyne et al., 1986)

به منظور طبقه‌بندی عامل بار روی مته، جدول ۲-۳ ارائه شده است. بر اساس این جدول، امتیازدهی بار روی مته در مسیر چاه مورد نظر، در چهار عمق مختلف در شکل ۲-۹ آمده است.

جدول ۲-۳: معیار طبقه‌بندی بار روی مته (Bourgoyne et al., 1986)

ردیف	میزان بار روی مته (klb)	توضیحات	امتیاز
۱	< 7	بسیار کم	۰
۲	۷-۱۴	کم	۱
۳	۱۴-۲۳	متوسط	۲
۴	۲۳-۳۵	زیاد	۴
۵	> 35	بسیار زیاد	۳

بار روی مته



شکل ۲-۹: امتیازدهی بار روی مته برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر بر اساس جدول ۲-۳

۲-۵-۱-۲- سرعت دوران مته

مطالعات نشان می‌دهد که رشد نرخ نفوذ نسبت مستقیمی با سرعت دوران مته^۱ در سازندهای

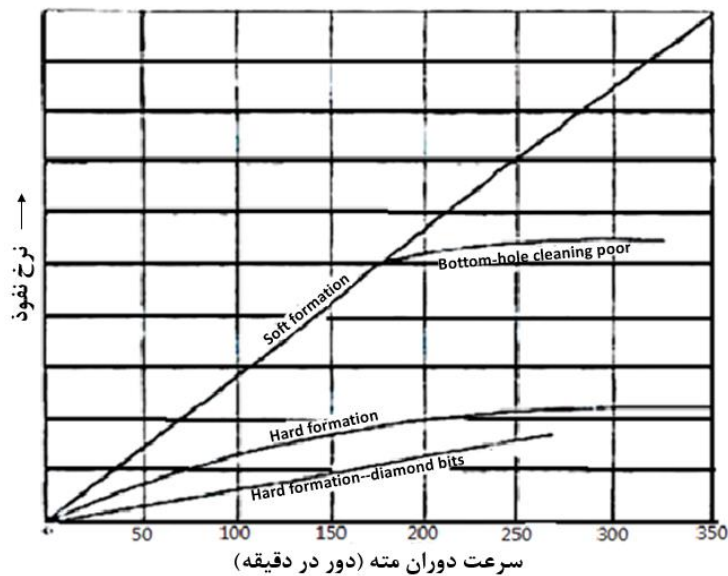
نرم بر خلاف سازندهای سخت دارد (Eren and Ozbayoglu, 2010; Rashidi et al, 2010; Bielstein and Gexirge 1950). در سازندهای سخت، نرخ نفوذ در سرعت‌هایی بیش از سرعت بهینه دوران، افزایش بیشتری نخواهد داشت (Nguyen, 1996).

سرعت دوران همچنین ممکن است به وسیله عوامل زیر محدود شود (Nguyen, 1996):

- لرزش رشته حفاری (پدیده تشدید که امکان خستگی و شکستگی را افزایش خواهد داد)
- نوع مشخصی از مته‌ها (مته‌های دکمه‌دار) که بر اساس خرد کردن سنگ کار می‌کنند (سرعت دوران اضافی موجب کاهش نرخ نفوذ و تخریب دکمه‌های کربید تنگستن می‌شود)
- ساییدگی در چاه‌های زاویه‌دار

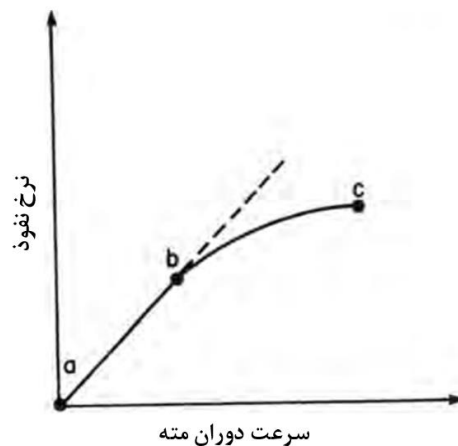
رابطه‌ی بین نرخ نفوذ و سرعت دوران در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. توجه داشته باشید

که در سازندهای نرم نرخ نفوذ رابطه‌ی مستقیمی با سرعت دوران دارد. در حالی که در سازندهای سخت میزان افزایش نرخ نفوذ با سرعت دوران از آهنگ کندتری برخوردار است. این مطلب علت اصلی استفاده از سرعت‌های بالای دوران، ۱۵۰ دور در دقیقه یا بیشتر، در سازندهای نرم و سرعت‌های پایین دوران (۴۰ تا ۷۵ دور در دقیقه) در سازندهای سخت است. همانطور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده مته‌های الماسی از این قاعده مستثنی هستند. در صورتی که پاکسازی ته چاه به شکل مناسبی انجام پذیرد، افزایش نرخ نفوذ با افزایش سرعت دوران از ارتباط نزدیکتری برخوردار خواهد بود (Moore, 1986).



شکل ۲-۱۰: ارتباط بین نرخ نفوذ و سرعت دوران مته (Moore, 1986)

همچنین در شکل ۲-۱۱ نمودار نمونه‌ی نرخ نفوذ-سرعت دوران که با فرض ثابت بودن سایر متغیرهای حفاری بدست آمده، نشان داده شده است. نرخ نفوذ معمولاً در مقادیر کم سرعت دوران به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند (بخش ab). در مقادیر بالاتر سرعت دوران، با افزایش سرعت دوران نرخ نفوذ کاهش پیدا می‌کند (bc). پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در مقادیر بالای سرعت دوران نیز به دلیل عدم پاک‌سازی کافی ته چاه است (Bourgoyne et al., 1986).



شکل ۲-۱۱: نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش سرعت دوران (Bourgoyne et al., 1986)

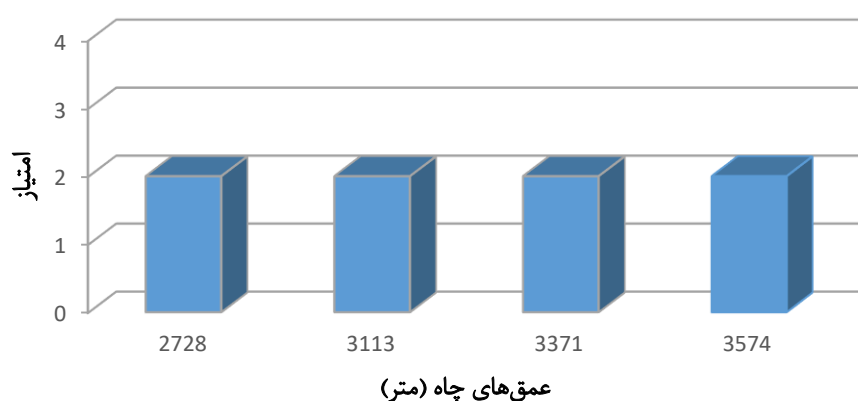
برای طبقه‌بندی عامل سرعت دوران مته، جدول ۲-۴ ارائه شده است. بر اساس این جدول، امتیازدهی سرعت دوران مته در مسیر چاه مورد نظر، در چهار عمق مختلف در شکل ۲-۱۲ نشان داده

شده است.

جدول ۲-۴: معیار طبقه‌بندی سرعت دوران مته (Bourgoyne et al., 1986)

امتیاز	توضیحات	سرعت دوران مته (rpm)	ردیف
۰	بسیار کم	<۶۰	۱
۱	کم	۶۰-۱۱۰	۲
۲	متوسط	۱۱۰-۱۶۰	۳
۴	زیاد	۱۶۰-۲۱۰	۴
۳	بسیار زیاد	>۲۱۰	۵

سرعت دوران مته



شکل ۲-۱۲: امتیازدهی سرعت دوران مته برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر بر اساس جدول ۲-۴

۲-۵-۱-۳- سیال حفاری

خصوصیات سیال حفاری که بر نرخ نفوذ حفاری تاثیر می‌گذارند شامل: وزن مخصوص، خصوصیات رئولوژیک سیال (تغییر شکل‌پذیری و ویسکوزیته)، خصوصیات فیلتراسیون، مواد جامد همراه و اندازه این مواد است. نرخ نفوذ در اثر افزایش وزن سیال، ویسکوزیته و محتوای جامد آن، کاهش می‌یابد و با افزایش فیلتراسیون افزایش می‌یابد. وزن مخصوص، محتوای جامد و فیلتراسیون گل وظیفه کنترل اختلاف فشار بوجود آمده در ناحیه خرد شده زیر مته را دارند. ویسکوزیته سیال در کنترل کاهش اصطکاک رشته لوله حفاری و انرژی موجود در جت (نازل) مته نقش اساسی دارد. بر اساس مطالعات انجام شده، افزایش

ویسکوزیته حتی در شرایط پاکسازی کامل زیر مته نیز باعث کاهش نرخ نفوذ می‌شود (Lummus, 1970).

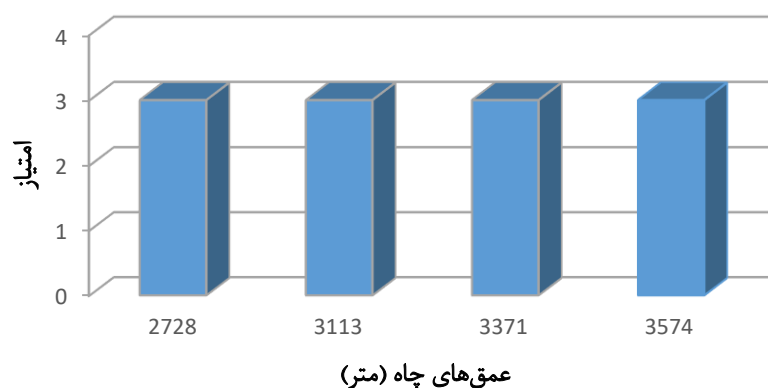
افزایش وزن سیال حفاری در صورت تغییر نکردن فشار منفذی باعث کاهش نرخ نفوذ مته‌ها می‌شود که می‌تواند به دلیل فشردگی سازند در زیر مته باشد. قابل ذکر است برخی به دلیل وابستگی خصوصیات گل حفاری مثل نوع، چگالی و غیره به جنس سازند، فشار سازند و سایر خصوصیات آن، این خصوصیات را در رده عوامل محیطی نیز قرار می‌دهند (Osguie, 2007 ; Eren and Ozbayoglu, 2010).

در این پژوهش وزن گل به عنوان یکی از خصوصیات سیال حفاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای طبقه‌بندی عامل وزن گل در امتداد چاه، جدول ۲-۵ ارایه شده است همچنین در شکل ۲-۱۳ مسیر چاه مورد نظر بر اساس این طبقه بندی در چهار عمق مختلف امتیازدهی شده است.

جدول ۲-۵: معیار طبقه‌بندی سیال حفاری بر اساس وزن گل (Schlumberger, 2001)

ردیف	وزن گل (lb/ft^3)	توضیحات	امتیاز
۱	$< 62/4$	بسیار کم	۴
۲	$62/4 - 92/4$	کم	۳
۳	$92/4 - 122/4$	متوسط	۲
۴	$122/4 - 152/4$	زیاد	۱
۵	$> 152/4$	بسیار زیاد	۰

وزن گل



شکل ۲-۱۳: امتیازدهی وزن گل برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر بر اساس جدول ۲-۵

۲-۵-۱-۴- سیستم هیدرولیک مته

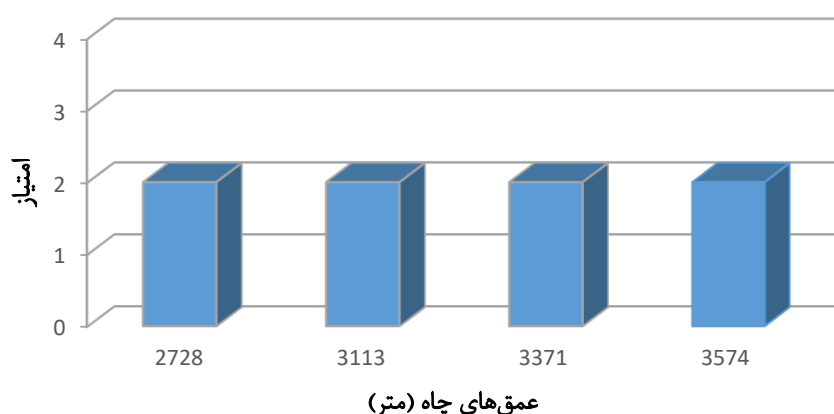
نرخ جریان سیال خروجی از نازل جت مته در بهبود شرایط نرخ نفوذ نقش مهمی را ایفا می‌کند. پاکسازی خرده‌های حفاری در ته چال از وظایف مهم این بخش است. در صورت افزایش بیش از اندازه وزن روی مته و عدم پاکسازی کامل خرده‌های حفاری، افزایش نرخ جریان سیال می‌تواند موجب بهبود شرایط و در نتیجه افزایش نرخ نفوذ شود. هیدرولیک مته تابعی از عواملی همانند توان سیستم هیدرولیک مته، فشار جت، عدد رینولدز و سایر پارامترها مثل چینه‌شناسی، نوع مته، فشار ته چال، شرایط دمایی و پارامترهای حفاری است که بر نرخ نفوذ مته تأثیر گذارند. قابل ذکر است در چاه‌های شیب‌دار و افقی، پارامتر انتقال خرده‌های حفاری از پارامترهای قابل کنترل اساسی به شمار می‌آید (Eren and Eckel, 1968; Ozbayoglu, 2010).

به منظور طبقه‌بندی نرخ جریان سیال در طول حفاری، جدول ۲-۶ ارائه شده است همچنین امتیازدهی نرخ جریان سیال در مسیر چاه مورد نظر، در چهار عمق مختلف در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۲-۶: معیار طبقه‌بندی نرخ جریان سیال (Schlumberger, 2001)

ردیف	میزان نرخ جریان سیال (gal/min)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲۰۰	بسیار کم	۰
۲	۲۰۰-۳۰۰	کم	۱
۳	۳۰۰-۶۰۰	متوسط	۲
۴	۶۰۰-۹۰۰	زیاد	۳
۵	>۹۰۰	بسیار زیاد	۴

نرخ جریان سیال



شکل ۲-۱۴: امتیازدهی نرخ جریان سیال برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر براساس جدول ۲-۶

۲-۵-۲- عوامل محیطی

تعدد عوامل موثر در عملیات حفاری نشان دهنده پیچیدگی تقابل مته و سنگ است که وابستگی پارامترها و غیر خطی بودن روابط بین آنها را به دنبال دارد. توده سنگ یا به عبارتی دیگر سازند مورد نظر حفاری به عنوان محیط حفاری نقشی بسیار اساسی در میزان سرعت حفاری، استهلاک مته و ماشین و هزینه‌های کلی حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا کمک بسیار زیادی در انتخاب ماشین می‌کند.

تا به حال به جهت هزینه بالای چاه نگاری، عدم دسترسی به مغزه و سایر عوامل، مطالعات محدودی در راستای تاثیر عوامل محیطی در صنعت حفاری نفت انجام شده است. با توجه به عمومیت عملیات چاه‌نگاری و تعیین چینه شناسی از روی آنها، مطالعاتی در رابطه با تاثیر نوع سازند بر عملیات حفاری صورت گرفته است (Nguyen, 1996 ; Bourgoyne et al., 1986). همچنین طبق مطالعات انجام شده، حجم محدودی خرد شده توسط مته ارتباط معکوسی با مقاومت فشاری و برشی سنگ دارد. نفوذپذیری سازند نیز نقش ویژه‌ای در مقدار نفوذ ایفا می‌کند. در سنگ‌های نفوذپذیر، سیال حفاری با نفوذ به درون سازند و ایجاد کیک، باعث همسان‌سازی اختلاف فشار ایجاد شده در هنگام ایجاد خرده‌های حفاری

می‌شود که این میزان ایجاد کیک تأثیر زیادی از سیال درون سازند می‌گیرد. برای مثال میزان اندود گل ایجاد شده به جهت همسان‌سازی فشار در سازند حاوی گاز بیشتر از نمونه مشابه در سازند حاوی نفت (مواد مایع) می‌باشد. همچنین مقاومت و سختی سنگ، حدود الاستیک و ترکیب کانی شناسی آن از عوامل شاخص مؤثر بر نرخ نفوذ حفاری می‌باشند (Hareland and Rashidi et al, 2010 ; Kahraman, 2003 ; Hughes, 2009; Hai Ma, 2011).

با توجه به مطالعات انجام‌شده و نیز منابع معتبر در مجموع می‌توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری را در سه خانواده اصلی زیر طبقه‌بندی نمود (Hoseinie et al., 2008):

- مشخصات فیزیکی و کانی شناسی ماده سنگ

- مشخصات مکانیکی

- مشخصات ساختاری توده سنگ

تاکنون متخصصان متعددی در علوم معدنی و عمرانی نقش و تأثیر این پارامترها را تشریح نموده و رابطه هر یک از آنها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند. استفاده از این مطالعات نیز با آگاهی از نوع مته، خصوصیات ژئومکانیکی و همچنین فشارهای محصور کننده در اطراف سازند مورد حفاری، می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود مدل سازی حفاری و برآورد دقیق تر نرخ نفوذ داشته باشد. در این پژوهش بیشتر به تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی (پارامترهای مکانیک سنگی) که در صنعت نفت دارای اهمیت می‌باشد، پرداخته خواهد شد.

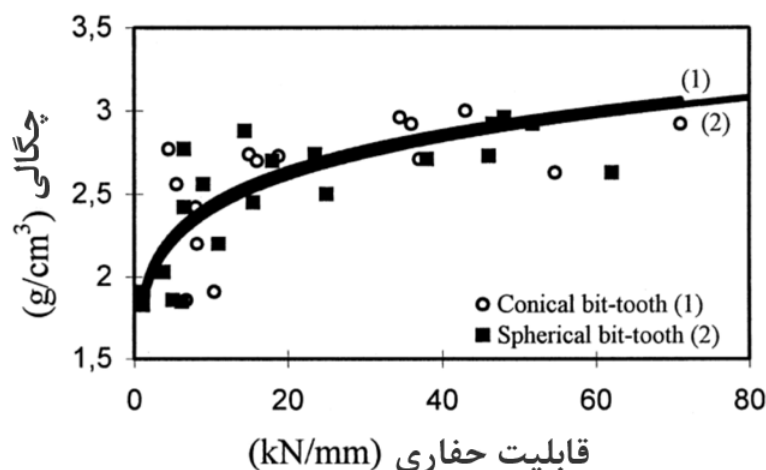
۲-۵-۱-۲- چگالی

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ (ρ_s) به جرم مخصوص آب (ρ_w) است. وزن مخصوص یک کانی به ترکیب و ساختمان شیمیایی آن بستگی دارد. معمولاً هرچه شمار اتم‌های سنگین یک کانی بیشتر باشد، شعاع اتمی آن کوچک‌تر می‌شود و تراکم آنها در شبکه تبلور بیشتر شده و در نتیجه چگالی آن کانی بیشتر می‌شود. چگالی یک سنگ را می‌توان بر اساس درصد کانی‌های تشکیل

دهنده و وزن مخصوص آنها به دست آورد. از عوامل مؤثر بر چگالی می توان تخلخل، نسبت پوکی و نحوه استقرار کانی ها را نام برد. هرچه نسبت پوکی و تخلخل سنگ زیادتر باشد، تراکم و چگالی سنگ کمتر خواهد بود. مقاومت دینامیک سنگ با افزایش چگالی آن رابطه مستقیم دارد، این درحالی است که برای سنگ های با چگالی کمتر $2/5$ گرم بر سانتی متر مکعب این ارتباط بسیار ضعیف می شود. به طور معمول چگالی سنگ ها بین $1/9$ تا $3/5$ متغیر است. اما در موارد استثنایی سنگ ها به دلیل داشتن کانی های سنگین چگالی بیشتری دارند. به طور معمول چگالی سنگ های آذرین بیشتر از سنگ های آذرین رسوبی است. این مقدار برای سنگ های رسوبی بین $1/9$ تا $2/7$ متغیر است (Onyia, 1988; اصائلو، ۱۳۸۶).

تاکنون متخصصان زیادی رابطه چگالی و نرخ نفوذ را مطالعه کرده اند. از آنجا که چگالی با مقاومت سنگ رابطه مستقیم داشته و با سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هرچه سنگ متراکم تر و چگال تر باشد، سرعت حفاری کمتر خواهد بود.

قهرمان^۱ و همکاران (۲۰۰۰) با مطالعه گسترده روی تعدادی از سنگ های کشور ترکیه نشان دادند که با افزایش میزان چگالی سنگ انرژی لازم برای حفاری توسط سیستم حفاری دورانی افزایش یافته و لذا سرعت حفاری کمتر می شود. شکل ۲-۱۵ منحنی حاصل از تحقیقات قهرمان را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۵: ارتباط چگالی سنگ و قابلیت حفاری (Kahraman et al., 2000)

1-Kahraman

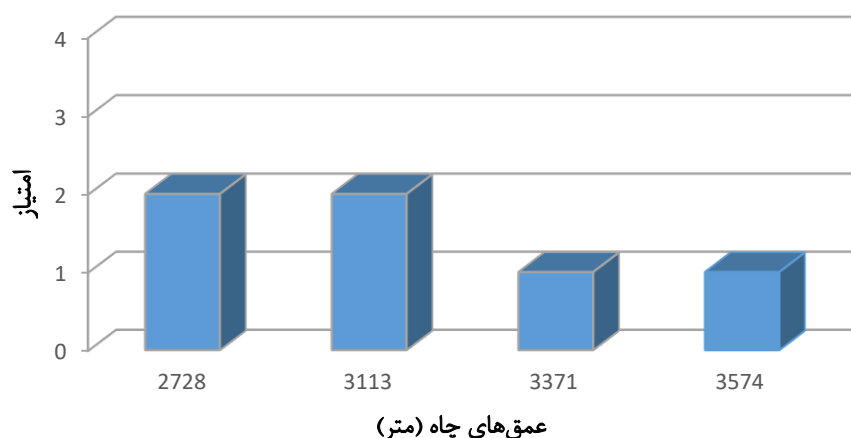
غیر از تحقیقات جامع ذکر شده که توسط قهرمان (۲۰۰۰) در کشور ترکیه صورت پذیرفته در سایر مقالات و منابع موجود، رابطه ریاضی خاصی بین چگالی سنگ و سرعت حفاری ارائه نشده است و کلیه محققان تنها به ذکر با اهمیت بودن این عامل در حفاری اکتفا کرده‌اند. لذا استفاده از این عامل به عنوان یک عامل منفرد برای پیش بینی سرعت حفاری و ارزیابی قابلیت حفاری سنگ با توجه به پیشینه ضعیف تحقیقاتی پیشنهاد نمی‌شود.

به منظور طبقه‌بندی عامل چگالی، جدول ۲-۷ ارایه شده است. بر اساس این جدول، امتیازدهی چگالی در مسیر چاه مورد نظر، در چهار عمق مختلف در شکل ۲-۱۶ آمده است.

جدول ۲-۷: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس چگالی (Onyia, 1988)

ردیف	میزان چگالی (gr/cm^3)	توضیحات	امتیاز
۱	$< 1/8$	بسیار کم	۴
۲	$1/8 - 2/2$	کم	۳
۳	$2/2 - 2/6$	متوسط	۲
۴	$2/6 - 3$	زیاد	۱
۵	> 3	بسیار زیاد	۰

چگالی سنگ



شکل ۲-۱۶: امتیازدهی چگالی برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر بر اساس جدول ۲-۷

۲-۲-۵-۲- تخلخل

سنگ‌ها اجسام کاملاً تو پری نیستند و همیشه حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط و یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی و مهندسی سنگ دارند و به طور کلی هرچه سنگ متخلخل‌تر باشد مقاومت مکانیکی آن کمتر است. به همین دلیل نوع تخلخل و درصد آن از نخستین خواصی است که در مباحث مکانیک سنگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تخلخل سنگ را می‌توان از نظر نوع به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد:

الف) تخلخل با حفره‌های مرتبط

ب) تخلخل با حفره‌های مجزا

چنانچه فضاهای خالی یک سنگ به همدیگر راه داشته باشد، این نوع تخلخل را تخلخل مرتبط می‌نامند. وجود این نوع تخلخل باعث می‌شود که ساختار فیزیکی و ماکروسکوپی سنگ حالت پفکی به خود گرفته و از استحکام کافی برخوردار نباشد. در این صورت مقاومت سنگ به شدت کاهش یافته و در نتیجه قابلیت حفاری در سنگ افزایش می‌یابد. حتی درصد کمی از تخلخل‌هایی که به صورت درزه و ترک‌های موئینی هستند به اندازه درصد زیادی از تخلخل‌هایی که به شکل حفره‌های غیر درزه‌ای‌اند تأثیر دارند، زیرا تخلخل درزه‌ای تأثیر عمده‌ای بر خواص مکانیکی سنگ دارد. تخلخل سنگ‌ها در طبیعت از صفر تا ۵۵ درصد متغیر است (وفاییان، ۱۳۸۷). از آنجایی که تخلخل با چگالی و مقاومت فشاری سنگ رابطه معکوس دارد، لذا با اندازه‌گیری این دو پارامتر می‌توان از میزان تخلخل سنگ نیز به صورت غیر مستقیم اطلاع حاصل کرد.

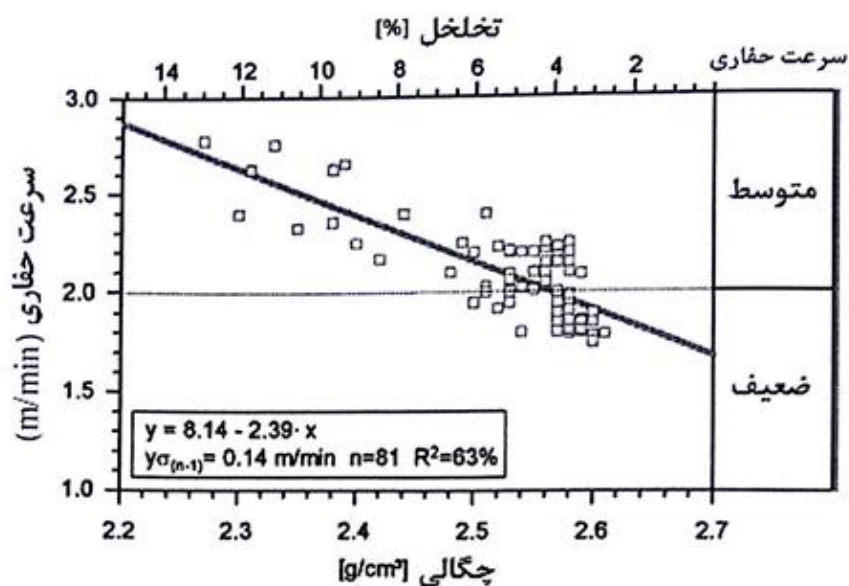
از عوامل مهم دیگری که در میزان تخلخل سنگ‌ها تأثیر اساسی دارد، زمان تشکیل آنها است به طوری که سنگ‌های قدیمی‌تر تخلخل کمتری دارند، به عنوان مثال یک نمونه ماسه سنگ کامبرین دارای تخلخل ۱۱ درصد و ماسه سنگ کرتاسه تخلخل ۳۴ درصد دارد. همچنین عمق قرار گرفتن

سنگ‌ها در مقدار تخلخل آنها موثر است، به‌طور مثال نمونه شیل مربوط به پنسیلوانین^۱ در اکلاهما^۲ در اعماق ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر به ترتیب دارای ۱۶، ۷ و ۴ درصد تخلخل است. در میان سنگ‌های رسوبی، گچ با تخلخل ۴۰ درصد از سایر سنگ‌ها تخلخل بیشتری دارد و در سنگ‌های آذرین پومیس بیشترین تخلخل را دارد. در سنگ‌های آذرین تخلخل معمولاً بین یک تا دو درصد است مگر اینکه هوا زدگی یافته باشند که در این صورت بر حسب شدت هوا زدگی ممکن است تخلخل آنها به ۲۰ درصد هم برسد (وفاییان، ۱۳۸۷).

همچنین تخلخل یک سنگ بستگی به شکل و اندازه دانه‌ها، تنوع دانه‌ها، سیمان شدن آنها و نوع تجمع کانی‌ها دارد. اگر سنگ از دانه‌های کروی با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده باشد حداقل تخلخل را خواهد داشت، در صورتی که اگر دانه‌ها زاویه‌دار و بی‌شکل باشند، تخلخل زیادتر است.

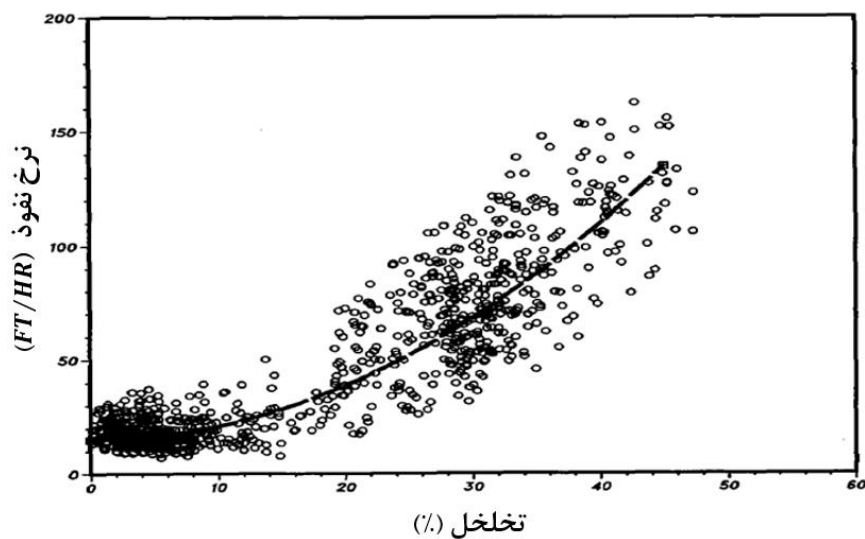
اغلب تغییرات در نرخ نفوذ ناشی از تغییرات در میزان تخلخل است. سنگ‌ها با تخلخل بالا همانند ماسه سنگ و شیل، مقاومت کمتری در برابر حفاری نسبت به سنگ‌های کربناته با تخلخل کم دارند. تاکنون مطالعاتی بر روی تأثیر تخلخل بر روی قابلیت حفاری سنگ‌ها انجام شده است و محققان مختلفی به این ویژگی سنگ اشاره کرده‌اند. تورو^۳ و همکارانش (۲۰۰۲) در تحقیقی رابطه تخلخل و چگالی را به صورت توام بر روی سرعت حفاری مورد بررسی قرار داده و نتیجه تحقیق خود را به صورت شکل ۲-۱۷ ارائه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل و کاهش چگالی، سرعت حفاری به صورت خطی افزایش می‌یابد.

1-Pennsylvanian
2-Oklahoma
3-Thuro



شکل ۲-۱۷: رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ (Thuro, 2002)

اونیا^۱ (۱۹۸۸) نیز با بررسی داده‌های چاه پیمایی و برآورد میزان تخلخل، چنین نتیجه گرفت که میزان تخلخل سنگ با سرعت حفاری رابطه غیر خطی مستقیم دارد. وی از چهار نوع از سنگ‌های شیل، سنگ آهک، ماسه سنگ و دولومیت در آزمایش خود استفاده کرد که نتایج این بررسی در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸: رابطه نرخ نفوذ با تخلخل به‌دست آمده از داده‌های چاه پیمایی (Onyia, 1988)

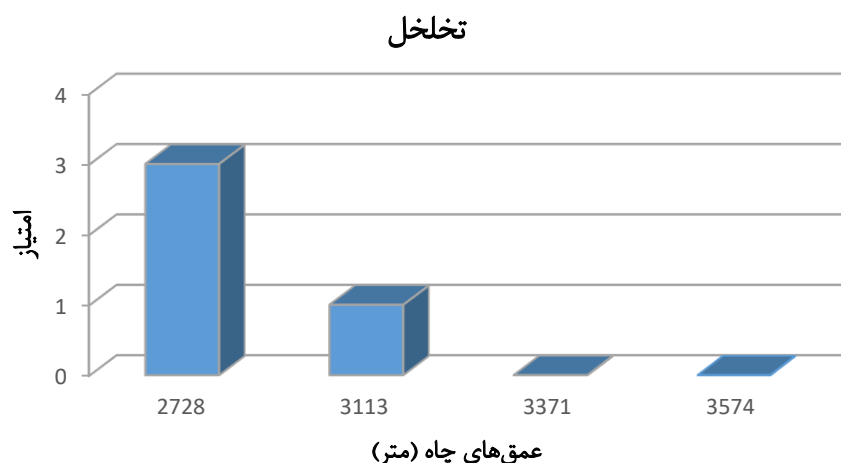
1-Onyia

همانطور که قابل مشاهده است در تخلخل زیر ۸ درصد تغییرات تخلخل روی نرخ نفوذ تاثیری نمی‌گذارد. اما از تخلخل ۱۵ درصد به بعد نرخ نفوذ با تخلخل نسبت مستقیم پیدا خواهد کرد. این تغییرات ناشی از تاثیر زیاد تخلخل بر روی مقاومت فشاری سنگ در مقادیر بالای تخلخل می‌باشد (Onyia, 1988).

برای طبقه‌بندی تخلخل، جدول ۲-۸ ارائه شده است. همچنین در شکل ۲-۱۹ مسیر چاه مورد نظر بر اساس این طبقه بندی در چهار عمق مختلف امتیازدهی شده است.

جدول ۲-۸: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس تخلخل (Onyia, 1988)

ردیف	میزان تخلخل (%)	توضیحات	امتیاز
۱	<۷	بسیار کم	۰
۲	۷-۱۴	کم	۱
۳	۱۴-۲۰	متوسط	۲
۴	۲۰-۲۶	زیاد	۳
۵	>۲۶	بسیار زیاد	۴



شکل ۲-۱۹: امتیازدهی تخلخل برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر بر اساس جدول ۲-۸

۲-۵-۳- مقاومت فشاری تک محوره

مقاومت میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی است. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا در حالت متحرک (دینامیک) باشند (اصانلو، ۱۳۸۶). مقاومت فشاری را می‌توان

به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای مکانیک سنگ به‌طور گسترده وارد شده و جز جدا نشدنی قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ است.

شاید اهمیت مقاومت فشاری به خاطر تعداد زیاد پارامترهایی باشند که در آن مؤثرند. بدین معنی که از آنجایی که عوامل مختلفی در مقاومت یک سنگ تأثیر دارند، لذا مقاومت فشاری سنگ‌ها می‌تواند نماینده کلیه این عوامل در سنگ باشد. عوامل مؤثر در مقاومت فشاری سنگ‌ها عبارتند از (اصانلو، ۱۳۸۶):

- نوع کانی‌های تشکیل دهنده و شرایط استقرار آنها
- درجه هوازدگی یا دگرسانی سنگ‌ها
- نیروی بین مولکولی ذرات تشکیل دهنده آنها
- وجود عواملی مانند درزه و شکاف در سنگ‌ها
- خواص الاستیکی، پلاستیکی و آنیزوتروپی سنگ‌ها
- جهت و میزان نیروهای وارده بر سنگ‌ها

لذا چنانچه ذکر شد مقاومت فشاری می‌تواند یک کمیت مناسب برای ارزیابی کلیه عوامل فوق در سنگ‌ها باشد. مقاومت سنگ اساساً بستگی به ترکیب کانی‌شناسی آن دارد. از بین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، کوارتز بیشترین مقاومت را دارا است که تا بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال می‌رسد. مقاومت سنگ در مورد سیلیکات‌های آهن و منیزیم و سیلیکات‌های آلومینیوم از ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال متغیر است و در مورد کلسیت ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال است. بنابراین هر چقدر مقدار کوارتز بیشتر باشد، مقاومت نیز افزایش می‌یابد (Jimeno et al. 1995).

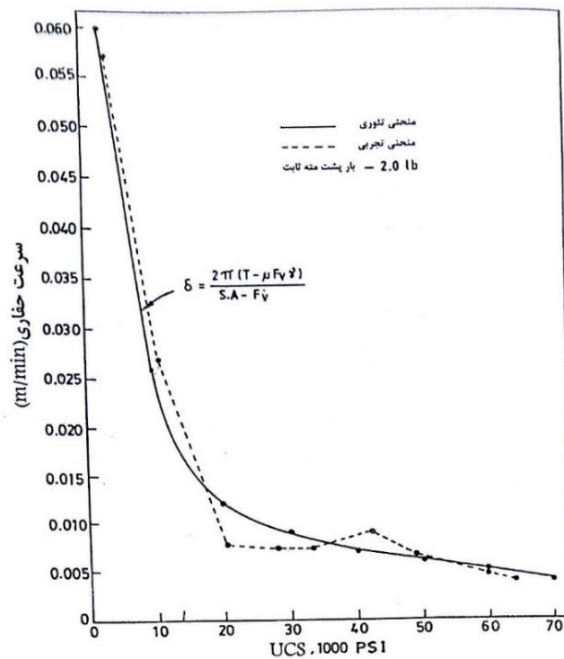
مقاومت یک کانی به اندازه بلورهای آن بستگی دارد و با افزایش اندازه بلورها مقاومت آن کم

می‌شود. زمانی که نیروی چسبندگی بین دانه‌ها مطرح باشد، تاثیر اندازه بلورها روی مقاومت کمتر می‌شود. در بین سنگ‌های رسوبی بالاترین مقاومت مربوط به سنگ‌هایی است که دارای سیمان سیلیسی هستند. با حضور سیمان رسی، مقاومت به شدت کاهش می‌یابد. برای سنگ‌های با سنگ‌شناسی مشابه، مقاومت با میزان تخلخل سنگ تناسب داشته و با بالا رفتن تخلخل مقاومت کمتر می‌شود. وجود تخلخل تعداد نقاط تماس ذرات کانی و نیروی عکس‌العمل میان آنها را کاهش می‌دهد. عمق تشکیل و درجه دگرگونی نیز بر مقاومت سنگ مؤثر است. برای مثال مقاومت لایه رسی نزدیک سطح زمین حدود ۲ تا ۱۰ مگاپاسکال است. در حالی که در سنگ‌های رسی که تحت دگرگونی معینی قرار داده شده باشند، مقاومت به ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال می‌تواند برسد.

از سوی دیگر مقاومت سنگ‌های غیر ایزوتروپ بستگی به جهت نیروی وارد شده دارد. مثلاً مقاومت فشاری سنگ‌ها در جهت عمود بر جهت چین‌شده‌شناسی یا شیبستزیده بیشتر از جهت موازی با آن است (Jimeno et al. 1995).

با توجه به مطالب گفته شده، مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین عواملی است که سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این عامل علاوه بر انجام آزمایش توسط مغزه، از طریق نگارهای صوتی، تخلخل، چگالی، مقاومت و ... نیز تعیین می‌شود. به طور کلی با افزایش مقاومت فشاری سنگ نرخ نفوذ حفاری کاهش می‌یابد (Nguyen, 1996; Onyia, 1988).

رائو و میسرا^۱ (۱۹۹۸) در کتاب اصول حفاری سنگ ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۲۰ نشان داده‌اند.



شکل ۲-۲۰: ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری (Rao & misra, 1998)

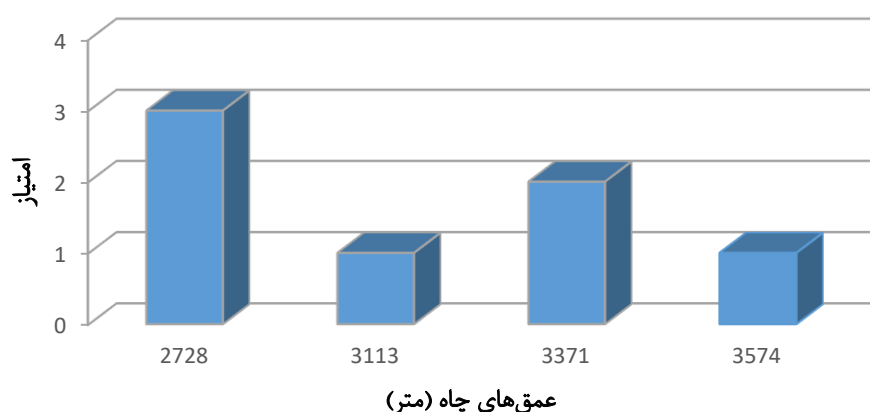
اصانلو و آهنگری^۱ (۱۹۹۴) مقاومت فشاری را به عنوان مهم‌ترین و تنها پارامتر سنگ برای ارایه مدل ریاضی برای پیش بینی سرعت حفاری در میدان نفتی سلمان به کار برده‌اند. همچنین محققان مختلف در صنعت نفت مقاومت سنگ را از مهم‌ترین خصوصیات موثر در عملیات حفاری بر شمردند (Hareland and Hoberock, 1993; Andrews, 2007; spaar, 1995).

طبقه‌بندی عامل مقاومت فشاری تک محوره در طول مسیر حفاری از معیار طبقه بندی RMR بنیاسکی (۱۹۷۶) اقتباس شده است در جدول ۲-۹ ارایه شده است. همچنین در شکل ۲-۲۱ مسیر چاه مورد نظر بر اساس این طبقه بندی در چهار عمق مختلف امتیازدهی شده است.

جدول ۲-۹: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت فشاری تک محوره (Bieniawski, 1976)

ردیف	میزان مقاومت فشاری (Mpa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲۵	مقاومت فشاری بسیار ضعیف	۴
۲	۲۵-۵۰	مقاومت فشاری ضعیف	۳
۳	۵۰-۸۵	مقاومت فشاری متوسط	۲
۴	۸۵-۲۲۵	مقاومت فشاری زیاد	۱
۵	>۲۲۵	مقاومت فشاری بسیار زیاد	۰

مقاومت فشاری تک محوره



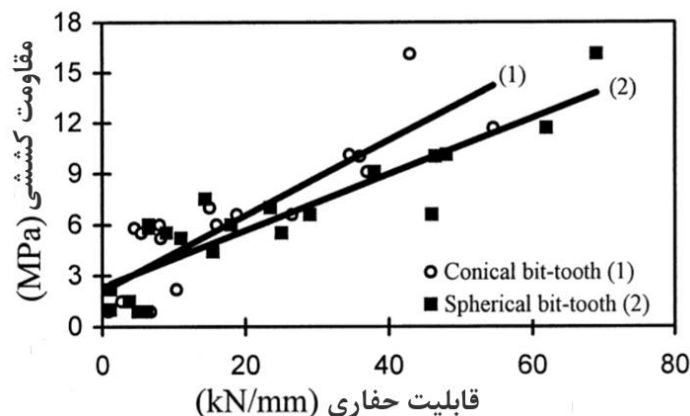
شکل ۲-۲۱: امتیازدهی مقاومت فشاری تک‌محوره برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر بر اساس جدول ۲-۹

۲-۵-۴- مقاومت کششی

مقاومت کششی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مقاومتی سنگ مطرح است. مقاومت کششی سنگ در عملیات حفاری و انتخاب نوع سیستم حفاری مفید است. بر خلاف مقاومت فشاری که بررسی و مطالعات در مورد آن به حد وسیع و گسترده‌ای انجام گرفته است در مورد مقاومت کششی شاید به دلیل دشواری در تهیه نمونه و انجام آزمایش، مطالعه کافی انجام نشده است (اصانلو ۱۳۸۶).

در مهندسی حفاری، مقاومت کششی نشان‌گر مقاومت مرزی دانه‌ها و خمیره (ماتریکس) است. لذا با افزایش مقاومت و اتصال بین دانه و خمیره مقاومت کششی سنگ افزایش می‌یابد. اتصال و به هم چسبیدگی شدید خمیره و دانه باعث افزایش ساینده‌گی سنگ و در نهایت باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود (Ersoy & Waller, 1995a).

تاکنون محققان مختلفی به اهمیت مقاومت کششی سنگ در قابلیت حفاری اشاره و تاکید کرده‌اند. با این حال تحقیقات برجسته و معتبر در این زمینه توسط قهرمان از کشور ترکیه و تورو در کشور آلمان انجام شده است. قهرمان (۲۰۰۰) طی تحقیق جامعی رابطه سرعت حفاری دورانی و مقاومت کششی را به صورت شکل ۲-۲۲ ارائه کرده است (Kahraman et al., 2000).



شکل ۲-۲: ارتباط مقاومت کششی سنگ و قابلیت حفاری (Kahraman et al., 2000)

نتایج تحقیقات قهرمان و همکارانش (۲۰۰۰) نشان می‌دهد که مقاومت کششی با قابلیت حفاری سنگ‌ها و حفاری دورانی رابطه خطی معکوس دارد.

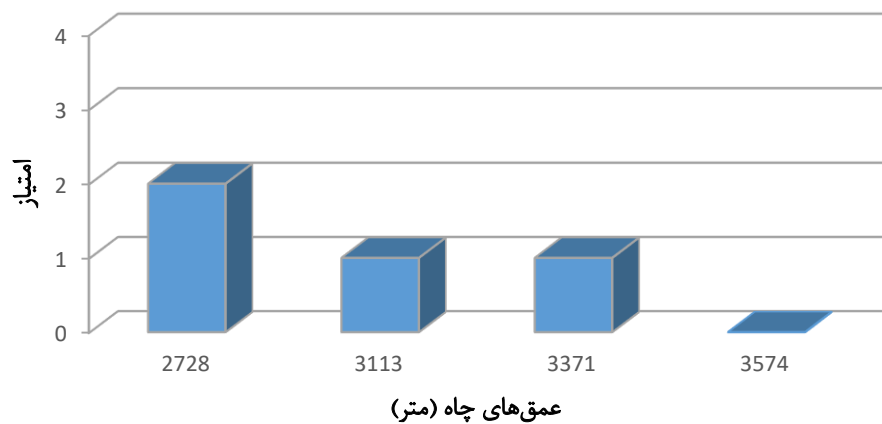
شایان ذکر است با وجود استفاده گسترده از پارامترهای مقاومتی ذکر شده در پیش‌بینی نرخ نفوذ، لزوماً نمی‌توان به تنهایی از این پارامترها در این فرآیند استفاده کرد. برای مثال ماسه سنگ Berea دارای مقاومت فشاری تک محوره پایینی است اما به دلیل زاویه اصطکاک داخلی نسبتاً بالا دارای مقاومت همه جانبه بالایی می‌باشد (Hughes, 2009).

به منظور طبقه‌بندی مقاومت کششی جدول ۲-۱۰ ارائه شده است (Singh et al, 1989). همچنین در شکل ۲-۲۳ مسیر چاه مورد نظر، بر اساس این طبقه‌بندی در چهار عمق مختلف امتیازدهی شده است.

جدول ۲-۱۰: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقاومت کششی (Singh et al, 1989)

ردیف	میزان مقاومت کششی (Mpa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۲	مقاومت کششی بسیار ضعیف	۴
۲	۲-۵	مقاومت کششی ضعیف	۳
۳	۵-۱۰	مقاومت کششی متوسط	۲
۴	۱۰-۱۵	مقاومت کششی زیاد	۱
۵	>۱۵	مقاومت کششی بسیار زیاد	۰

مقاومت کششی



شکل ۲-۲۳: امتیازدهی مقاومت کششی برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر بر اساس جدول ۲-۱۰

۵-۲-۵-۲-۵- سفتی سنگ

سفتی عبارت است از مقاومتی که یک کانی یا سنگ در مقابل تنش‌های خارجی از خود نشان می‌دهد تا خرد نشود، هرچه درجه سفتی سنگ‌ها زیادتر باشد، عمر مته‌ها کمتر و سرعت نفوذپذیری نیز کمتر می‌شود. عوامل مؤثر در افزایش و کاهش درجه سفتی سنگ عبارتند از (اصانلو، ۱۳۸۶):

۱- دانه‌های (کانی‌های) تشکیل دهنده سنگ

۲- نیروی به هم چسبی

۳- شکل دانه‌ها

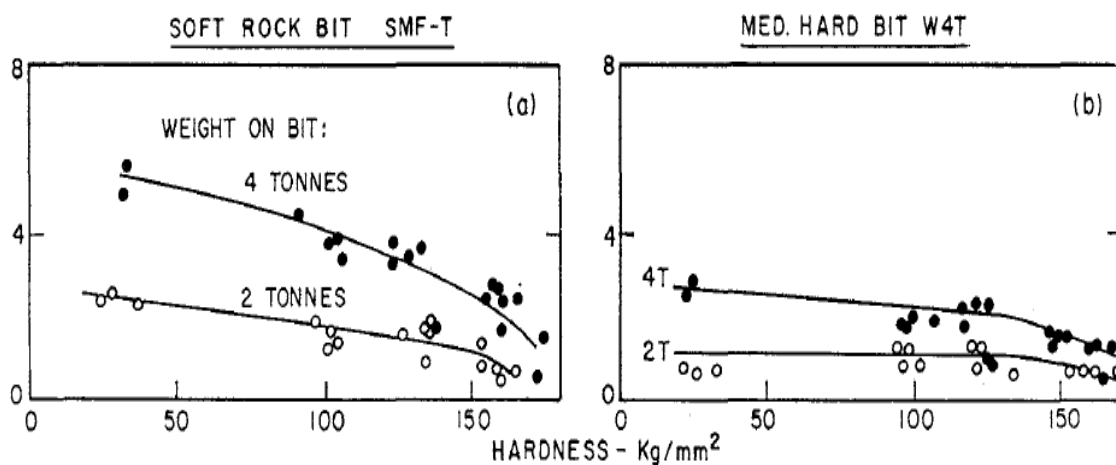
۴- اندازه دانه‌ها

۵- درجه همگنی سنگ‌ها

سفتی سنگ‌هایی که خاصیت پلاستیسیته داشته باشند با روش‌هایی اندازه‌گیری می‌شوند که برای فلزات مورد استفاده است. این آزمون‌ها هر کدام معیار ویژه‌ای در سنجش سفتی دارند، مثلاً در آزمون

برینل^۱، بر مبنای نفوذ گلوله سخت فولادی در نمونه مورد آزمایش، سفتی بر اساس نسبت نیروی وارد آمده به قطر خراش ایجاد شده سنجیده می‌شود. در آزمون راک ول^۲ که نفوذ خراش دهنده تحت اثر دو بار متوالی است، سفتی را بر مبنای عمق نفوذ نفوذگر در نمونه تعیین می‌کنند. از آزمون ویکرز^۳ (نفوذ هرم الماسی در نمونه) نیز می‌توان برای تعیین سفتی سنگ‌ها سود برد (Gordon, 2001).

استالدِر و راینال^۴ (۱۹۹۶) با انجام آزمایش‌هایی که در آن فشار ته چاه شبیه‌سازی شده بود به بررسی ارتباط میان سفتی سنگ و نرخ نفوذ مته توسط عملیات نفوذ^۵ پرداختند. همان‌طور که در شکل ۲-۲۴ مشاهده می‌شود این آزمایش توسط دو نوع مته سازند نرم-متوسط و سازند متوسط-سخت با دو بار متفاوت ۲ و ۴ تن روی مته انجام شده است. مشاهده می‌شود نرخ نفوذ با توجه به افزایش سفتی در سنگ‌های نرم و متوسط کاهش می‌یابد اما سیر نزولی در سنگ‌های سخت و بار مته کم، محسوس نیست. در واقع در وزن‌های کم روی مته در سنگ‌های سخت، نرخ نفوذ مستقل از تاثیر پارامترهای سنگ است.



شکل ۲-۲۴: ارتباط میان سفتی سنگ با نرخ نفوذ حفاری (Gstalder and Raynal, 1996)

باتوجه به انجام آزمایش‌های سفتی استاندارد موجود در صنعت نفت، تا به حال به مکانیزم شکست

1-Brienell
2-Rockwell
3-Vickers
4-Gstalder and Raynal
5-Punching

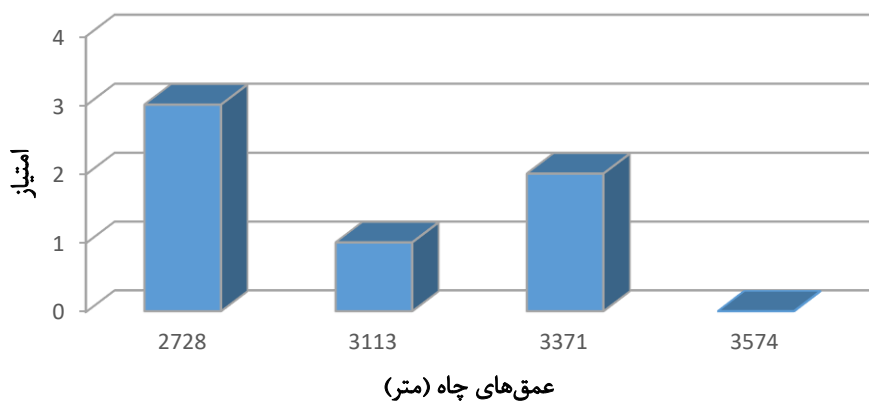
سنگ از نقطه نظر سفتی توجه کمتری شده است. لاون و ویلشا (۱۹۷۵) تحقیقاتی در رابطه با ایجاد ترک توسط نفوذ سنگ به وسیله ابزار سخت و کروی انجام دادند (Nauroy, 2001).

به منظور طبقه‌بندی عامل سفتی سنگ جدول ۲-۱۱ ارائه شده است و همچنین امتیازدهی سفتی سنگ در مسیر چاه مورد نظر بر اساس این طبقه‌بندی، در چهار عمق مختلف در شکل ۲-۲۵ آمده است.

جدول ۲-۱۱: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس سفتی (Gstalter and Raynal, 1996)

ردیف	میزان سفتی (Kg/mm^2)	توضیحات	امتیاز
۱	< 100	بسیار کم	۴
۲	۱۰۰-۱۵۰	کم	۳
۳	۱۵۰-۲۰۰	متوسط	۲
۴	۲۰۰-۲۵۰	زیاد	۱
۵	> 250	بسیار زیاد	۰

سفتی سنگ



شکل ۲-۲۵: امتیازدهی سفتی سنگ برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر بر اساس جدول ۲-۱۱

۲-۵-۲-۶- ساینده‌گری

در حفاری، ساینده‌گری به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است سر مته از جنس فولاد، کرپور تنگستن یا الماس را از بین ببرد. ساینده‌گری در سنگ‌ها عموماً به سه عامل محتوی کوارتز، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی بستگی دارد اما، شکل دانه‌ها و کلیواژ نیز در کیفیت این خاصیت بی‌تأثیر نیستند

(Ersoy and Waller, 1995). به همین دلیل دوره‌های زمانی‌ای که تنها مته‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند عمر این مته‌ها در سنگ‌های حاوی کوارتز مثل ماسه سنگ در حد چند سانتی‌متر بود. هرچند کوارتز سختی بیشتری نسبت به فولاد دارد اما شکل ذرات نیز بی‌تأثیر در کاهش عمر مته نبوده است. این مشکل با جانشین کردن مته‌هایی از جنس تنگستن کاربید به جای مته‌های فولادی برطرف شده است (اصانلو، ۱۳۸۶). از سوی دیگر خرده‌های ریز و گرد سنگ نیز باعث صیقل دادن سر مته و کندی حفاری می‌شوند. سنگ‌هایی که خاصیت ساینده‌گی آن‌ها در حفاری باید مورد توجه قرار گیرد عبارتند از:

- ۱- سنگ‌های حاوی کوارتز مثل کوارتزیت، ماسه سنگ و سنگ‌های آذرین اسیدی
 - ۲- سنگ‌های حاوی سیلیس مثل چرت و سنگ‌های اولیوین‌دار مثل دونیت و بعضی از انواع بازالت
 - ۳- سنگ‌های حاوی گارنت مثل گنیس گارنت‌دار
- در این میان میزان سیلیس یا در حالت کلی کوارتز بسیار مورد تأکید بوده است. تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی که سیلیس کمتری دارند مثل دولومیت یا آهک خاصیت ساینده‌گی کمتری دارند و بالعکس سنگ‌هایی که سیلیس بیشتری دارند مثل ماسه سنگ سیلیسی خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند (Jimeno et al, 1995).
- تاکنون برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ در صنعت نفت مطالعات به خصوصی صورت نگرفته است. با وجود این فقدان، شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی در صنعت معدن و عمران ارائه شده است که از شاخص‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص سایش سنگ^۱ (RAI) و اندیس سایش سرشار^۲ (CAI) اشاره کرد. شاخص سایش سنگ توسط پلانیگر^۳ و همکارانش (۲۰۰۲) ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شرح زیر است:

1-Rock Abrasiveness Index
2-Cerchar abrasivity Index
3-Plinninger

$$RAI = EqQtz \times UCS \quad (1-2)$$

که در آن، EqQtz نشانگر درصد کوارتز محتوی سنگ است. پلانینگر و همکارانش (۲۰۰۲) با استفاده از این شاخص جدید، رابطه معکوس ساینده‌گی و عمر سر مته را در حفاری‌ها در اعماق مختلف مشاهده کردند.

مته نیز در تقابل سنگ به مرور زمان دچار سایش می‌شود. اکثر مته‌ها به دلیل سایش به وجود آمده، در زمان مورد نظر حفاری را به پایان نمی‌رسانند. بدین منظور بررسی سایش مته‌ها در طول حفاری نیز دارای اهمیت بسیار زیادی است (Bourgoyne et al., 1986). یکی از این شاخص‌های ساینده‌گی، شاخص سایش سرشار (CAI) است. این شاخص توسط آزمایش سرشار توسط انستیتو سرشار^۱ (۱۹۷۰) ارایه شده است. یک پین فولادی استوانه‌ای، که راس آن مخروطی دوار با زاویه راس $(90 \pm 3)^\circ$ و نوک نقطه‌ای است، برای انجام آزمایش سرشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. پین مذکور، تحت بار استاتیکی ۷۰N، بر روی سطح سنگ قرار می‌گیرد و به فاصله ۱۰ میلی‌متر، بر روی آن کشیده می‌شود. در هر آزمایش، پنج پین بر روی نمونه کشیده می‌شود. این کار در دو جهت مختلف انجام می‌شود و در نهایت، میانگین ۱۰ اندازه‌گیری صورت گرفته، به عنوان نتیجه آزمایش گزارش می‌شود. پهن شدگی ناشی از سایش نوک پین، با استفاده از یک میکروسکوپ ۲۴X که به میکرومتری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر مجهز است، اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری قطر پهن شده نوک پین، در دو امتداد عمود بر هم انجام شده و مقدار میانگین آن تعیین می‌شود. با انجام آزمایش و تعیین میانگین پهن شدگی نوک پین‌ها، مقدار اندیس سایش سرشار (CAI) توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CAI = 10d \quad (2-2)$$

d قطر پهن شدگی سایشی نوک پین بر حسب میلی‌متر می‌باشد. بر اساس مقادیر به دست آمده برای CAI، ساینده‌گی سنگ‌ها را می‌توان با توجه به جدول ۲-۱۲ طبقه‌بندی کرد (Cerchar, 1973).

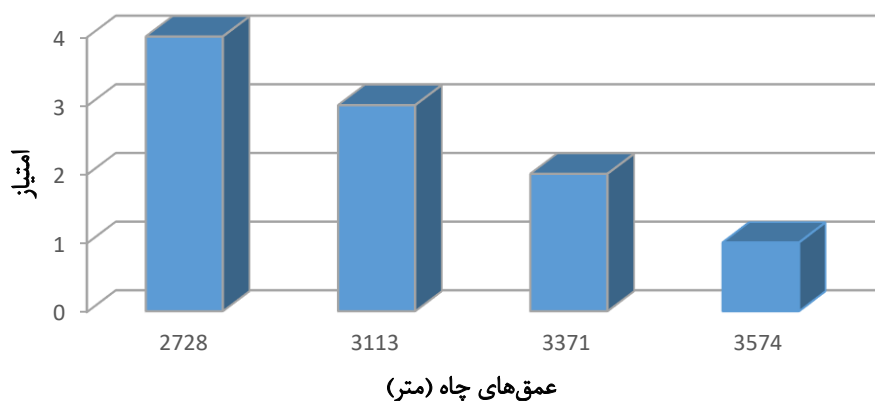
1-Cerchar

امتیازدهی سایندهی سنگ در مسیر چاه مورد نظر بر اساس معیار مذکور، برای چهار عمق مختلف طبقه بندی گردیده و در شکل ۲-۲۶ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱۲: معیار طبقه بندی سنگ بر اساس سایندهی (Cerchar, 1973)

ردیف	ضریب سایندهی (CAI)	توصیف سایندهی	امتیاز
۱	< 0.3	سایندهی بسیار کم	۴
۲	$0.3 - 1$	سایندهی کم	۳
۳	$1 - 3$	سایندهی متوسط	۲
۴	$3 - 6$	سایندهی زیاد	۱
۵	> 6	کوارتز	۰

سایندهی سنگ



شکل ۲-۲۶: امتیازدهی سایندهی سنگ برای عمق‌های مختلف چاه مورد نظر بر اساس جدول ۲-۱۲

۲-۵-۲-۷-مدول یانگ

در فرآیند حفاری علاوه بر پارامترهای مقاومتی، پارامترهای الاستیک سنگ نیز دارای اهمیت بسزایی هستند (Thuro, 1997). قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ‌ها به خاصیت الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها بستگی دارد. براساس نحوه تغییر شکل سنگ به عنوان تابعی از تنش‌های تولید شده در اثر بارهای استاتیک، سنگ‌ها به سه دسته قابل تفکیک می‌باشند (Jimeno et al, 1995):

الف) الاستیک ترد یا آنهایی که از قانون هوک تبعیت می کنند.

ب) پلاستیک ترد که قبل از شکستن تغییر شکل پلاستیک دارند.

ج) فوق العاده پلاستیک یا بسیار متخلخل که در آنها تغییر شکل الاستیک مشخص وجود ندارد.

اکثر کانی‌های موجود در سنگ رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می کنند. خواص الاستیک توسط مدول الاستیسیته مشخص می شود. مدول الاستیسیته نسبت تنش قائم به تغییر شکل نسبی ایجاد شده در اثر آن است. مقدار آن در اکثر سنگ‌ها بسته به ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و نوع تغییر شکل و بزرگی نیروی اعمال شده مابین 0.03×10^4 تا 1.7×10^5 مگاپاسکال متغیر است (Jimeno et al. 1995).

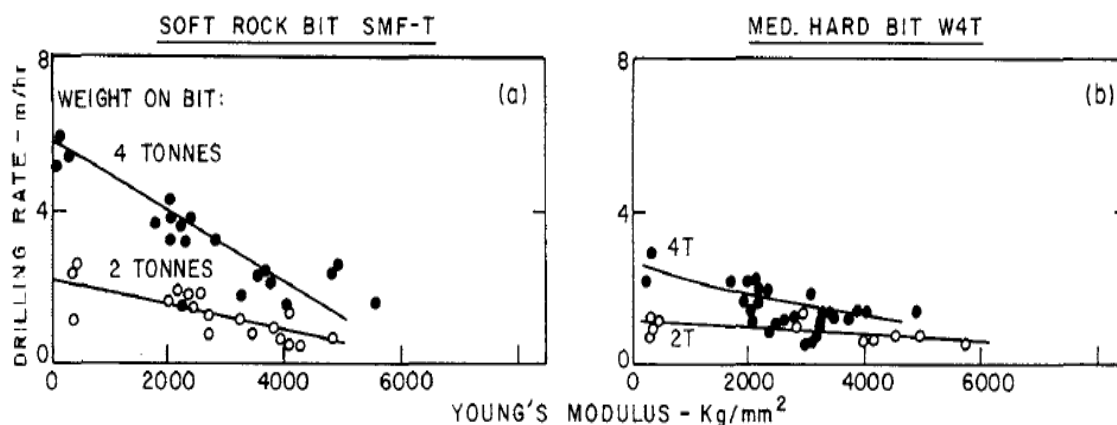
مقادیر مدول الاستیسیته در اکثر سنگ‌های رسوبی کمتر از مقدار آن برای کانی‌های تشکیل دهنده سنگ است. علاوه بر این بافت سنگ نیز بر این عامل تأثیر دارد به طوری که مقدار آن در جهت لایه بندی یا شیبستوزیته معمولاً بیشتر از حالت عمود بر لایه بندی است.

تاکنون در مطالعات گذشته، تأثیر خواص الاستیکی سنگ‌ها بر سرعت حفاری مورد تأکید قرار داده شده است. قهرمان و همکارانش (۲۰۰۰) با انجام تعداد زیادی آزمایش نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری دورانی و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می یابد.

استالدرا^۱ و همکاران (۱۹۹۶) با انجام آزمایشاتی که در آن فشار ته چاه شبیه سازی شده بود به بررسی ارتباط میان مدول الاستیک سنگ و نرخ نفوذ مته پرداختند. همان طور که در شکل ۲-۲۷ مشاهده می شود این آزمایش توسط دو نوع مته سازند نرم-متوسط و سازند متوسط-سخت با دو بار متفاوت ۲ و ۴ تن روی مته انجام گردید. مشاهده می شود نرخ نفوذ با توجه به افزایش مدول الاستیک در سنگ‌های نرم و متوسط، کاهش می یابد اما این سیر نزولی در سنگ‌های سخت و با بار روی مته کم، محسوس

1- Gstalder

نیست.



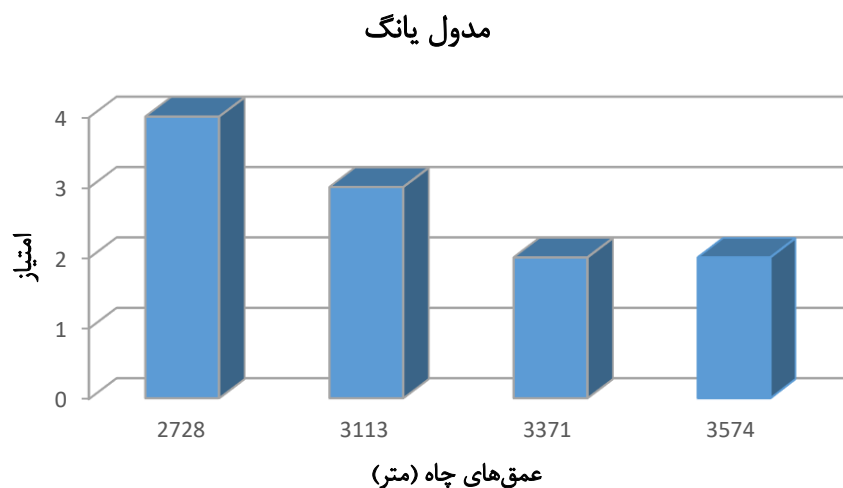
شکل ۲-۲۷: ارتباط بین نرخ نفوذ و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Gstalter and Raynal, 1996)

ذکر این نکته ضروری است که این پارامتر به تنهایی نمی‌تواند به عنوان شاخصی جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ به حساب بیاید. عزیزی و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی نمودارهای مدول‌های دینامیکی سنگ در برابر نرخ نفوذ در بازه‌های دارای شیل حتی با وجود مقادیر نسبتاً پایین مدول‌های الاستیک سنگ، نرخ نفوذ پایینی گزارش کردند که علت آن چسبندگی بالای شیل و در نتیجه چسبیدن خرده‌های حفاری به مته و کاهش نرخ نفوذ آن است.

برای طبقه‌بندی مدول الاستیسیته سنگ‌ها، جدول ۲-۱۳ ارائه شده است. در شکل ۲-۲۸ مسیر چاه مورد نظر بر اساس این طبقه‌بندی در چهار عمق مختلف امتیازدهی شده است.

جدول ۲-۱۳: معیار طبقه‌بندی سنگ بر اساس مدول یانگ (Gstalter and Raynal, 1996)

ردیف	مدول یانگ (Gpa)	توضیحات	امتیاز
۱	<۱۰	بسیار کم	۴
۲	۱۰-۲۰	کم	۳
۳	۲۰-۴۰	متوسط	۲
۴	۴۰-۷۰	زیاد	۱
۵	>۷۰	بسیار زیاد	۰



شکل ۲-۲: امتیازدهی مدول یانگ برای عمق‌های مختلف چاه موردنظر بر اساس جدول ۲-۱۳

۲-۵-۳- مروری بر الگوهای ارایه شده برای ارزیابی نرخ نفوذ

مطالعات گسترده‌ای در چارچوب پیش‌بینی نرخ نفوذ و عوامل مؤثر بر عملیات حفاری در صنایع نفت و گاز صورت گرفته است. مدل‌های حفاری مختلف نشان دهنده شرایط عملیاتی و محیطی مختلف در حفاری است که توسعه برخی از عوامل محیطی در این مدل‌ها دیده می‌شود. در زیر به تعدادی از تحقیقات شاخص اشاره خواهد شد. به جهت پیچیدگی فرآیند حفاری، در صنعت نفت از ارتباط تجربی میان عوامل قابل کنترل بیشتر از مدل‌های تحلیلی استفاده می‌شود.

اسپیر^۱ (۱۹۵۸) اولین کسی بود که یک روش جامع را برای تعیین تکنیک‌های بهینه حفاری ارائه داد. در این مطالعه روابط متقابل تجربی بین سرعت نفوذ، وزن روی مته، سرعت چرخشی، توان هیدرولیکی و قابلیت حفاری سازند نشان داده شد (speer, 1958).

لینگن و گارنیر^۲ (۱۹۵۹) توسط مته‌های نفوذگر و غلتکی به ارزیابی میزان بهینه گل حفاری، فشار منفذی و فشار همه جانبه در مقاومت و نفوذپذیری‌های مختلف در سنگ‌ها پرداختند. آنها دریافتند

1-speer

2-Lingen and Garnier

که کاهش نرخ نفوذ با توجه به افزایش مقاومت سنگ توسط ایجاد اختلاف مناسب بین فشار گل و فشار منفذی قابل کنترل است. آنها همچنین با آزمایش روی خرده‌های حفاری دریافتند که سنگ‌ها در اعماق نسبت به حالت آزاد به دلیل اختلاف فشار موجود که باعث جلوگیری از کندن سنگ می‌شود، قابلیت حفاری کمتری از خود نشان می‌دهند. معادله نرخ نفوذ ارائه شده به شکل زیر است (Lingen and Garnier, 1959).

$$ROP = a \frac{WOB}{UCS \times d} - bd \quad (3-2)$$

در این معادله a و b ثابت‌های بدون بعد مربوط به نوع مته و شکل آن می‌باشند و WOB و d به ترتیب وزن روی مته و قطر مته هستند.

مونچ و گراهام^۱ (۱۹۵۹) از اولین محققانی بودند که روی ارزیابی داده‌های حفاری و بهینه‌سازی پارامترهایی همانند وزن روی مته و سرعت چرخش مته کار کردند. آنها رابطه ریاضی جهت ارزیابی هزینه در حین حفاری ارائه دادند. رابطه تجربی ارائه شده به عمر مفید مته و توصیف نرخ نفوذ به عنوان تابعی از عمق، سرعت چرخش مته و وزن روی مته اشاره دارد. ثابت‌های رابطه به خصوصیات سازند مورد نظر مربوط می‌شود (Muench and Graham, 1959).

مائورر^۲ (۱۹۶۲) معادله نرخ نفوذ را برای مته‌های غلتکی با در نظر گرفتن مکانیزم شکست سنگ در زون خرد شده بدست آورد. بر اساس این معادله ارتباط بین نرخ نفوذ، وزن روی مته و سرعت رشته حفاری در شرایط پاکسازی کامل چاه صورت گرفته و عملیات در شرایطی که خرده‌های حفاری به بیرون منتقل شده‌اند صورت می‌گیرد. این ارتباط در معادله زیر که بر اساس میزان نفوذ تعبیه شده نشان داده شده است (Maurer, 1962).

$$ROP = C_F \frac{N WOB^2}{S^2 d^2} \quad (4-2)$$

1-Muench and Graham

2-Maurer

که در این معادله N سرعت دوران مته، S مقاومت در برابر حفاری و C_F قابلیت حفاری سنگ است.

گال و وودز^۱ (۱۹۶۳) از اولین محققانی بودند که اثر بهترین وزن مته و سرعت دورانی را برای کمترین هزینه با یک رابطه ریاضی بررسی کردند. آنها گرافها و دستورالعمل‌هایی را برای کاربردهای میدانی برای تعیین بهترین ثابت وزن و سرعت دورانی را تولید کردند. آنها همچنین معادله‌ای انتشار دادند که یک رابطه بین سرعت فرسایش مته و سرعت مته را تنها برای مته‌های دندانه‌ای و برای سازندهای نرم، ارایه می‌داد. با استفاده از گراف‌های آنها هزینه‌های حفاری، مترای حفاری، ساعات حفاری و وضعیت دندانه‌ها و تحمل خستگی مته را می‌توان محاسبه کرد. سرانجام آنها با تعریف یک مدل تحلیلی، نرخ نفوذ را به عنوان تابعی از وزن مته، چرخش مته، خصوصیات سازند و ساینده‌گی مته ارایه کردند. در نهایت نشان داده شد که هزینه‌های حفاری با استفاده از ترکیب‌های پیشنهادی از پارامترهای حفاری کاهش خواهد یافت (Galle and Woods, 1963).

$$ROP = C_F \frac{WOB^K}{a^b} N \quad (5-2)$$

در این معادله K تابعی از استحکام سازند و a و b به ترتیب توابعی از کندی و مکانیزم سایش مته می‌باشند.

بینگهام^۲ (۱۹۶۵) معادله سرعت نفوذ را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ارائه داد. در معادله او آستانه وزن مته ناچیز در نظر گرفته شده و سرعت نفوذ تابعی از وزن به کار رفته بر روی مته و سرعت چرخش مته بود (Bourgoyne et al, 1986).

$$ROP = K \left(\frac{WOB}{d} \right)^{a_5} N \quad (6-2)$$

در این معادله توان وزن مته (a_5) به طور تجربی تعیین می‌شود. N سرعت چرخش مته و K مقدار ثابت مناسب معادله و تابع مقاومت سنگ می‌باشد.

1-Galle and Woods

2-Bingham

یانگ^۱ (۱۹۶۸) یک سیستم کامپیوتر پیشرفته در محل سایت برای کنترل وزن مته و سرعت دورانی ارایه داد. او یک اصطلاح حداقل هزینه حفاری مته‌های غلتکی و PDC را با چهار معادله اصلی: نرخ نفوذ حفاری به عنوان تابعی از وزن مته و بلندی دندان مته، نرخ سایش مته به عنوان تابعی از سرعت چرخش مته، نرخ سایش دندان مته و در آخر هزینه حفاری معرفی کرد. وی با ترکیب معادله‌های معرفی شده برای بدست آوردن بهینه ثابت‌های وزن مته و سرعت چرخشی بهترین راه‌حل‌ها را گزارش کرد. معادله زیر نشان دهنده میزان نرخ نفوذ است (Young, 1968).

$$ROP = \frac{C_F (WOB - M) N \lambda}{1 + C T} \quad (7-2)$$

در این رابطه M مقدار بار آستانه روی مته، λ تابعی از سرعت دوران مته و C و T نیز تابعی از سایش مته و طول دندان‌ها می‌باشند.

بورگوین و یانگ (۱۹۷۳) با توسعه یک مدل ریاضی و تحلیل رگرسیون چند متغیره داده‌های حفاری، به توصیف تأثیرپذیری نرخ نفوذ از عمق، مقاومت سازند، فشردگی سازند، اختلاف فشار ته چاه، قطر مته، وزن روی مته و سرعت چرخش آن، سایش و هیدرولیک مته پرداختند. با توجه به تابع بدست آمده و ثابت نگه داشتن وزن روی مته، سرعت چرخش و همچنین استفاده بهینه از هیدرولیک، به کمترین هزینه حفاری می‌توان دست پیدا کرد. این مدل همچنین مدت زمان حفاری و سایش مته‌ها را پیش بینی می‌کند. آنها با جمع آوری داده‌ها از ۲۵ چاه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، ثابت‌های معادله را بدست آورده و جامع‌ترین مدل حفاری را که در صنعت بسیار مورد پسند واقع شد را ارائه دادند. این مدل با توجه به بهینه سازی پارامترهای حفاری باعث کاهش ۱۰ درصدی هزینه حفاری شد (Bourgoyne and Young, 1973).

واکر^۲ و همکاران (۱۹۸۶) تلاش‌هایی برای برقراری روابطی بین قابلیت حفاری، نرخ نفوذ حفاری

1-Young
2-Walker

و خواص مکانیکی سنگ با اطلاعات نگارهای الکتریکی و خواص الاستیک سنگ انجام دادند. آنها معادلاتی را که وزن روی مته، عمق، مقاومت فشاری برجا، تخلخل و متوسط اندازه دانه‌های سنگ را به نرخ نفوذ مته‌های کاجی مرتبط می‌ساخت، پیشنهاد دادند. اما مقاومت فشاری برجا، که در روابط آنها به کار می‌رفت، نیازمند استفاده از اطلاعاتی مانند وزن روی مته و زاویه اصطکاک داخلی بود که به ترتیب از اطلاعات حفاری و آزمایش‌های مکانیک سنگی، حاصل می‌شود. یکی از اهداف اصلی این مدل نشان دادن اثر خواص سنگ بر نرخ حفاری است (Walker et al., 1986).

$$ROP = 14 + 54WOB - 56p_w + 31v - 10g - 16UCS + 46p_w^2 - 31p_w WOB \quad (8-2)$$

در این معادله p_w فشار چاه، v تخلخل و g میانگین ابعاد خرده حفاری می‌باشند.

سیمونس^۱ (۱۹۸۶) به بررسی و بهینه‌سازی عوامل هیدرولیک، وزن روی مته و چرخش مته به منظور بهینه‌سازی عملیات حفاری پرداخت. سپس با توجه به تعریف قابلیت حفاری و انتخاب نوع مته معادله نرخ نفوذ تشکیل شده است (Simmons, 1986).

$$ROP = 60N \left(\frac{12WOB}{100d} \right)^{C_F} \quad (9-2)$$

وارن^۲ (۱۹۸۴) مدلی جهت برآورد نرخ نفوذ مته‌های غلتکی در شرایط حفاری فشار پایین را توسعه داد. با توجه به آنالیز داده‌های حفاری افزایش نرخ نفوذ حفاری با توجه به افزایش فشار چاه مشاهده گردید. در مواردی به دلیل حضور خرده‌های حفاری کاهش نرخ نفوذ مشاهده گردید که در این هنگام با افزایش هیدرولیک نرخ نفوذ افزایش خواهد یافت. این در حالی است که در مواردی نیز بنا به شرایط محیطی، افزایش هیدرولیک تأثیر خاصی بر نرخ نفوذ نمی‌گذارد. معادله نرخ نفوذ ارائه شده تنها با فرضیه تمیزسازی کامل ته چاه معتبر است (Warren, 1984).

مدل اصلاح شده وارن که بعدها توسط هارلند^۳ بهبود یافت بهترین و کامل‌ترین مدل در بین تمامی

1-Simmons

2-Warren

3-Hareland

مدل‌های ارایه شده است که بر پایه مته‌های غلتکی سه کاجه می‌باشد. تلاش‌های زیادی که توسط وارن و همکاران انجام شده نشان داد که مقاومت حفاری را می‌توان برای مته‌های مخروطی تعیین نمود و برای برخی کاربردها، همچون شبیه‌سازی حفاری و انتخاب مته، مورد استفاده قرار داد. مقاومت حفاری می‌تواند به عنوان مقاومت در برابر نفوذ مته در حین حفاری، که تابعی از خواص سنگ می باشد، تعریف شود. معادله ارایه شده به شکل زیر است (Bataee and Mohseni, 2011; Rahimzadeh et al, 2010;) (Hareland and hoberock, 1993).

$$ROP = W_f \left[f_c (P_e) \left(\frac{a S^2 d^3}{N W O B^2} + \frac{b}{N d} + \frac{c \rho_m \mu d}{I_m} \right) \right] \quad (۱۰-۲)$$

$$W_f = 1 - \frac{\Delta B G}{8} \quad (۱۱-۲)$$

$$S = UCS(1 + a_s P_e^{b_s}) \quad (۱۲-۲)$$

مولفه‌های a ، b و c از خصوصیات مته و a_s و b_s از جمله ثابت‌های مقاومتی سنگ بشمار می‌آیند. همچنین $\Delta B G$ تغییرات فرسودگی مته، ρ_m چگالی سیال حفاری، μ ویسکوزیته سیال، I_m نیروی جت سیال و P_e فشار تفاضلی سازند می‌باشند.

اونیا^۱ و همکاران (۱۹۸۷) با توسعه مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ مته‌های غلتکی، عوامل طراحی مته، شرایط عملیاتی و مکانیک سنگی را تأثیر گذار شمردند. شکل پذیری سنگ^۲ از مهمترین عوامل مؤثر بر عملکرد مته شمرد شده. همچنین زاویه خروج از مرکز به دلیل اهمیت جنبه طراحی‌اش در سنگ‌های شکل پذیر عامل مهم دیگری در تأثیر بر نرخ نفوذ می‌باشد. ایشان با توجه به داده‌های میدانی به تفسیر نگار مقاومت سنگ پرداخته و به توصیف عملیات حفاری پرداختند (Onyia et al., 1987).

$$ROP = \left[\frac{UCS \times d^2}{N W O B} \left(\frac{a \times UCS \times d \times \varepsilon}{W O B} + \frac{\varphi}{\varepsilon} \right) + \frac{b}{N d} + \frac{c \rho_m \mu d}{I_m} \right]^{-1} \quad (۱۳-۲)$$

در این رابطه مولفه‌های a ، b و c مربوط به خصوصیات مته می‌باشد. همچنین ε و φ به ترتیب

1-Onyia
2-Ductility

تغییر شکل پذیری سنگ و ضریب زاویه خروج از مرکز مته را نشان می‌دهند.

رحیم زاده و همکاران^۱ (۲۰۱۰) به مقایسه کلی مدل‌های ایجاد شده برای سرعت حفاری در یکی از میادین خلیج فارس پرداختند. آنها ذکر کردند که معادله‌های سرعت حفاری بدست آمده در چندین فواصل عمقی بر اساس دو مدل یانگ – بوگوین و وارن می‌باشد. بعد از مقایسه این مدل به ایجاد یک مدل جدید با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداختند. آنها تصریح کردند که نتیجه این کار کاهش زمان و هزینه در حفاری چاه‌های جدید بود (Rahimzadeh et al., 2010).

اخلاقی و همکاران^۲ (۲۰۱۲) از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در چاه‌های شیدار میدان نفتی اهواز بهره بردند. عمق، اندازه نازل، وزن روی مته، وزن گل و محتوای جامد پارامترهای ورودی و نرخ نفوذ پارامترهای خروجی مورد بررسی بودند. بیش از ۳۰۰ نقطه داده از ۶ چاه مایل میدان نفتی مورد نظر گردآوری شد. قبل از ایجاد مدل، با استفاده از تجربه، داده‌های دورافتاده حذف شدند. نتایج پیش‌بینی هم‌خوانی خوبی را با داده‌های واقعی نرخ نفوذ نشان داد (Akhlaghi and rezaei, 2012). سه پارامتر مهم یعنی نوع مته، شیب چاه و مشخصات سازند در این مطالعه نادیده گرفته شده است. به نظر می‌رسد اعمال این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ شود.

هانکینز و همکاران^۳ (۲۰۱۵) با شبیه‌سازی فرآیند حفاری یکی از چاه‌های حفاری شده، به بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی به منظور حفاری چاه‌های مجاور پرداختند. آنها پس از تخمین قابلیت حفاری سازند، با استفاده از آن، مقادیر پارامترهای وزن روی مته و سرعت دوران مته را به گونه‌ای بهینه‌سازی نمودند که منجر به دستیابی به بیشینه نرخ حفاری با کمترین هزینه ممکن شود (Hankins et al., 2015). یکی از محدودیت‌های این تحقیق عدم توجه به پارامتر قابلیت حفاری سازند است که تنها بر مبنای مقاومت تک محوری سنگ و بدون در نظر گرفتن شرایط داخل چاه لحاظ شده است.

1-Rahimzadeh et al

2-Akhlaghi et al

3-Hankins et al

$$ROP = \frac{14.14 \times WOB \times N \times \cos a}{S \times d \times \tan \theta} \times \frac{a}{N^b \times WOB^c} \quad (14-2)$$

در این رابطه، S قابلیت حفاری سازند، a زاویه سمت چنگک جمع کننده^۱، θ زاویه پشت چنگک جمع کننده^۲ و ضرایب a، b و c فاکتورهای تصحیح هندسه برنده می‌باشند.

بزمین آبادی و همکاران^۳ (۲۰۱۷) برای بررسی اثر مشخصات سنگ در تخمین نرخ نفوذ، علاوه بر پارامترهای عملیاتی از ویژگی‌های سنگ نیز استفاده کردند. پارامترهای به کار رفته در این تحقیق شامل عمق، وزن روی مته، اختلاف فشار ته چاه، سرعت دوران، نرخ جریان، وزن سیال حفاری، ساییدگی دندانهای مته، تخلخل، چگالی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت ویژه سازند، نگاره گاما، سرعت صوت فشاری و مقاومت فشاری تک محوره است (Bezminabadi et al., 2017). آن‌ها نشان دادند که با کارگیری مشخصات سازند می‌تواند دقت مدل‌های نرخ نفوذ را به طور چشمگیری افزایش داد. یکی از محدودیت‌های مدل ارائه شده، بررسی تعداد محدودی از پارامترهای عملیاتی است.

۲-۶- جمع‌بندی

عملیات حفاری نقش قابل توجهی از هزینه اکتشاف و بهره‌برداری را در صنعت نفت به خود اختصاص می‌دهد. پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری از منظر ارزیابی دقیق‌تر زمان حفاری و در نتیجه کنترل هزینه‌های عملیات حفاری بسیار حائز اهمیت است. نرخ نفوذ حفاری تابع عوامل زیادی است که به طور کلی به عوامل کنترلی و عوامل محیطی دسته بندی می‌شوند.

تعدد فاکتورهای موثر در عملیات حفاری نشان دهنده پیچیدگی تقابل مته و سنگ است که موجب وابستگی پارامترها و غیرخطی بودن روابط بین آن‌ها می‌شود. توجه ارتباط میان این عوامل و نرخ نفوذ حفاری ملزم به داشتن اطلاعات جامع از چاه مورد نظر می‌باشد. برای مثال کاهش نرخ نفوذ با توجه به افزایش مقاومت سنگ توسط ایجاد اختلاف مناسب بین فشار گل و فشار منفذی قابل کنترل

1-Side-rake angle

2-Back-rake angle

3-Bezminabadi et al

است. همچنین از آنجایی که مقاومت یک سنگ در برابر حفاری به اندرکنش میان سنگ و سر مته مربوط است. لذا چیرگی مشخصات مهندسی سر مته و عوامل عملیاتی دستگاه نظیر بار پشت مته و دور مته بر مشخصات سنگ ضامن بهبود شرایط حفاری و افزایش سرعت می‌باشد. بدین ترتیب علاوه بر میزان اهمیت عوامل عملیاتی، اطلاع از عوامل ژئومکانیکی مسیر حفاری تاثیر بسزایی در فرآیند بهبود عملکرد حفاری خواهد داشت.

ترکیب کانی شناسی و بافت (اندازه، شکل، و نحوه قرارگیری کانی‌ها در یک سنگ)، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ، نقش مهمی در فرآیند شکست و در نتیجه نرخ نفوذ حفاری خواهد داشت. اما توجه بسیار کم به چنین عواملی در صنعت نفت و همچنین دسترسی بسیار سخت به مغزه‌ها و در نتیجه کمبود آزمایش‌های مربوط به سایش، سفتی و غیره خلا بزرگی در بررسی مکانیزم خردایش در مقیاس کوچک ایجاد نموده است. لازم به ذکر است در صورت دسترسی به مغزه، در تمامی تحقیقات آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری تأثیر خصوصیات سنگ بر روی نرخ نفوذ، پارامترهایی چون نوع مته، وزن روی مته، سرعت چرخش و دیگر پارامترهای مربوط به عوامل عملیاتی می‌بایست ثابت فرض شود. بدین ترتیب می‌توان تأثیر خصوصیات سنگ از قبیل مقاومت فشاری، سایش و غیره را بررسی نمود. توجه به این نکته ضروری است که در صورت استفاده از مطالعات آزمایشگاهی در علم ژئومکانیک نفت، اعمال فشارهای محصور کننده در شرایط حفاری ته چاه امری ضروری است.

مدل‌های حفاری متفاوتی جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ در شرایط مختلف ارائه گردیده است. در اغلب این مدل‌ها ثابت‌هایی از خصوصیات سنگ وجود دارد که عموماً به صورت تجربی تعیین گردیده و شاخصی غیر مستقیم از برخی خصوصیات سنگ می‌باشند. بنابراین تعمیم و استفاده از چنین مدل‌هایی در مناطق دیگر به دلیل دقت پایین این عوامل و همچنین عدم جامعیت آن‌ها در نشان دادن خصوصیات ژئومکانیکی، از دقت کافی برخوردار نیست.

در این فصل ابتدا به انواع حفاری و انواع مته‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به معرفی میدان

و چاه مورد نظر پرداخته شد و مشخصات سازند مورد بررسی قرار گرفت. سپس به معرفی عوامل تاثیرگذار بر نرخ نفوذ پرداخته شد. در ادامه هر یک از عوامل در چهار عمق مختلف برای چاه مورد نظر امتیازدهی شد.

در فصل بعد به معرفی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و پیشینه‌ی کاربرد آن در علوم مختلف پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

رویکرد سیستم مهندسی سنگ

(RES)

۳-۱- مقدمه

در عصر حاضر پیشرفت‌های متعددی در بررسی و تحلیل مسایل پیچیده صورت گرفته است. یکی از روش‌هایی که به تدریج کاربرد زیادی در تحلیل مسایل مختلف پیدا کرده است، نگرش سیستمی است. در تفکر سیستمی با در نظر گرفتن تمامی جوانب و عوامل متعدد به بررسی مساله‌ی مورد نظر پرداخته می‌شود. با پیچیده‌تر شدن مسایل ژئوتکنیکی در کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع می‌توان دریافت که روش‌های مرسوم عددی و تحلیلی هرگز قادر به در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار بر یک مساله خاص نبوده و همواره از بسیاری ساده‌سازی‌ها در آن‌ها استفاده می‌شود و در نتیجه این روش‌ها با محدودیت‌های بی‌شماری در مواجهه با مسایل مختلف روبرو هستند. رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) بر مبنای تفکر سیستمی بنا نهاده شده و کاربرد گسترده‌ای در تحلیل مسایل ژئوتکنیکی پیدا کرده است. در این فصل به معرفی و بررسی این رویکرد پرداخته می‌شود.

۳-۲- تفکر سیستمی

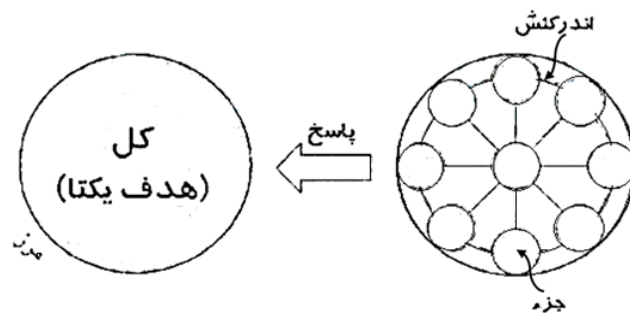
آلن‌بی^۱ (۱۹۹۹) سیستم را به صورت گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش بر روی همدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل یک سیستم از جمع تک تک اعضای آن بزرگ‌تر است. این تفکر به نام تفکر سیستمی شناخته شده و روش‌هایی که به نوعی از این تفکر استفاده می‌کنند، روش‌های سیستمی نام دارند (Allenby, 1999). طبق نظر جیائو^۲ (۱۹۹۵)، استفاده از رویکرد سیستمی زمانی ضروری است که تحلیل‌گر با مسائلی روبرو است که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، چنانکه روش‌های مرسوم به تنهایی و سادگی قادر به حل آنها نیستند. همچنین وی عقیده دارد که در رویکرد سنتی، تحلیل‌گر از جز به کل می‌رسد اما در رویکرد سیستمی، از کل به جز می‌رسد (Jiao, 1995).

1-Allenby

2-Jiao

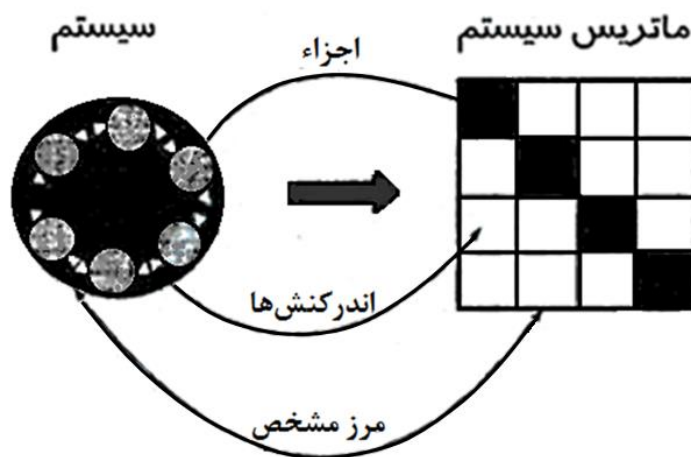
بنا بر نظریه‌ی سیستم‌ها که همزمان توسط برتالانفی^۱ و راپوپورت^۲ (۱۹۶۸) ارایه شده است، یک سیستم به عنوان یک "کل"^۳، هدفی یکتا در محدوده‌ی یک مرز مشخص دارا است. به این ترتیب می‌توان سیستم را متشکل از اجزای مؤثر بر هم با یک مرز مشخص کرد. بنابراین، کل را می‌توان به صورت پاسخ سیستم ناشی از اندرکنش‌های تمام اجزا (و نه جمع ساده‌ی آن اجزا) تعریف نمود (Rapoport, 1968).

شکل ۱-۳ مفهوم تفکر سیستمی را بیان می‌کند.



شکل ۱-۳: مفهوم تفکر سیستمی (Rapoport, 1968)

سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزا اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند (Hill and Warfield, 1972). این مفهوم در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



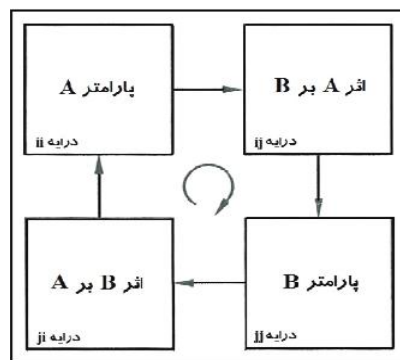
شکل ۲-۳: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (Hill and Warfield, 1972)

1-Bertalanffy
2-Rapoport
3-Whole

۳-۳- رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES)

در طراحی پروژه‌های ژئوتکنیکی باید این اطمینان حاصل شود که تمامی عوامل تاثیرگذار و اندرکنش‌های مابین آن‌ها در نظر گرفته شده است. به عنوان یک روش سیستمی برای مواجهه با تمام اندرکنش‌ها، می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس جانمایی نمود. این کار به عنوان ابزاری پایه‌ای توسط رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار می‌گیرد. عوامل اصلی مرتبط با مساله‌ی مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس جانمایی شده و اندرکنش‌های هر جفت از عوامل در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند. مراحل کدگذاری^۱ اندرکنش‌ها و عملیات جبری برای سطرها و ستون‌ها اعمال شده و روش با خروج نمودارهایی ادامه می‌یابد.

روش مرسوم در آرایه و نشان دادن اندرکنش‌ها در سیستم‌ها استفاده از ماتریس‌های اندرکنش^۲ است. در این ماتریس‌ها عوامل اصلی مورد نظر در طول قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در شکل ۳-۳ دیده می‌شود عامل A در درایه‌ی بالا سمت چپ و عامل B در درایه‌ی پایین سمت راست ماتریس قرار می‌گیرند. درایه‌ی بالا سمت راست نشان‌دهنده‌ی تاثیر A روی B و درایه‌ی پایین سمت چپ نشان‌دهنده‌ی تاثیر B روی A است. به این ترتیب، در واقع اصول پایه‌ای ماتریس اندرکنش، جانمایی عوامل اصلی در طول قطر اصلی و در نظر گرفتن اندرکنش‌ها در درایه‌های غیر قطر اصلی است (Hudson,1992).



شکل ۳-۳: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B (Hudson,1992)

1-Coding

2-Interaction Matrix (IM)

۳-۴- کدگذاری ماتریس اندرکنش

بعد از اینکه ماتریس اندرکنش ساخته شد، می‌توان رابطه عوامل مؤثر بر مساله را از نظر کیفی و تحلیلی، به طور همزمان در این ماتریس مشاهده نمود و با یکدیگر مقایسه کرد. اما این شکل مقایسه، کیفی و وقت‌گیر است و معمولاً افراد قضاوت‌های مختلفی از یک رابطه می‌کنند بنابراین لازم است تا این روابط به صورت کمی درآیند که در ادامه در این مورد توضیح داده شده است. طبق نظر هادسون (۱۹۹۲) ۵ روش برای کدگذاری ماتریس وجود دارد (Hudson, 1992):

الف- روش اول به روش دوتایی^۱ معروف است. در این شیوهی کدگذاری، ساز و کار ما بین دو عامل به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که روشن باشد، درایه‌ی مورد نظر مقدار واحد را قبول کرده و در صورتی که ساز و کار مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه‌ی مربوط به آن قرار می‌گیرد.

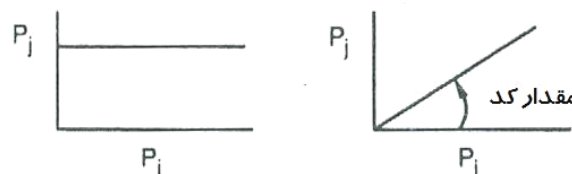
ب- روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره^۲ (ESQ) معروف است که در حقیقت نوع تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج رده‌ی کدگذاری از صفر تا ۴ است. در این رده‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اندرکنش بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش قبلی (دوتایی) که به صورت بسیار ساده تنها روشن یا خاموش بودن درایه‌ها را تعیین می‌نمود، برخوردار است. ضعف اصلی این روش، مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص رده‌ها به درایه‌ها است که آن را در تشریح کامل ساز و کارهای مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مساله باعث ذهن‌گرایی کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیش‌ترین کاربرد

1-Binary

2-Expert Semi Quantitative

برخوردار است.

ج- روش سوم، از شیب نمودار عوامل برای کدگذاری استفاده می‌شود. اگر نمودار $P_i - P_j$ به صورت یک خط افقی باشد، در این صورت P_j به P_i وابسته نیست. ولی اگر رابطه خطی مابین آنها وجود داشته باشد، ساز و کار مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود که در حقیقت سرعت تغییرات P_j به عنوان تابعی از P_i را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از این روش، بایستی نمودارهای $P_i - P_j$ برای تمامی درایه‌های غیر اصلی ماتریس مشخص شوند. عدم خطی بودن روابط میان عوامل مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت.



شکل ۳-۴: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب خط نمودار (Hudson, 1992)

پیدااست که این روش علمی‌تر و دقیق‌تر از روش‌های پیشین است ولی پیدا کردن رابطه بین عوامل کار سختی است. همچنین بسیاری از عامل بین یکدیگر روابطی از درجه ۲ به بالا دارند که این موضوع کاربرد روش را سخت‌تر می‌کند.

د- روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم است. در این روش، فرض بر این است که تمام ساز و کار در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله‌ی مشتقات جزئی^۱ (PDE) بیان شوند. به عنوان مثال، اگر فرض شود که تمام ساز و کارهای موجود در ماتریس را بتوان توسط معادلات مشتقات جزئی مرتبه اول بیان کرد، در این صورت توابع نمایی و نمایی منفی قادر خواهند بود که روابط $P_i - P_j$ را توصیف نمایند. این روش نیز از ضعفی مشترک با آنچه برای روش سوم بیان شد، برخوردار است. علاوه بر این، با وجود این که اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حل واقعی‌تری به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ عملی بسیار سخت و پیچیده

1-Partial Differential Equation

(و گاه غیر ممکن) به شمار آید.

ه- روش پنجم، روش صریح^۱ نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل

ساز و کارهای ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی (Numerical) آن‌ها فراهم است و می‌توان

رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرار داد.

چنین آگاهی و اطلاعاتی مسلماً هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود نخواهد داشت، ولی

در صورت استفاده از تمام اطلاعات موجود، می‌تواند با روش‌های دوم و چهارم تلفیق شده و مورد بررسی قرار گیرد.

روش ESQ در میان سایر روش‌ها، با وجود ضعف‌های آشکار تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون از

بیشترین کاربرد برخوردار بوده و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است.

۳-۵- نمودار علت و اثر

نحوه شکل‌گیری محورهای علت اثر در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. عوامل اصلی (P_i) در

امتداد قطر اصلی ماتریس لیست شده‌اند. با توجه به نحوه ساختن شدن ماتریس، واضح است که هر سطر

عبوری از P_i نشانگر تأثیر آن بر تمام عوامل دیگر موجود در سیستم است و بالعکس هر ستون عبوری از

P_j نشانگر تأثیر عوامل دیگر سیستم بر روی آن عامل است. به محض اینکه ماتریس به صورت عددی

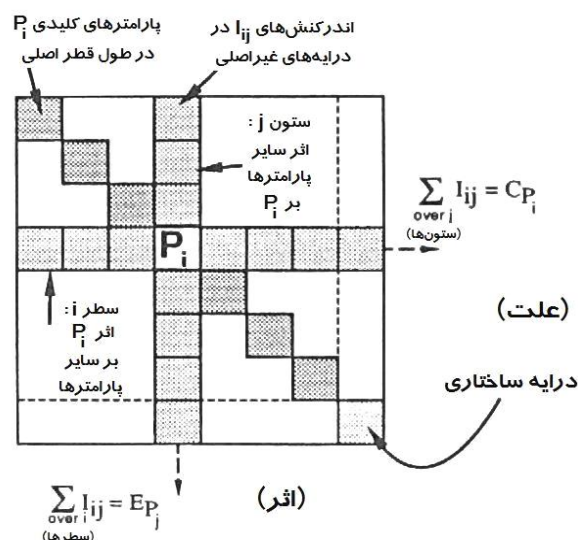
کدگذاری شد، می‌توان جمع جبری مقادیر هر سطر و هر ستون آن را به دست آورد، که مجموع هر سطر

با نام علت (Cause) و همین‌طور مجموع مقادیر هر ستون با نام اثر (Effect) شناخته می‌شود که در

نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند. بنابراین C ارائه‌گر نحوه تأثیرات P_i بر سیستم و

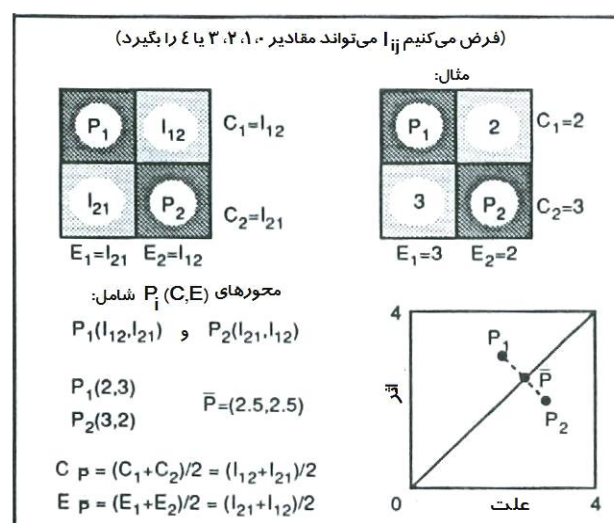
E نشان دهنده تأثیری است که سیستم بر P_i می‌گذارد.

1-Explicit

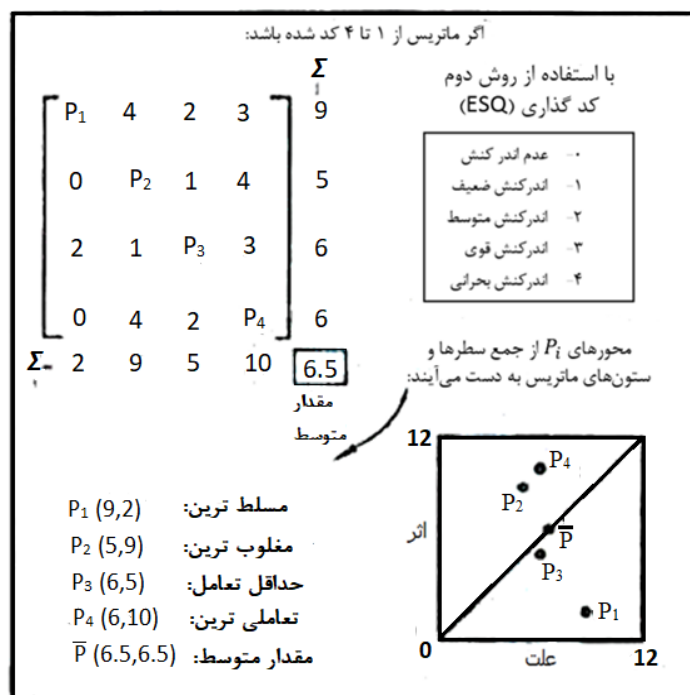


شکل ۳-۵: نحوه شکل‌گیری محورهای علت-اثر در ماتریس‌های اندرکنش (Hudson, 1992)

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نمودار علت-اثر انتقال یابد. برای معرفی اولیه‌ی این مفهوم، ابتدا بر روی نمودار (C, E) دو عامل بحث می‌شود که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. برای چنین ماتریسی، یا استفاده از روش کدگذاری ESQ، مجموع مقادیر برای سطرها یا ستون‌ها عدد ۴ است. این ماتریس نحوه‌ی رسم نمودار یاد شده را به صورت بسیار ساده نشان می‌دهد. در شکل ۳-۶ نمودار (C, E) به سه پارامتر تعمیم داده شده است و همراه با مثال‌هایی از ماتریس متقارن ارائه شده است. همچنین در شکل ۳-۷، نمونه‌ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش ۴*۴ می‌باشد، که $\bar{P}$ به عنوان میانگین P_i ها بر روی خط $C=E$ قابل توجه است.



شکل ۳-۶: نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش کدگذاری شده ۲*۲ و نمودار علت-اثر آن (Hudson, 1992)



شکل ۳-۷: نمونه ای از نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش ۴*۴ (Hudson,1992)

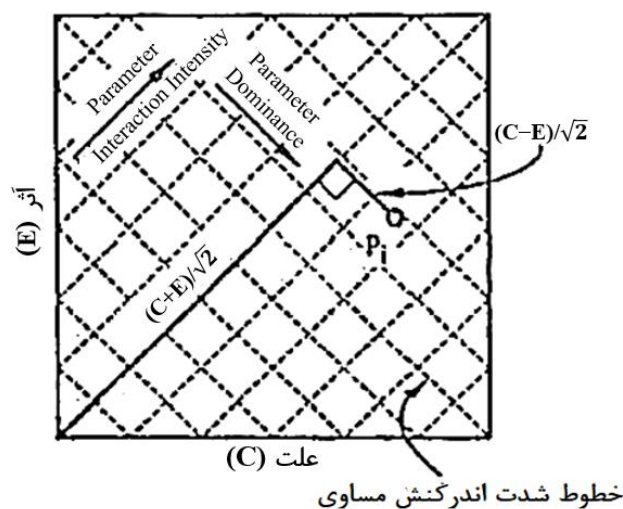
موقعیت نقاط روی نمودار علت-اثر نشان دهنده نوع اثر متقابل هر پارامتر است. همانطور که در

شکل ۳-۷ مشخص است، پارامتر P_4 دارای بیشترین شدت اندرکنش است، چرا که دارای بیشترین مقدار $C+E$ است. کمترین شدت اندرکنش نیز مربوط به پارامترهای P_3 و P_1 است که دارای کمترین مقادیر $C+E$ هستند. غالب ترین^۱ پارامتر P_1 به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار $C-E$ است. این بدان معنی است که بیشتر از آن که سیستم بر P_1 تاثیرگذار باشد، این پارامتر سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مغلوب‌ترین^۲ پارامترها نیز P_4 و P_2 می باشند که دارای کمترین $C-E$ هستند.

چنین تفسیرهایی را می‌توان مستقیماً از نمودار (C,E) نیز انجام داد. شکل ۳-۸ مفهوم مربوط به خصوصیت شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر را نشان می‌دهد. این شکل بیان کننده این موضوع است که شدت اثر متقابل یک پارامتر در امتداد خط $C=E$ اندازه‌گیری شده و تسلط پارامتر نیز با فاصله عمودی نقطه مربوطه تا خط یاد شده سنجیده می‌شود.

1-Dominant
2-Subordinate

نمودار $P_i(C, E)$ نگاشته شده در فضای علت-اثر



شکل ۳-۸: شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر (Hudson, 1992)

۳-۶- پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه RES

سیستم‌های مهندسی سنگ از زمان معرفی آن در سال ۱۹۹۲ تا کنون یکی از پر کاربردترین رویکردهای سیستمی در زمینه‌های مختلف بوده است. در مسایلی که تعداد عوامل دخیل و مؤثر بر سیستم زیاد باشد، این رویکرد قابلیت استفاده بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های مرسوم از خود نشان می‌دهد. در این بخش به بعضی از کاربردها از ابتدا تا کنون به اختصار اشاره می‌شود.

رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES) برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Hudson, 1992). طی این معرفی وی اصول اولیه رویکرد و نحوه استفاده از آن را به طور کامل ارائه داد و بدین ترتیب به عنوان نخستین بار تحلیل‌های سیستمی وارد مهندسی سنگ و کاربردهای مشابه گردید. پس از آن، این رویکرد به دلیل مزایای بسیار به سرعت تبدیل به یک ابزار دارای پتانسیل بالا برای حل مسائل پیچیده مهندسی سنگ شد. همچنین روش در مباحث متنوعی غیر از مهندسی سنگ مطرح شده و کاربرد یافته است که در این بخش سعی شده است به آن‌ها نیز اشاره گردد.

در سال ۱۹۹۲، هادسون و همکاران با استفاده از RES، به ارزیابی عامل‌های مؤثر بر چند پروژه

مهندسی سنگ پرداختند و مخاطرات این پروژه‌ها را مورد تحلیل قرار دادند (Hudson & Harrison, 1992). در سال ۱۹۹۵ جیائو با به‌کارگیری روش RES در برخی کاربردهای مهندسی، سعی در رسمی سازی استفاده از این روش نمود (Jiao, 1995). همچنین مازوکولا^۱ و هادسون در سال ۱۹۹۶ برای اولین بار روش مذکور را در کارهای تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی وارد نمودند. در این مطالعه، ناپایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرار گرفت (Mazzoccola and Hudson, 1996).

اسگایو^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۷ از RES برای سنجش میزان خطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع زباله‌های هسته‌ای در سوئد بهره بردند. در این تحقیق سیزده عامل به عنوان عوامل کلیدی موثر بر سیستم در نظر گرفته شده بود (Skagius et al., 1997). کاستالدینی^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۸، اثرات ناشی از زلزله را بر پایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آپنینز ایتالیا با روش سیستمی و در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تحلیل نمودند (Castaldini, et al., 1998). وین دورب^۴ و همکاران در سال ۱۹۹۹، ماتریس‌های اندرکنش را در بخشی از تحلیل‌های بکار رفته به منظور مدل‌سازی آلودگی‌های ناشی از انباشت زباله‌های هسته‌ای در چند کشور اروپایی مورد استفاده قرار دادند (Van Dorp et al., 1999). همچنین در این سال لاتام^۵ و لو^۶ از روش RES با کدگذاری اصلاح‌شده در ارائه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده سنگ‌ها بهره بردند (Latham and Lu, 1999). آخرین مطالعه در این سال مربوط به استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به منظور ارزیابی میزان مهاجرت برخی عناصر در اکوسیستم‌های جنگلی توسط آویلا^۷ و موبرگ^۸ است (Avila & Moberg, 1999). در سال ۲۰۰۰، شانگ^۹ و همکاران از روش RES جهت انتخاب بهترین محل برای ساخت نیروگاه زیرزمینی شیسان-لینگ در چین استفاده

1-Mazzoccola

2-Skagius

3-Castaldini

4-Van dorp

5-Latham

6-Lu

7-Avila

8-Moberg

9-Shang

کردند (Shang et al., 2000). آن‌ها برای این منظور شاخص تناسب جامع را تعریف کردند که در نهایت بهترین مکان را با توجه به آن انتخاب نمودند. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ خطر سقوط سنگ از شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو-لاسا به طول ۴۳۰ کیلومتر در چین را در ۱۹ ایستگاه به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمودند. شاخص مورد استفاده آن‌ها شاخص خطر سقوط سنگ نام داشت (Zhang et al., 2004). در همین سال بناردوس^۱ و کالیامپاکوس^۲ در ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی در تونل تمام مقطع متروی آتن یونان از روش RES استفاده کرده و با تعریف شاخص آسیب‌پذیری با حساسیت به ریزش در ایستگاه‌های مختلف حفاری تونل، توانستند این خطرات را برآورد نمایند (Benardos & Kaliampakos, 2004). بندز^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۵ آلودگی‌های ایجادشده ناشی از بکار بردن ضایعات صنعتی در مصالح راه‌سازی را به کمک ماتریس‌های اندرکنش مورد مطالعه قراردادند (Bendz, et al., 2005). همچنین در همین سال ماورولیدو^۴ و همکاران طی مطالعه‌ای جامع، اقدام به نگاشت آلودگی ناشی از ترافیک هوای شهر گلیفورد انگلستان نمودند. آن‌ها برای این کار علاوه بر استفاده از RES و تشکیل ماتریس اندرکنش با فاکتورهای تاثیرگذار بر کیفیت هوای شهر، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز برای نگاشت نهایی استفاده کرده و در نهایت نتایج خود را با نتایج به دست آمده از روش‌های عددی مقایسه نمودند (Mavroulidou et al., 2005). فرننتینو^۵ و ساکلاریو^۶ نیز در ۲۰۰۷ همین روش را برای پیش‌بینی خطر لغزش و ارزیابی عملکرد شیب‌های طبیعی پیشنهاد کردند (Ferentinou and Sakellariou, 2007). اندریوکس^۷ و حاجیجورجیو^۸ در سال ۲۰۰۸ روشی را برای تعیین قابلیت تنش‌زدایی انفجار در پایه‌های معادن زیرزمینی ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از روش RES و تعیین شاخصی به منظور رسیدن به هدف یادشده، توانستند اصلاحاتی در روش طراحی پایه‌های بزرگ

1-Benardos

2-Kaliampakos

3-Bendz

4-Mavroulido

5-Ferentinou

6-Sakellariou

7-Anderiux

8-Hadjigeorgiou

مقیاس ارائه نمایند (Anderiux and Hadjigeorgiou, 2008). دی پیپو^۱ و همکاران در همین سال برای ارزیابی خطرات مختلف در نواحی ساحلی جنوب ایتالیا و شهر ناپلس از رویکرد سیستمی RES استفاده نمودند (De Pippo et al., 2008). بودتا^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز با استفاده از یک الگوریتم بر مبنای GIS و RES، نگاشت خطرات وقوع زمین لغزش را برای ناحیه کلینتو ایتالیا انجام دادند (Budetta et al., 2008). همچنین، جریان^۳ و جریان با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به مطالعه و ناحیه‌بندی حساسیت ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوگانکت در کشور ترکیه پرداختند (Ceryan and Ceryan, 2008). روزوس^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز کاری مشابه را برای شیب‌های طبیعی استان کاردیتسا در یونان انجام دادند (Rozos et al., 2008). شین^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از رویکرد RES و تعریف شاخص خطر ریزش تونل، روشی برای ارزیابی کمی خطرات پایداری تونل‌ها در کره جنوبی ارائه دادند (Shin et al., 2009). در همین سال کندور و اصغری از تلفیق این رویکرد و روش‌های تصادفی برای تحلیل داده‌های رفتار نگاری خطر نشت دی اکسید کربن از دیواره چاه‌ها و مخازن استفاده کردند (Condor and Asghari, 2009). فرنیتیو^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۱ از رویکرد RES برای تحلیل خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات دریایی در منطقه زاکینتوس یونان بهره بردند (Ferentinou and Hasiotis, 2011). در ادامه سال ۲۰۱۱ روزوس و همکاران با تلفیق رویکرد RES و GIS به مطالعه ارزیابی خطر زمین لغزش و تهیه نقشه‌های حساسیت برای شیب‌های طبیعی شرق شبه‌جزیره پلویونسوس در جنوب یونان پرداختند (Rozos et al., 2011). در سال ۲۰۱۳ زارع نقدهی نیز با استفاده از رویکرد RES گسترش یافته پایداری شیب‌های معادن را مورد بررسی قرارداد (Zare Naghadehi et al., 2013). در همین سال فروغ با استفاده از RES و تحلیل رگرسیون، مدلی را برای پیش بینی از توقفات ناشی از شرایط توده سنگ برای TBM ارائه نمود (Frough & Torabi, 2013). در سال ۲۰۱۴ صفاری و همکاران

1-De Pippo

2-Budetta

3-Ceryan

4-Rozos

5-Shin

6-Ferentinou

خاصیت گاز خیزی زغال را با استفاده از روش RES بررسی کردند (Saffari et al., 2014). در سال ۲۰۱۶ رفیعی و همکاران در زمینه بهبود سیستم‌های مهندسی سنگ با استفاده از اعداد فازی تحقیق کردند. آن‌ها از یک روش نیمه عددی خبره فازی برای کدگذاری ماتریس RES تهیه شده از پارامترهای موثر توده سنگ در معادن با روش استخراج تخریب بزرگ استفاده کردند (Rafiee et al., 2016).

۳-۷- تلاش‌های انجام شده جهت بهبود رویکرد RES

باوجود گذشت بیش از ۲۰ سال از ارایه رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تا به امروز تحقیقات اندکی در زمینه بهبود این رویکرد صورت گرفته است. همان طور که در بخش قبل اشاره شد، ماتریس اندرکنش به عنوان یک جز بنیادی در روش‌های سیستمی و بخصوص RES به شمار می‌رود. از همین‌رو، بهبودهای صورت گرفته نیز در همین جهت و بیشتر بر نحوه کدگذاری این ماتریس انجام شده است. در این بخش به هر یک از تحقیقات انجام شده در جهت ارتقای رویکرد به صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

الف- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری

لو و لاتام^۱ (۱۹۹۴) با به‌کارگیری نظریه سیستم‌های خاکستری از نظریه‌های علم کنترل، روشی جدید برای کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES ارایه نمودند (Lu and Latham, 1994). درنظریه کنترل، تیرگی و روشنی رنگ‌ها همواره نشان‌دهنده‌ی میزان اطلاعات موجود است. سیستمی که در آن عوامل، ساختار و مشخصات به طور کامل شناخته شده باشند، به نام سیستم "سفید" و سیستمی که عوامل، ساختار و مشخصات آن کاملاً ناشناخته هستند به سیستم "سیاه" معروف است. با این حال، اکثر سیستم‌ها در عمل نه کاملاً شناخته شده و نه به طور کامل ناشناخته هستند. ازین رو، سیستمی که شامل هر دو اجزای شناخته شده و ناشناخته باشد، یک سیستم "خاکستری" نام می‌گیرد. ابزار مورد استفاده در این آنالیز سیستمی نیز شامل آنالیز همبستگی خاکستری، تولید داده‌ها بر اساس تحلیل آماری خاکستری و دسته بندی خاکستری است (Den, 1982).

1- Lu and Latham

طبق نظریه لو و لاتام (۱۹۹۴)، یک سیستم مهندسی سنگ با گستره‌ای از عوامل و اندرکنش‌های میان آنها (به دلیل خاصیت ذاتی آن)، سیستمی با اطلاعات اولیه اندک است که کاملاً بر خصوصیات یک سیستم خاکستری منطبق است. به همین دلیل با استفاده از نظریه یاد شده اقدام به ارایه‌ی یک شیوه کدگذاری جدید با نام کدگذاری عددی پیوسته (CQC^۱) نمودند. در این شیوه، ماتریس با استفاده از رده‌های خاکستری کدگذاری شده و سپس این رده‌ها تبدیل به اعداد (کدها) می‌شوند.

تنها استفاده عملی از روش کدگذاری جدید، توسط خود ارایه دهندگان آن در سال ۱۹۹۹ و برای توسعه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده سنگ بوده است (Latham and Lu, 1999). در این مطالعه، ماتریس اندرکنش ساخته شده برای ۱۲ عامل مربوط به خصوصیات توده سنگ با استفاده از روش CQC کدگذاری شده است.

از مزایای روش کدگذاری CQC نسبت به ESQ می‌توان به محدوده‌ی وسیع‌تر اعداد آن اشاره کرد که از ۰ تا ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود که حساسیت نسبت به در نظر گرفتن تأثیرات، بالاتر رفته و در نتیجه کوچکترین تفاوت در اثرات متقابل نیز در نتایج منعکس گردد.

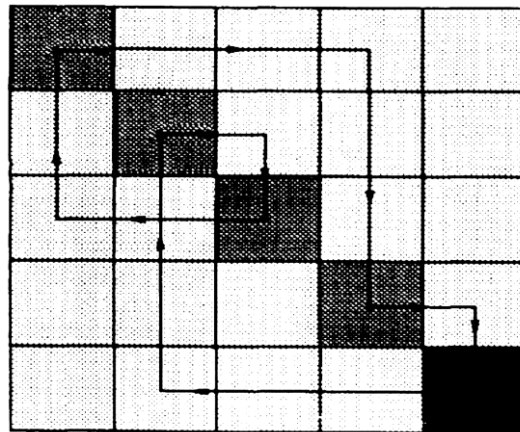
با این حال، در این روش نیز علی‌رغم پیوسته بودن مقادیر عددی و عدم توجه به اصول مجموعه‌های کلاسیک و اعداد صحیح، کماکان جنبه ذهنی بودن کدگذاری‌ها و استفاده از قضاوت مهندسی در تعیین کلاس‌های خاکستری برای نشان دادن اندرکنش بین پارامترها باقی است. این امر بیانگر ضعف مشترک روش‌های کدگذاری CQC و ESQ می‌باشد.

ب- استفاده از نظریه گراف

جیائو و هادسون (۱۹۹۵)، با بهره‌گیری از نظریه گراف توانستند مدل تمام مرتبط FCM^۲ را برای کاربرد در مفاهیم سیستم‌های مهندسی سنگ و البته برای مکانیزم‌های خطی ارایه دهند (Jiao and

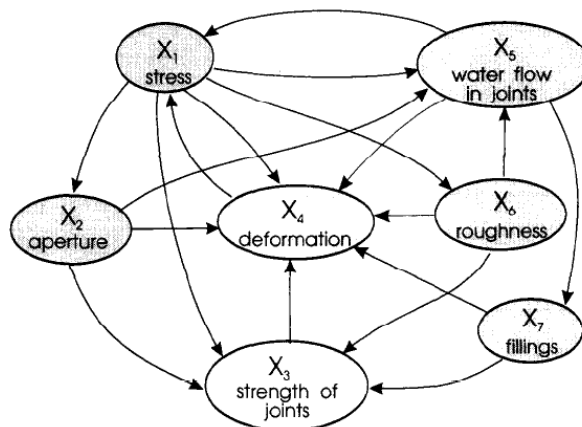
1-Continuous Quantitative Coding
2-Fully-Coupled Model

(Hudson, 1995). هدف اصلی از این کار، در نظر گرفتن رابطه همزمان بین دو پارامتر در ماتریس اندرکنش بوده است. در ارایه این رویکرد فرض بر این بوده که در دنیای واقعی، فرایندهای مکانیک سنگی تنها شامل اثر متقابل دوتایی جفت پارامترها بر یکدیگر نبوده و هر پارامتر به واسطه تأثیر همزمان بر پارامترهای دیگر، از آنها و بنابراین از خود نیز تأثیر می‌پذیرد. این فرضیه بر اساس مفهوم خط سیرهای مکانیزم ارایه شده است که در نهایت تشکیل یک حلقه را برای هر پارامتر می‌دهند. شکل ۳-۹ خط سیرهای مکانیزم تشکیل دهنده یک حلقه را برای یک ماتریس پنج پارامتری نشان می‌دهد که در آن مبدا و انتهای حلقه درایه آخر قطر اصلی (پارامتر پنجم) می‌باشد.



شکل ۳-۹: خط سیرهای یک ماتریس با ۵ عامل (Jiao and Hudson, 1995)

همان طور که گفته شد، در این مطالعه نحوه اثرگذاری پارامترهای یک سیستم بر همدیگر با استفاده از نظریه گراف تحلیل شده است. به عنوان مثال، سیستمی شامل برخی پارامترهای مکانیک سنگی مانند تنش، جریان آب در درزه‌ها، زبری سطح درزه‌ها، تغییر شکل پذیری و یا بازشدگی به صورت شبکه‌ای از مکانیزم‌ها در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: شبکه مکانیزم های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط (Jiao and Hudson, 1995)

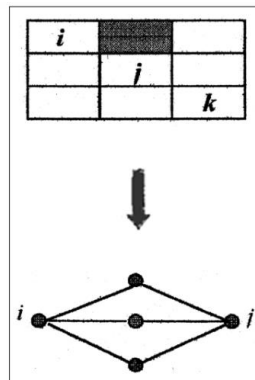
آنها معادلات مرتبط به چنین اندرکنش های مرتبط را نیز ارائه دادند تا روش پیشنهادی قابل استفاده در کاربردهای مختلف باشد. با این وجود، این روش در عین دارا بودن مزیتی مانند نزدیک تر بودن به واقعیت، نیاز به آن دارد که ارتباط بین پارامترها به صورت خطی بیان گردد. این امر آگاهی کامل از این روابط و یا دسترسی به اطلاعات کامل را می طلبد. به همین دلیل، تاکنون کاربرد قابل توجهی از این روش انتشار نیافته است. علت دیگر این امر را می توان به پیچیدگی نسبتاً زیاد روش های مبتنی بر نظریه گراف بخصوص در ماتریس هایی با پارامترهای متعدد ربط داد. با این وجود، در این ماتریس تمام خط سیرها در ماتریس در نظر گرفته شده و در نهایت یک ماتریس اندرکنش یکپارچه (GIM^۱) حاصل می گردد که از مزایای این روش محسوب می شود.

پ- استفاده از شبکه های عصبی

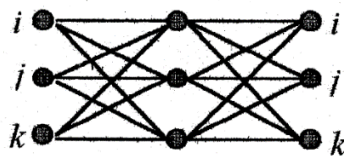
یانگ و ژانگ^۲ (۱۹۹۸) روش جدیدی را بر مبنای هوش محاسباتی برای کاربرد در سیستم های مهندسی ارائه کردند (Yang and Zhang, 1998). در این روش، برای تحلیل اندرکنش هر جفت پارامتر در ماتریس (i,j) آن دو پارامتر به عنوان ورودی و خروجی یک شبکه عصبی فرض شده و لایه های میانی با توجه به میزان اثر سنجیده شده از قبل و نوع پارامتر تعریف می شوند. با آگاهی از فرآیند یادگیری

1-Global Intraction Matrix
2-Yang and Zhang

شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان با تغییرات کوچک در ورودی شبکه (i)، میزان تأثیر در مقدار خروجی (j) را اندازه‌گیری نمود. اگر یک ماتریس اندرکنش با پارامترهای مشخص در نظر گرفته شود، نحوه قرارگیری پارامترهای i و j در شبکه عصبی به صورت شکل ۳-۱۱ نشان داده می‌شود.



شکل ۳-۱۱: نحوه قرارگیری پارامترهای ماتریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی (Yang and Zhang, 1998)



شکل ۳-۱۲: شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس

(Yang and Zhang, 1998)

در این روش ساخت لایه‌های میانی شبکه مستلزم اطلاع کامل از مکانیزم اثرات متقابل میان پارامترهای ورودی و خروجی است. بدین معنا که اندرکنش‌های صحیح تنها به شرط در دسترس بودن اطلاعات جامع از سیستم مورد نظر قابل کسب هستند. به عبارت دیگر، این روش همانند سایر روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی نیاز به داده‌های واقعی و دقیق داشته و از پیچیدگی‌های محاسباتی خاص این شبکه‌ها نیز برخوردار است.

این روش علیرغم ضعف‌هایی از جمله، عدم توجه کامل به بهینه‌سازی شبکه و تکیه بر استفاده از فضای ورودی پارامترها به صورت توان نسبی تأثیر (RSE^1) پارامترهای سیستم و همچنین عدم توجه

1- Relative Strength of Effect

ویژه به این عامل به حالت یکپارچه در تعیین اندرکنش‌ها، دارای مزایایی نیز است، از مزایای بزرگ این روش می‌توان بدین اشاره نمود که ماتریس اندرکنش از حالت استاتیکی خارج شده و به صورت یک سیستم پویا با استفاده از هوش مصنوعی مدل‌سازی می‌شود. همچنین در صورت وجود اطلاعات کافی از سیستم مورد نظر، این روش قادر است تا دقیق‌ترین اندرکنش‌های میان پارامترها را بدون نیاز به کارشناس و بدون استفاده از تخمین‌های ذهنی محاسبه نماید.

ت- استفاده از نظریه‌ی احتمالات

همان طور که در بخش‌های قبلی گفته شد در روش معمول نیمه خبره (ESQ)، تنها یک کد (مقدار عددی) یکتا برای عددسازی تأثیر یک عامل بر عامل دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی در حالت کلی عدم قطعیت‌هایی در خصوصیات عوامل و روابط بین آن‌ها وجود دارد که در نتیجه با انتخاب یک کد دقیق و یکتا نمی‌توان اندرکنش مربوطه را به طور صحیح و کامل بیان نمود. از طرفی در صورت استفاده از نظرات چندین کارشناس برای کدگذاری ماتریس اندرکنش، در نهایت چاره‌ای جز میانگین‌گیری و در نظر گرفتن مقدار متوسط کدهای متفاوت داده‌شده توسط افراد مختلف وجود ندارد. این در حالی است که در بسیاری از موارد اندرکنش موجود کاملاً ناشناخته بوده و کارشناسان نظرات مختلفی می‌دهند.

برای مواجهه با این مشکلات روش کدگذاری نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ)^۱ که توسط زارع نقدهی (۲۰۱۳) ارائه شد که اساس آن طبق زیر است:

در این روش احتمال‌های متفاوت به مقادیر مختلف کدهای اندرکنش ماتریس اختصاص می‌یابند. به عبارت دیگر برای هر اندرکنش، احتمال‌های دارا بودن مقادیر کدگذاری (در این مورد ۰ تا ۴) تخصیص می‌یابند. این کدگذاری می‌تواند توسط یک کارشناس و به طریقه ذهنی انجام گیرد و یا با تشکیل توزیع‌های احتمال کدهای داده‌شده به روش ESQ توسط کارشناسان مختلف و استخراج احتمال رخداد

1-Probabilistic Expert Semi-Quantitative

هر کد صورت پذیرد. این کدگذاری را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از ماتریس‌ها ارائه نمود (پنج ماتریس در صورتی که کدها از ۰ تا ۴ باشد) که هر یک از ماتریس‌ها در درایه ij -ام خود نشان‌دهنده احتمال کد مورد نظر برای تأثیر P_i بر P_j است. واضح است که مجموع احتمالات یک درایه واحد برای تمام ماتریس‌ها برابر ۱ خواهد بود.

با اعمال این روش در کدگذاری ماتریس اندرکنش، سایر مراحل از جمله توزیع‌های احتمال C و E نیز جنبه احتمالاتی به خود می‌گیرند (Zare Naghadehi et al, 2013).

۳-۸- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) پرداخته شد. سپس با مروری بر کاربردهای این رویکرد در علوم مختلف، بهبودهای صورت گرفته در کدگذاری ماتریس اندرکنش مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه روش پیشنهادی هادسون (ESQ) دارای محدودیت‌هایی از جمله گسسته بودن کدها و احتمال خطای قضاوت مهندسی در کدگذاری است، محققان دیگر سعی بر بهبود روش کدگذاری ماتریس اندرکنش نمودند. روش CQC که به صورت اعداد پیوسته است، بهبودی در گسسته بودن اعداد در روش ESQ داشته است. با استفاده از نظریه‌ی گراف، بررسی تأثیر هم‌زمان چند عامل بر عاملی دیگر ممکن می‌شود. همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی و احتمالات نیز موجب کاهش خطای ناشی از قضاوت مهندسی می‌شود.

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی عوامل موثر بر نرخ نفوذ حفاری چاه‌های نفتی از رویکرد RES و روش ESQ استفاده شده با این تفاوت که برای کاهش خطای قضاوت مهندسی از میانگین نظرات متخصصین استفاده شده است.

در فصل آینده با استفاده از اطلاعات چاه موردنظر که در فصل دوم طبقه‌بندی شدند، به ارائه شاخص نفوذ با رویکرد RES پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

برآورد شاخص نفوذ و بررسی

عوامل موثر بر نرخ نفوذ

۴-۱- مقدمه

تأثیر توأم کلیه عوامل بررسی شده و نیز درجه اهمیت مختلف هر یک از آنها در سرعت حفاری، مساله بررسی و بهینه‌سازی حفاری را بسیار دشوار و پیچیده می‌سازد. بدین ترتیب همواره روش‌های حل متفاوتی توسط متخصصین جهت تعیین ارتباط میان عوامل پیشنهاد گردیده است. روش مهندسی سنگ (RES) یکی از عمومی‌ترین روش‌های حل مسایل خطی و غیر خطی است که تا به حال استفاده‌های فراوانی از آن در مدل‌سازی‌های مسایل گوناگون شده است. در مطالعه حاضر از این روش به منظور تعیین ارتباط میان عوامل موجود استفاده می‌شود. بدین منظور در این فصل از روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ) برای کاربرد روش RES استفاده شده است. ابتدا ماتریس اندرکنش به وسیله روش ESQ کدگذاری شده و سپس وزن هر عامل به وسیله روابطی که در فصل دوم توضیح داده شد، به دست آمده و در ادامه شاخص نفوذ در چهار عمق مختلف چاه محاسبه شده است. در پایان عواملی که بر نرخ نفوذ تأثیرگذار هستند برای عمق‌های با شاخص نفوذ پایین مورد تحلیل حساست قرار گرفته‌اند.

۴-۲- تحلیل اندرکنش عوامل با استفاده از رویکرد RES

در این بخش، اندرکنش بین عوامل به وسیله ماتریس اندرکنش میانگین محاسبه شده و سپس به وسیله ماتریس اندرکنش میانگین وزن هر عامل محاسبه شده است.

۴-۲-۱- ماتریس اندرکنش میانگین^۱

ماتریس اندرکنش میانگین (MIM)، از میانگین امتیازهایی که متخصصین حفاری به اندرکنش عوامل تأثیرگذار بر نرخ نفوذ داده‌اند، تشکیل شده است. در ساخت این ماتریس از نظرات ۱۰ متخصص از میان اساتید دانشگاه و صنعت استفاده شده است. نمونه‌ای از پرسشنامه‌های تهیه‌شده برای نظرخواهی در پیوست شماره یک آورده شده است.

1- Mean Interaction Matrix

۴-۲-۲- کد گذاری ماتریس اندرکنش

در این بخش از روش کدگذاری ESQ استفاده شده است با این تفاوت که به جای استفاده از نظر یک شخص از میانگین نظرات ۱۰ نفر استفاده شده است و از اصطلاح ماتریس اندرکنش میانگین (MIM) استفاده شده است.

برای تشکیل ماتریس اندرکنش علاوه بر ۱۱ عامل تأثیرگذار بر روی نرخ نفوذ، عامل دوازدهم یعنی نرخ نفوذ نیز در قطر اصلی ماتریس گنجانده شده است. در نتیجه ماتریس اندرکنش میانگین دارای ۱۲ سطر و ۱۲ ستون است و قطر اصلی ماتریس شامل ۱۲ عامل یاد شده است. ستون اندرکنشی که از درایه آخر عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه عوامل عملیاتی و ژئومکانیکی، نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین شکل سطر عبوری از این درایه، نشان‌دهنده‌ی اثر نرخ نفوذ بر سیستم است. مجموع تمام کدهای سطر با عنوان علت C و مجموع تمام کدهای ستون به عنوان اثر E برای هر پارامتر محاسبه شده است. ماتریس اندرکنش میانگین در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱: ماتریس اندرکنش میانگین

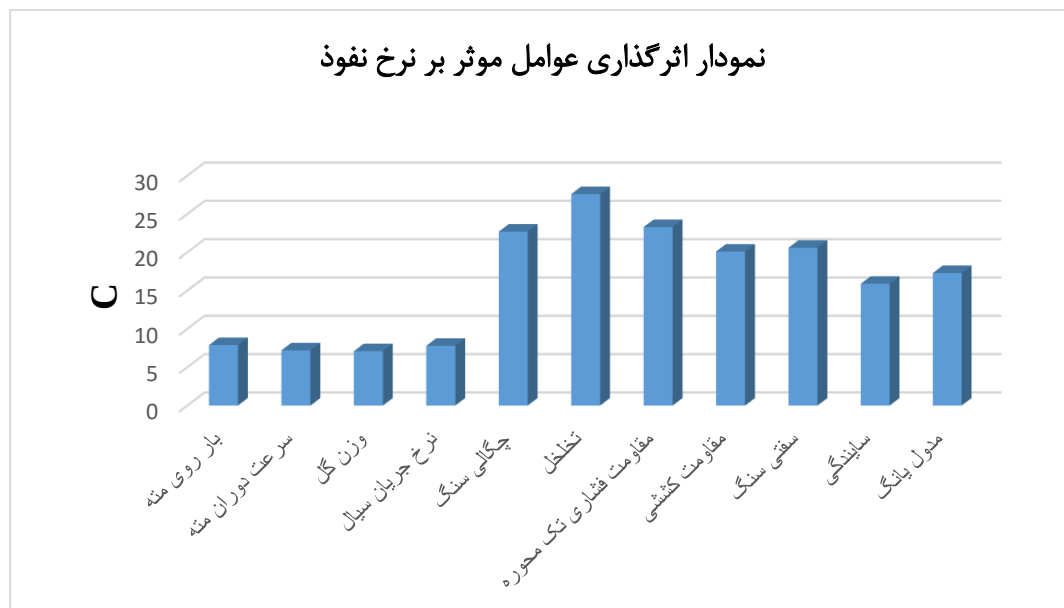
	ΣC												
	P1	2.2	0.3	0	0	0	0	0	0	1.3	0.3	3.8	7.9
	1.3	P2	0.2	0.3	0	0	0	0	0	1.5	0	3.9	7.2
	1.6	1.1	P3	2.3	0	0	0	0	0	0	0	2.1	7.1
	1.2	1.4	1.3	P4	0	0.2	0.1	0.1	0	0.6	0	2.9	7.8
	1.9	2.2	1.5	1.4	P5	2.1	2.1	2.3	2.2	1.8	2.4	2.8	22.7
	2.1	2.3	1.3	2	3.1	P6	3.3	3	2.4	1.9	2.8	3.4	27.6
	2.6	2	0.8	1.3	1.8	1.3	P7	3.3	2.4	2	2.5	3.3	23.3
	2.2	2.1	0.7	0.5	1.4	1.2	3.1	P8	2	1.8	2	3.1	20.1
	1.7	2.6	0.5	0.3	1.2	1.1	2.2	2.3	P9	3.1	2.1	3.4	20.6
	1.5	2.6	0.7	0.5	0.8	0.8	1.4	1.2	2.1	P10	1.1	3.2	15.9
	2	2.1	0.3	0.9	1.3	1.6	2	1.7	1.5	1.1	P11	2.8	17.3
	1.1	0.9	0.6	0.8	0	0	0	0	0	0	0	P12	3.4
ΣE	19.2	21.5	8.2	10.3	9.6	8.3	14.2	13.9	12.6	15.1	13.3	34.7	
P1: بار روی مته؛ P2: سرعت دوران مته؛ P3: وزن گل؛ P4: نرخ جریان سیال؛ P5: چگالی سنگ؛ P6: تخلخل؛ P7: مقاومت فشاری تک‌محوره؛ P8: مقاومت کششی؛ P9: سفتی سنگ؛ P10: ساینده‌گی سنگ؛ P11: مدول یانگ؛ P12: نرخ نفوذ C: Cause, E: Effect													
عوامل عملیاتی					عوامل ژئومکانیکی						نرخ نفوذ		

۴-۲-۳- شدت اندرکنش^۱

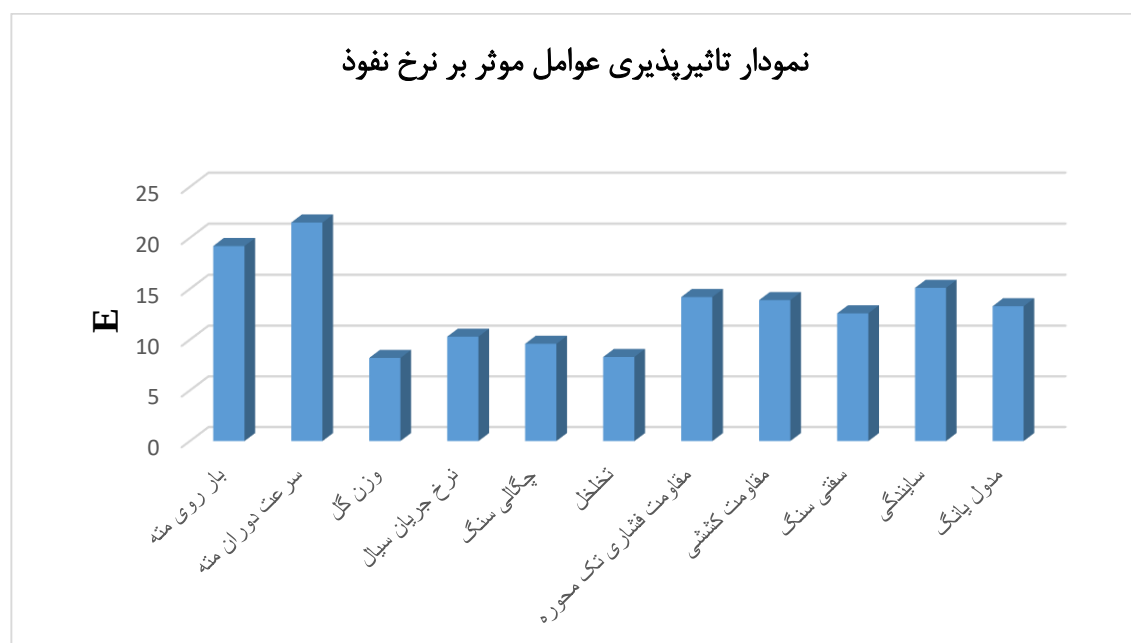
همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد از ماتریس اندرکنش اطلاعات زیادی از جمله میزان اثرگذاری، اثرپذیری و میزان مشارکت (شدت اندرکنش) هر عامل در مساله به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود اثرگذاری تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوره بر مساله مورد نظر

1- Intraction Intensity

(نرخ نفوذ) بسیار بالاتر از عوامل دیگر هستند؛ به عبارتی دیگر مهم‌ترین عواملی که باعث تغییرات نرخ نفوذ در حین حفاری می‌شوند این دو عامل خواهند بود. همین طور از شکل ۴-۲ برمی‌آید تاثیرپذیری سرعت دوران مته و بار روی مته از مساله مورد نظر از عوامل دیگر بالاتر بوده است. بدین معنا که برای بالا بردن نرخ نفوذ می‌بایست به این دو عامل توجه بیشتری داشت.

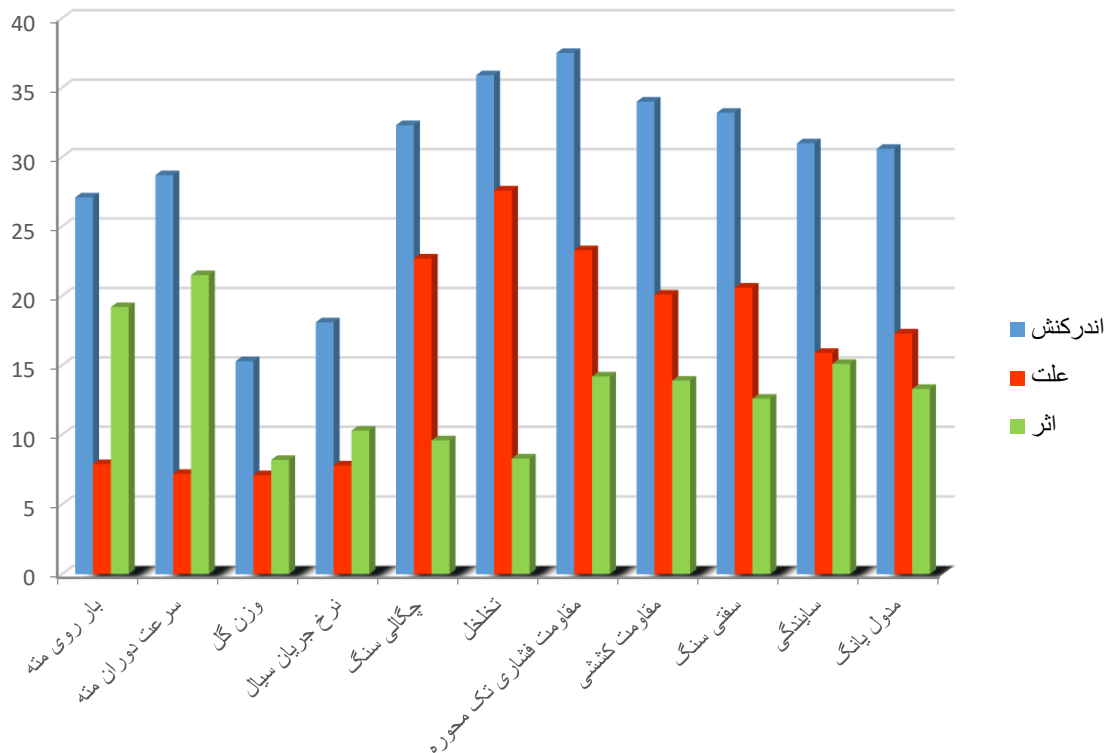


شکل ۴-۱: میزان اثرگذاری عوامل موثر بر نرخ نفوذ



شکل ۴-۲: میزان اثرپذیری عوامل موثر از نرخ نفوذ

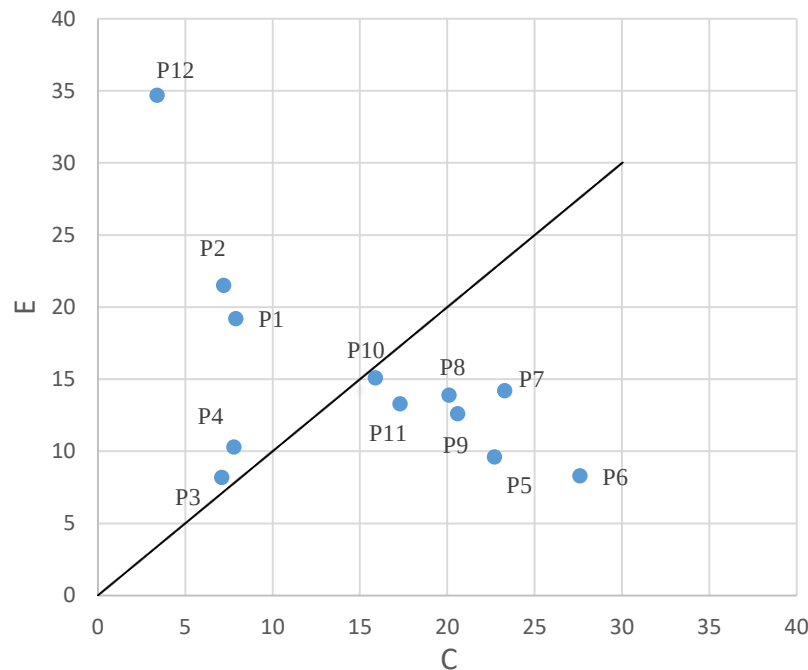
از مجموع اثرگذاری و اثرپذیری (C+E) یک عامل، شدت اندرکنش آن عامل بدست می‌آید که نشان‌دهنده میزان اهمیت آن عامل است. در شکل ۳-۴ مشاهده می‌گردد که شدت اندرکنش مقاومت فشاری تک محوره و تخلخل از بقیه عوامل بیشتر است. به طوری که تغییر اندک در آن‌ها تاثیر زیادی بر سیستم می‌گذارد.



شکل ۳-۴: شدت اندرکنش عوامل موثر بر نرخ نفوذ

نمودار علت-اثر نشان‌دهنده میزان غالب بودن یا مغلوب بودن یک عامل در سامانه است. خط $C=E$ تعیین‌کننده غالب بودن یا مغلوب بودن هر عامل است. همان طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است هر قدر یک عامل از خط $C=E$ به سمت محور علت (C) متمایل شود آن عامل غالب‌تر بوده و اثرگذاری بیشتری بر مساله دارد و مشابه همین رویه هر قدر یک عامل از خط $C=E$ به سمت محور اثر (E) متمایل شود مغلوب‌تر بوده و اثرپذیری بیشتری از مساله دارد. در نتیجه با توجه به شکل ۴-۴ می‌توان گفت علاوه بر نرخ نفوذ که کاملاً تحت اثر سیستم قرار دارد، عوامل ژئومکانیکی بیشترین اثرگذاری

و عوامل عملیاتی بیشترین تاثیرپذیری را از مساله دارند. جدول ۴-۲ خلاصه نتایج حاصل از نمودار علت-اثر عوامل را نشان می‌دهد.



P1: بار روی مته؛ P2: سرعت دوران مته؛ P3: وزن گل؛ P4: نرخ جریان سیال؛ P5: چگالی سنگ؛ P6: تخلخل؛ P7: مقاومت فشاری تک‌محوره؛ P8: مقاومت کششی؛ P9: سفتی سنگ؛ P10: ساینده‌گی سنگ؛ P11: مدول یانگ؛ P12: نرخ نفوذ

شکل ۴-۴: نمودار علت-اثر عوامل

جدول ۴-۲: تفسیر نمودار علت-اثر عوامل

عامل	توضیحات	مقدار C-E	مقدار C+E
P6 (تخلخل)	غالب‌ترین (بیش‌ترین مقدار C-E)	۱۹/۳	۳۵/۹
P12 (نرخ نفوذ)	مغلوب‌ترین (کم‌ترین مقدار C-E)	-۳۱/۳	۳۸/۱
P12 (نرخ نفوذ)	تعاملی‌ترین (بیش‌ترین مقدار C+E)	-۳۱/۳	۳۸/۱
P3 (وزن گل حفاری)	حداقل تعامل (کم‌ترین مقدار C+E)	۰/۸	۱۵/۳

۴-۲-۴- تعیین وزن عوامل تاثیرگذار بر مساله

شدت اندرکنش هر عامل در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، مجموع علت و اثر (C+E) آن عامل است. شدت اندرکنش هر عامل، بیانگر اهمیت عامل مذکور در سیستم مورد بررسی است. در نتیجه

مطابق رابطه ۴-۱، مقدار درصد شدت اندرکنش عوامل به عنوان ضریب وزن آن‌ها در مساله در نظر گرفته می‌شود (Mazzoccola, et al, 1996).

$$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum C_i + \sum E_i)} (\%) \quad (4-1)$$

در این رابطه C_i و E_i به ترتیب علت و اثر عامل i ام و i شمارنده عامل است. بدیهی است مقدار a_i عددی بین صفر تا یک خواهد بود. مقادیر علت، اثر و وزن هر عامل در جدول ۴-۳ آمده است.

جدول ۴-۳: خلاصه تحلیل اندرکنش عوامل

ردیف	عامل	علت عامل (C)	اثر عامل (E)	شدت اندرکنش (C+E)	وزن عامل (درصد)
۱	بار روی مته	۷/۹	۱۹/۲	۲۷/۱	۷/۴۹
۲	سرعت دوران مته	۷/۲	۲۱/۵	۲۸/۷	۷/۹۳
۳	وزن گل	۷/۱	۸/۲	۱۵/۳	۴/۲۳
۴	نرخ جریان سیال	۷/۸	۱۰/۳	۱۸/۱	۵/۰۰
۵	چگالی سنگ	۲۲/۷	۹/۶	۳۲/۳	۸/۹۳
۶	تخلخل	۲۷/۶	۸/۳	۳۵/۹	۹/۹۲
۷	مقاومت فشاری تک محوره	۲۳/۳	۱۴/۲	۳۷/۵	۱۰/۳۶
۸	مقاومت کششی	۲۰/۱	۱۳/۹	۳۴	۹/۴۰
۹	سفتی سنگ	۲۰/۶	۱۲/۶	۳۳/۲	۹/۱۸
۱۰	سایندگی سنگ	۱۵/۹	۱۵/۱	۳۱	۸/۵۷
۱۱	مدول یانگ	۱۷/۳	۱۳/۳	۳۰/۶	۸/۴۶
۱۲	نرخ نفوذ	۳/۴	۳۴/۷	۳۸/۱	۱۰/۵۳

۳-۴- برآورد شاخص نفوذ

پس از تعیین وزن هر یک از عوامل، به برآورد شاخص نفوذ (PI) برای چهار عمق مختلف چاه پرداخته می‌شود. شاخص نفوذ در هر عمق، نشان دهنده‌ی میزان نرخ نفوذ برای عمق مورد نظر است. به عبارتی هرچه شرایط برای حفاری در عمق مورد نظر مساعدتر باشد، مقدار شاخص نفوذ در آن عمق بیشتر خواهد بود. مقدار شاخص نفوذ برای هر عمق با استفاده از رابطه ۲-۴ محاسبه می‌گردد (Mazzoccola, et al., 1996).

$$PI = \sum_{i=1}^n a_i \frac{P_i}{P_{\max}} \quad (2-4)$$

α_i وزن عامل P_i مقدار (امتیاز) عامل i ام در آن عمق و $P_{\max}$ حداکثر مقداری است که یک عامل می‌تواند داشته باشد (عامل یک‌ه کردن^۱). برای مورد مطالعاتی مورد نظر، نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۴-۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق ۲۷۲۸ متر، بالاترین شاخص نفوذ و عمق ۳۵۷۴ متر پایین‌ترین شاخص نفوذ را به خود اختصاص داده‌اند.

به‌منظور مقایسه، در جدول ۴-۵ نتایج شاخص نفوذ بدست آمده از روش RES و نرخ نفوذ واقعی اندازه‌گیری شده در چاه موردنظر نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که پیش‌بینی‌های صورت گرفته به روش RES در عمق‌های ۲۷۲۸، ۳۱۱۳ و ۳۵۷۴ متر، کاملاً منطبق با مشاهدات میدانی هستند. اما با مقایسه صورت گرفته در عمق ۳۳۷۱ متر، مشخص شد مقدار شاخص نفوذ بدست آمده با مقدار واقعی در این عمق دارای تفاوت اندکی است که می‌تواند به علت زاویه اصطکاک داخلی پایین سنگ در نتیجه پایین بودن مقاومت همه‌جانبه در عمق ۳۳۷۱ متر در میدان مورد نظر باشد. این موضوع نشان می‌دهد برای تخمین دقیق‌تر لازم است پارامترهای بیشتری از سنگ در نظر گرفته شوند. این امر مستلزم اطلاعات بیشتری است به طوری که بتوان تاثیر آن‌ها را در ماتریس اندرکنش لحاظ نمود. همچنین قابل

۱- برای اینکه شاخص نفوذ در تمام عمق‌ها عددی بین ۰ تا ۱۰۰ داشته باشد

ذکر است مقادیر شاخص نفوذ به‌دست آمده از روش RES، مقادیری نسبی هستند.

جدول ۴-۴: محاسبه شاخص نفوذ در عمق‌های مختلف چاه مورد نظر

عوامل شاخص‌ها	P _i	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
وزن عامل (%)	$a_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum C_i + \sum E_i)} (\%)$	۷/۴۹	۷/۹۳	۴/۲۳	۵/۰۰	۸/۹۳	۹/۹۲	۱۰/۳۶	۹/۴۰	۹/۱۸	۸/۵۷	۸/۴۶
امتیاز P _i	P _i	۱	۲	۳	۲	۲	۳	۳	۲	۳	۴	۴
	$\frac{P_i}{P_{Max}}$	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱
	$\alpha_i \times \frac{P_i}{P_{Max}}$	۱/۸۷	۳/۹۷	۳/۱۷	۲/۵۰	۴/۴۷	۷/۴۴	۷/۷۷	۴/۷۰	۶/۸۹	۸/۵۷	۸/۴۶
شاخص نفوذ	$PI = \sum_{i=1}^{11} a_i \frac{P_i}{P_{max}}$	۵۹/۸۱						عمق ۲۷۲۸ متر				
امتیاز P _i	P _i	۱	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۳
	$\frac{P_i}{P_{Max}}$	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۷۵
	$\alpha_i \times \frac{P_i}{P_{Max}}$	۱/۸۷	۳/۹۷	۳/۱۷	۲/۵۰	۴/۴۷	۲/۴۸	۲/۵۸	۲/۳۵	۲/۲۸	۶/۴۳	۶/۳۵
شاخص نفوذ	$PI = \sum_{i=1}^{11} a_i \frac{P_i}{P_{max}}$	۳۸/۴۵						عمق ۳۱۱۳ متر				
امتیاز P _i	P _i	۲	۲	۳	۲	۱	۰	۲	۱	۲	۲	۲
	$\frac{P_i}{P_{Max}}$	۰/۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰	۰/۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
	$\alpha_i \times \frac{P_i}{P_{Max}}$	۳/۷۴	۳/۹۷	۳/۱۷	۲/۵۰	۲/۲۳	۰	۵/۱۸	۲/۳۵	۴/۵۹	۴/۲۹	۴/۲۳
شاخص نفوذ	$PI = \sum_{i=1}^{11} a_i \frac{P_i}{P_{max}}$	۳۶/۲۶						عمق ۳۳۷۱ متر				
امتیاز P _i	P _i	۱	۲	۳	۲	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۲
	$\frac{P_i}{P_{Max}}$	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰	۰/۲۵	۰	۰	۰/۲۵	۰/۵
	$\alpha_i \times \frac{P_i}{P_{Max}}$	۱/۸۷	۳/۹۷	۳/۱۷	۲/۵۰	۲/۲۳	۰	۲/۵۹	۰	۰	۲/۱۴	۴/۲۳
شاخص نفوذ	$PI = \sum_{i=1}^{11} a_i \frac{P_i}{P_{max}}$	۲۲/۷۰						عمق ۳۵۷۴ متر				

جدول ۴-۵: ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص PI

عمق (متر)	مقدار PI محاسبه شده	نرخ نفوذ واقعی (متر بر ساعت)
۲۷۲۸	۵۹/۸۱	۸/۵۲
۳۱۱۳	۳۸/۴۵	۶/۲۲
۳۳۷۱	۳۶/۲۶	۶/۴۶
۳۵۷۴	۲۲/۷۰	۳/۷۲

۴-۴- جمع‌بندی

جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ شناسایی عوامل موثر در حفاری ضروری است. در مطالعه پیش رو جهت برآورد شاخص نفوذ، عوامل موثر به دو دسته عوامل عملیاتی و ژئومکانیکی تقسیم‌بندی شدند. در ابتدا ماتریس اندرکنش میانگین مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و وزن عوامل موثر بر نرخ نفوذ محاسبه شد و سپس شاخص نفوذ به روش سیستم مهندسی سنگ برای چهار عمق محاسبه گردید. بر این اساس عمق‌های ۲۷۲۸ و ۳۵۷۴ متر به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین شاخص نفوذ هستند. در انتها مقادیر شاخص نفوذ به‌دست آمده از روش RES با مقادیر نرخ نفوذ واقعی در چهار عمق مختلف چاه موردنظر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که به جز در یک مورد، پیش‌بینی‌های PI به طور کامل منطبق با مشاهدات میدانی هستند، که قابلیت روش پیشنهادی را تایید می‌کند.

در فصل بعد به جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

تاکنون تحقیقات فراوانی روی تاثیر عوامل عملیاتی بر روی نرخ نفوذ انجام شده است اما همواره عدم توجه کافی به تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ در این تحقیقات احساس شده است. با توجه به اهمیت فراوان نرخ نفوذ در صنعت حفاری، در این تحقیق سعی بر شناخت تأثیر عوامل مؤثر بر روی نرخ نفوذ حفاری با نگاهی ویژه بر خصوصیات ژئومکانیکی شده است. مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای این پژوهش یکی از چاه‌های میدان آزادگان است. سپس شاخص نفوذ در چهار عمق چاه مورد نظر به صورت جداگانه محاسبه گردید.

نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر است:

- در این پژوهش ۱۱ عامل مؤثر بر نرخ نفوذ مورد ارزیابی قرار گرفته است. وزن این عوامل به صورت کلی محاسبه گردیده و مختص به پژوهش حاضر نیست. بنابراین در موارد مشابه نیز می‌توان از نتایج این پژوهش استفاده کرد.
- در بین عوامل مؤثر بر نرخ نفوذ تخلخل و وزن گل حفاری به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیرگذاری را بر نرخ نفوذ دارند. با توجه به متخلخل بودن محیط و تأثیرگذاری بالا بر سایر خصوصیات سنگ تخلخل عامل بسیار مهمی در این چاه شناخته شد. همچنین عامل سرعت دوران مته و وزن گل حفاری به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیرپذیری را از مساله دارند. در نتیجه با کنترل عامل سرعت دوران مته می‌توان تا حد زیادی به نرخ نفوذ مورد نظر در زمان حفاری رسید.
- عمق‌های ۲۷۲۸ و ۳۵۷۴ متر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص نفوذ را بدست آوردند. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش عمق، نرخ نفوذ کاهش یافته و با توجه به اینکه مقادیر عوامل عملیاتی در چهار عمق بررسی شده‌ی چاه مورد نظر دارای محدوده تغییرات اندکی بودند لذا تأثیر عوامل ژئومکانیکی بر نرخ نفوذ در اعماق زیاد بیشتر احساس

می شود.

- با توجه به عواملی که تاثیر بیشتری بر نرخ نفوذ دارند، می توان اقدام به کنترل عوامل عملیاتی در عمق های با نرخ نفوذ پایین نمود و شرایط ایده آل تر و مناسب تر با توجه به هزینه های زیاد حفاری چاه های نفت ایجاد نمود.

۵-۲- پیشنهادات

- به دلیل آسانی استفاده از نتایج روش سیستم های مهندسی سنگ، از نتایج آن می توان به آسانی در دفاتر طراحی، دفاتر حفاری و حتی برای غیر متخصصین استفاده نمود.
- پیشنهاد می شود برای اعتبارسنجی روش پیشنهاد شده در این تحقیق، حداقل ۲ عمق با روش هایی مانند روش عددی بررسی شود، بهتر است این اعتبار سنجی برای عمق ها با شاخص نفوذ بالا و پایین صورت پذیرد.

پیوست

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود

وزن روی مته	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4
0	سرعت دوران مته	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4
2	0	وزن گل	2	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	نرخ جریان سیال	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	چگالی سنگ	1	1	1	2	1	2	2
0	1	0	0	2	تخلخل	2	2	2	1	2	1
0	1	0	0	0	0	مقاومت فشاری	2	2	2	1	2
0	1	0	0	0	0	2	مقاومت کششی	2	2	1	2
0	2	0	0	1	0	2	2	سفتی سنگ	2	2	2
0	2	0	0	0	0	0	0	1	سایندگی سنگ	0	1
0	1	0	0	0	0	2	2	2	0	مدول یانگ	2
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	نرخ نفوذ

منابع

- Allenby B.R. 1999. Industrial ecology-policy framework and implementation. Complex System and Risks, Costs and Benefits, Chapters 9 and 10, pp. 132-162.
- Anderiux, P., Hadjigeorgiou, J., 2008. The destressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined destress blast in an underground mine pillar. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45(3):407-421.
- Andrews.R, Hareland.G,R.Nygaard, Engler.T,Munro.H,CNRL and Virginillo.B, CNRL, 2007. Methods of Using Logs to Quantify Drillability. Presentation at the 2007SPE Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium. Denver, Colorado.
- 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.
- Akgun, F., 2002. How to Estimate the Maximum Achievable Drilling Rate without Jeopardizing Safety. Abu Dhabi Inter.Pet.Exh.And Conf SPE.SPE 78567.
- Avila, R., Moberg, L., 1999. A systematic approach to the migration of ^{137}Cs in forest ecosystems using interaction matrices. Environmental Radioactivity 45:271-282.
- Benardos, A., & Kaliampakos, D., 2004. A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling- Illustrated by the Athens Metro, Greece. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(6):987-999.
- Bataee. M, Mohseni. S.,2011. Application of Artificial Intelligent System in ROP Optimization a Case Study in Shadegan Oil Field. SPE Middle east unconventional gas conference and exhibition. Muscat,oman.
- Barrgan, R.V., Santos, O.I.A., 1997. Optimization of Multiple Bit Runs. SPE 37644. SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam.
- Bendz, D., Flyhammer, P., Hartlen, J., & Elert, M., 2005. Leaching from residues used in road constructions- a system analysis. s.l.:The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 5F, Springer Berlin: Heidelberg pp. 293-320.
- Bezminabadi, S.N., Ramezanzadeh, A., Jalali, S.M.E., Tokhmchi, 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.

Bielstein. W.J, and Gexirge E. Cannon, 1950. Factors Affecting the Rate of Penetration of Rock Bits. Presented by George E. Cannon at the spring meeting, Southwestern District Division of Product. Dallas.

Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley and Sons.

Bourgoyne, A.T., Jr. and Young, F.S., Jr, 1973. A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. SPE-AIME Sixth Conference in Drilling and Rock Mechanics. TX: Austin.

Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. and Young, F.S., 1986. Applied drilling engineering. SPE Text book Series, Richardson TX.

Budetta, P., Santo, A., Vivenzio, F., 2008. Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. pp. 340-352..

Castaldini D., Genevois R., Panizza M., Puccinelli A., Berti M., Simoni A. 1998. An Integrated Approach for Analyzing Earthquake-induced Surface Effects: A Case Study from the Northern Apennines, Italy. pp. 413-441.

Cerchar, 1973. Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks, Centre Study Research, French Coal Industry, Document 73-59: 1-10.

Ceryan, N., Ceryan, S., 2008. An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey). Bulletin of Engineering Geology and the Environment 67(3):375-385.

Condor, J., Asghari, K., 2009. An Alternative Theoretical Methodology for Monitoring the Risks of CO₂ Leakage from Wellbores 1:2599-2605.

De Pippo T., Donadio C., Pennetta M., Petrosino C., Terlizzi F., Valente A. 2008. Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. Geomorphology 97:451-466.

Den, J., 1982, Control problem of grey system. System and Control Letters 1(15): 228-294.

Devereux, S., 1999. Drilling Technology in Nontechnical Language. Penn Well Publishing Company.

Demeng Che, Peidong Han, Ping Guo, Kornel Ehmann, Department of Mechanical Engineering, 2012. Issues in Polycrystalline Diamond Compact Cutter-Rock Interaction From a Metal Machining Point of view Part II Bit Performance and Rock Cutting Mechanics. Journal of Manufacturing Science and Engineering.

Eckel, J.R, 1968. Microbit Studies of Effect of Fluid Properties and Hydraulics on Drilling Rate. Conference of Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Houston, Tx:SPE.

Ersoy,A & Waller,M,D, 1995a. Textural characterization of Rocks. Engineering Geology39(3-4):123-136.

Fasheoum,M, 1997. Investigation if drilling Parameters Indicators. PhD Thesis, The University of Nottingham Department of Mineral Recourse Engineering.

Ferentinou, M., & Sakellariou, M., n.d.2007. Computational intelligence tools for the prediction of slope performance. Computers & Geosciences Journal pp. 166-174.

Ferentinou, M., Hasiotis, T., 2011. Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece. Computers & Geosciences Journal.

Frough, O., & Torabi,. 2013. An Application of Rock Engineering Systems for Estimating TBM Downtimes. 157: 112-123.

Galle. E.M, and Woods. H.B.1963. Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. API Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute.

Garnier. N.H, and Lingen. A.J.1959. Phenomena Affecting Drilling Rates at Depth. Annual Fall Meeting of SPE. Houston,TX:SPE 1097-G,232-239.

Gordon R,,2001. Thermal Spray Coatings. <http://gordonengland.co.uk/>.

Gstalder.S, Raynal.J.,1996. Measurment of some mechanical properties of rocks and their relationship to rock drillability. Petroleum transactions. SPE-1463-PA.

Graham. N.L, and Muench. J.W.1959. Analytical Determination of Optimum Bit Weight and Rotary Speed Combinations. Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers.

Dallas,TX:SPE 1349-G.

Hai Ma, Beiyi Road, Dongying, Shandong., 2011. Formation Drillability Prediction Based on Multi-source Information Fusion. Journal of Petroleum Science and Engineering 21 (7055), :431-443.

Hankins, D., Salehi, S., Karbalaei Saleh, F., 2015. An Integrated Approach for Drilling Optimization Using Advanced Drilling Optimizer. J, Pet. Eng.

Hareland.G,and L,L,Hoberock,1993, Use of Drilling parameters To Predict In-situ Stress Bounds. "SPE/IADC drilling conference,Amesterdam.

Hill J.D., Warfield J,N, 1972. Unifield program planning. In: Sage A,P. (ed.) System Engineering: Methodology and Applications, IEEE Press, New York, NY.

Hoseinie. S.H., Aghababaei. H.,Pourrahimian. Y., 2008. Development of a New Classification System for Assessing of Rock Mass Drillability Index(Rdi). International journal of Rock Mechanics and mining science,1-10.

Hudson, J., 1992. Rock Engineering Systems,Theory and Practice.Ellis Horwood Ltd,Chichester, 185 p.

Hudson, J. & Harrison, J., 1992. A new approach to studying complete rock engineering problems. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 25(2), 93-105.

Hughes.B., 2009. Drillability of a Rock in Terms of its Physico-Mechanical and Micro-Structural Properties. American Rock Mechanics Association., Asheville 2009, the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Asheville.

Jiao Y.1995. Formalizing the systems approach to rock engineering.PhD Thesis, Imperial College, University of London, 326 p.

Jiao, Y., Hudson, J., 1995. The fully-coupled model for rock engineering systems. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 32(5):491-512.

Jimeno, C.L., Jimeno, E.L. and Carcedo, F.J.A. 1995. Drilling and Blasting of Rocks. Geo-Mining Technological Institute of Spain, 345-351.

Karanam U.M.R. and Misra B.,1998.Principles of Rock Drilling. A.A.Balkema.

Kahraman, S., 2003. Performance Analysis of Drilling Machines Using Rock Modulus

Ratio. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.

Kahraman, S, Balci, C, Yazici, S,& Bilgin., 2000. Prediction of the Penetration Rate of Rotary Blast Hole Drilling Using a New Drillability Index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Latham, J.. & Lu, P., 1999. Development of an assessment system for the blastability of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36:41-55.

Lu, P.,& Latham, J. P., 1994. A continuous quantitative coding approach to the interaction matrix in rock engineering system based on grey systems approaches. In Proceedings of 7th international congress of the IAEG, Lisbon, Portugal (pp. 4761-4770).

Lummus, J.L., 1970. Drilling Optimization. Journal of Petroleum Technology:1379-1389.

Mavroulidou, M., Hughes, S.. & Hellawell, E., 2005. The development of a GIS-based tool for urban air quality assessment. In: Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece 6 p.

Maurer, W.C.,1962. The Perfect-cleaning Theory of Rotary Drilling. Journal of Petroleum Technology.

Mazzoccola, D.F.,& Hudson, J. A. 1996. A-comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 29(1), 37-56.

Mensa-wilmot,G, Yosef Harjadi, Sheldon Langdon, Jay Gandeaux,chevron corp., 2010. Drilling Efficiency and Rate Penetration-definitions,Influence Factor,Relationship and Value.IADC/SPE drilling conference and exhibition.orleans,Louisiana,USA:SPE.

Moore, Preston L,1986. Drilling Practice Manual. Oklahoma USA: PEN well publishing company.

Nauroy. Jean-Francois. 2011.Geomechanics Applied to the Petroleum Industry. Business & Economics

Nguyen, J,P, 1996. Oil and Gas Field Development Techniques Drilling. Edition technip.

Onyia. E.C.,1988. Relationships Between Formation Strength, Drilling Strength,and Electric Log Properties. Journal of the Southern african Institute of Mining and Metallurgy.

Osanloo, M., Daryoush Kaveh Ahangaran, ASME, petroleum Division., 1994. Mathematical Model for Drilling Speed in Rock Penetration. ASME-PUBLICATIONS-PD.257-260.

Osguie, R.,2007. Rate of Penetration Estimaion Model for Directional and Horizontal Wells. PhD Thesis, schools of natural and applied science of middle east technical university.

Ozbayoglu, M.E., Omurlu, C., 2005. Minimization of Drilling Cost by Optimization of the Drilling Parameters. Turkey 15, Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of the International.

Prassl, Dipl-Ing. Wolfgang F,2001. Drilling Engineering. Master Of Petroleum Engineering,.

Rabia, H., 1991. Oil well Drilling Engineering :Principles and Practice. Graham & Trotman Kluwer Academic Publishers Group.

Rafiee, R., Ataei, M and KhalooKakaei,R.,jalali, S.M. E., and Sereshki, F., 2016. A Fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines. Neural Computing and Applications . 27,no.7:2083-2094.

Rahimzadeh.H, Mostofi. M, Hashemi.A and Salahshoor.K.,2010. Comparison of the Penetration Rate Models Using Field Data for One of the Gas Fields in Persian Gulf Area.CPS/SPE International oil & gas Conference and Exhibition , Beijing, China.

Ralf J. Plinninger, Georg Spaun and Kurosch Thuro.2002. Prediction Tool Wear Drill and Mlast. Tunnels & Tunnelling International Magazine, Technical Review – Drill Bit Wear.

Rapoport A. 1968. General system theory-essential concept and application. Abacus Press, Cambridg.

Rashidi, B., Hareland, G., Fazelizadeh, M. and Svirig, M. 2010. Comparative Study Using Rock Energy and Drilling Strength models. Presentatin at the 44th Us Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, UT.

Rao,K,U,M.,& Misra,B , 1998, Principles of Rock drilling, Rotterdam ; Balkema.

Rashidi,B.,Hareland,G.,2010, A Drilling Rate Model for Roller Cone bits and its Application. CPS/SPE Intrnational Oil & Gas Conference and Exhibition. Beijing, China.

Raymond ,David W.,2001. PDC Bits Demonstrat Benefit Over Conventional Hard-Rock Drill Bits. Geothermal Resources Council Transactions.

Robert P. Radtke, Richard Riedel, John Hanaway, 2006. Thermally Stable Polycrystalline Diamond Cutters for Drill Bits. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas.

Rozos D., Bathrellos G.D., Skillodimou H.D. 2011. Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece. Environmental Earth Sciences 63:49-63.

Rozos, D., Tsagaratos, P., Markantonis, K. & Skias, S., 2006. An application of rock engineering system (RES) method for ranking the instability potential of natural slopes in Achaia County, Greece.. s.l., University of Liege, Belgium S08-10.

Rozos D., Pyrgiotis L., Skias S., Tsagaratos P. 2008. An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory: An application in Karditsa County. Landslides 5(3):261-270.

Safe, Jose Gregorio salas, 2005. Drilling Optimization Using Drilling Simulator Software.PhD Thesis, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in Partial fulfillment of the requirements for the degree of master of Science.

Saffari, A., Sereshki, F., Ataei, M.. & Ghanbari, K., 2014. Applying Rock Engineering Systems (RES) approach to Evaluate and Classify the Coal Spontaneous Combustion Potential in Eastern Alborz Coal Mines. Min.& Geo-Eng., pp. 115-127.

Schlumberger,Catalog of, 2000. On the Cutting Edge.www.slb.com.

Schlumberger, 2001. www.slb.com.

Shang Y.J., Wang S.J., Li G.C., Yang Z.F. 2000. Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station, China. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37:839-853.

Shang Y., Park H.D., Yang Z. 2005. Engineering geological zonation using interaction matrix of geological factors: An example from one section of Sichuan-Tibet Highway Geosciences Journal 9(4):375-387.

Shin H.S., Kwon Y.C., Jung Y.S., Bae G.J., Kim Y.G. 2009. Methodology for quantitative

hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46:1072-1087.

Shirkavand, F., Hareland, G., 2009, "Rock Mechanical Modeling for an underbalanced Drilling Rate of Penetration Prediction." the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville, North Carolina.

Simmons, E.L. 1986. A Technique for Accurate Bit Programming and Drilling Performance Optimization. ADC/SPE Drilling Conference. Tx.

Singh J., Ramamurthy T., Rao J.V., 1989. Strength of rocks at depth. In Maury & Fourmaintraux eds. *Rock at great depth*. Rotterdam: A.A. Balkema. 37-44.

Skagius K., Wiborgh M., Strom A., Moren L. 1997. Performance assessment of the geosphere barrier of a deep geological repository for spent fuel- The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of features, events and processes. *Nuclear Engineering and Design* 176:155-162.

Spaar, J.R., and Ledgerwood, L.W., Hughes Christensen, and Hawey Goodman, Graff, R.L., and Moo, T.J., Chevron Petroleum Technology Co., 1995. Formation Compressive Strength Estimates for Predicting Drillability and PDC Bit Selection. SPE/IADC drilling conference. Amsterdam.

Speer, W., John. 1958. A Method for Determining Optimum Drilling Techniques. *Drilling and Production Practice*. New York: API, 25.

Sonny Irawan, adib Mahfuz abd Rahman and saleem Qadir Tunio, 2012. Optimization of Weight on Bit During Drilling Operation Based on Rate of Penetration Model. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*: 1690-1695

Terralog Technologies Inc, (USA), 2005. Fundamental Research on Percussion Drilling: Improved Rock Mechanics Analysis, Advanced Simulation Technology, and Fullscale Laboratory Investigations. Final Report Edited.

Thuro, K. 1997. Drillability Prediction-geological Influences in Hard Rock Drill and Blast Tunneling. *Geologische Rundschau*.

Thuro, K. 2002. Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau. *Munchner Geologie*, B18, I-XIV, 1-160.

Tommy M., Warren T.M. 1981. Drilling Model for Soft-Formation Bits. Society of

Petroleum Engineers ,SPE-8438-PA.

Tuna Eren, Mehmet Evren Ozbayoglu, 2010. Real-Time-Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition.Mumbai, India:SPE.

Van Dorp F., Egan M., Kessler J.H., Nilsson S., Pinedo P., Smith G., Torres, C. 1999. Biosphere modeling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVs II reference biospheres working group. Environmental Radioactivity 42:225-236.

Walker. B.H., Black. A.D, Littlea.T, Khodaverdian.M,Treeatek hc.1986. Roller-Bit Penetration Rate Response as a Function of Rock Properties and Well Depth. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana:SPE.

Warren, T.M. 1984. Penetration Rate of Roller-cone Bits. 59nd Annual Technical Conference and Exhibition. Houston,tx: SPE, 9-18.

Winters, W.J.,Warren, T.M. and Onyia,E.C.1987. Roller Bit Model With Rock Ductility and Cone Offset. 62nd Annual Technical and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. Dallas, TX:SPE.

www.vareloilandgas.com

www.moabbit.com

www.tpub.com, 2007.

Yang, F.S.,Jr. 1968. Computerized Drilling Control. Transactions of the society of petroleum engineers, houston.

Yang Y., Zhang Q. 1998. The application of artificial neural networks to rock engineering system (RES). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Zhang, L., Yang, Z., Liao, Q.. & Chen, J., 2004. An application of the rock engineering systems (RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa highway,China. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences pp 526-527

Zare Naghadehi, M., Jimenz, R., Khalokakaie, R.. & Jalali, S., 2013. A probilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. 118: 82-92.

منابع فارسی

- آقاباتی، ع. ۱۳۸۵. زمین شناسی ایران. تهران: انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.
- اصانلو، م.، ۱۳۸۶، روش های حفاری، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا.
- ثانی، بهرام علیزاده، سید حسن حسینی، احمد رضا گندمی، ۱۳۹۲. مطالعه نفت مخزن آزادگان در میدان نفتی آزادگان با استفاده از روش کروماتوگرافی گازی. ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز.
- ح، جدبای، ۱۳۹۱. گزارش مطالعات نمودار گیری گل چاه شماره ۵ میدان آزادگان. اداره کل زمین شناسی شرکت ملی حفاری ایران.
- زارع نقدهی، م. ۱۳۹۰. رساله دکتری، بهبود سیستم های مهندسی سنگ (RES) به منظور ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب های سنگی معادن روباز، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- عزیزی، و، معماریان، ح، خسروی، آ. ۱۳۸۷. روش بهینه انتخاب مته برای حفاری های نفت و گاز ایران. نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران: ۵۵۳-۵۶۴
- محبوبی، ا، سعدی راد، ف، موسوی حرمی، ر. ۱۳۹۳. چینه نگاری سکانسی سازند کژدمی در میدان نفتی آزادگان. مجله علمی پژوهشی پژوهش نفت: ۲۶-۳۳.
- نوروزی بزمین آبادی، س، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد؛ بررسی تأثیر پارامترهای مکانیکی سنگ مخزن بر روی نرخ نفوذ حفاری در یکی از میادین نفتی شرکت مهندسی توسعه نفت (متن). دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- وفاییان، م، ۱۳۸۷، خواص مهندسی سنگ ها، چاپ سوم: انتشارات ارکان اصفهان.

همایون، مطیعی، ۱۳۷۲. زمین شناسی ایران: چینه شناسی زاگرس. تهران: سازمان زمین شناسی کشور.

Abstarct

Drilling is an expensive and necessary operation for the exploration and exploitation of hydrocarbon materials. One of the most important goals in drilling operations is to achieve higher drilling speeds at lower costs along with maintaining safety. In drilling operations, the time and efficiency of operations are of great importance as factors directly related to drilling costs. One of the criteria for the efficiency of drilling operations is the rate of drill bit penetration. Estimating this parameter and knowing it when planning for a well drill can help to more accurately assess the drilling time and estimate its cost. Also, reasonable knowledge of the physical and mechanical properties of the rock and the proper selection of drilling operations parameters will greatly help to reduce the cost of drilling and production. In this study, to verify the parameters affecting the penetration Rate, first the scientific articles and papers were studied and the most important parameters were divided to two controllable factors (operational) and uncontrollable factors (environmental). Obtaining the model can achieve the relation between these parameters and penetration rate always has been specially important. However, mathematical model presented in this regard, mostly emphasis on controllable and operational parameters. The complexity of the bit and stone confrontation as well as the simultaneous influence of factors affecting the penetration rate have caused the usual methods to be completely unable to analyze and predict the penetration rate. The main reason for this can be attributed to the multiple factors affecting the penetration rate and, on the other hand, the interaction between these factors. To overcome this problem, the Rock Engineering Systems (RES) method has been used. In order to verify the parameters affecting the penetration Rate, from information One of the wells of Azadegan oilfield has been used. To this purpose, firstly, 11 parameters affecting the penetration rate have been identified. Secondly, Utilizing the rock engineering system (RES) method, Penetration index has been introduced. This index has been calculated for four different depths of the well. The results show that in the studied field, the depths of 2728 and 3574 m, have the highest and lowest penetration index, respectively. Also, Among the parameters affecting the penetration Rate, porosity was identified as the most effective factor in penetration rate.

Keywords:

Penetration rate, Operational parameters, Environmental parameters, Rock Engineering Systems (RES)



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Master of Science in Rock Mechanic Engineering

**Effect of Rock Geomechanical Parameters On oil wells Drilling
Rate of Penetration using Rock Engineering Systems
(RES)**

Hamidreza saeidi

Supervisors:

Dr. Seied Mohammad Esmail Jalali

Dr. Mehdi Norozi

Advisor:

Dr. Mehrdad Soleimani Monfared

January 2018