

## روش بهینه انتخاب مته برای حفاری های نفت و گاز ایران

وحید عزیزی<sup>۱</sup>، حسین معماریان<sup>۲\*</sup> و آرش خسروی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> آستاد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مکانیک سنگ - شرکت مهندسی و توسعه نفت

(تاریخ دریافت ۸۵/۶/۲۵، تاریخ دریافت اصلاح شده ۸۶/۷/۷، تاریخ تصویب ۸۷/۲/۱)

### چکیده

با وجود این که قیمت مته، ۲ تا ۳ درصد هزینه های تکمیل یک چاه را در بر می گیرد، بر ۷۵٪ هزینه های کلی حفاری، که شامل ۴۵٪ هزینه تکمیل یک چاه است، تاثیرگذار می باشد. از میان روش های رایج انتخاب مته، هزینه حفاری واحد طول، به دلیل بررسی مستقیم پارامترهای اقتصادی مرتبط با کارکرد مته، پذیرفته ترین روش می باشد. اما بررسی های انجام شده در یکی از میدانی گازی جنوب ایران، نشان داد که نتایج این روش به دلیل عدم توانایی در ارزیابی مته های مورد استفاده در شرایط متفاوت حفاری، زمین شناسی و ژئومکانیکی، به تنهایی امکان مقایسه مته های مختلف و انتخاب مته بهینه را فراهم نمی سازد. برای حل این مشکل روش هایی به عنوان مکمل این روش معرفی شده اند، که بررسی حاضر نشان داد که استفاده از عوامل ژئومکانیکی، مکمل آرمانی روش هزینه حفاری واحد طول برای شرایط ایران می باشد.

**واژه های کلیدی:** انتخاب مته - عوامل ژئومکانیکی - روش انرژی ویژه - روش هزینه حفاری واحد طول - مقاومت فشاری تک محوره - روش مقاومت حفاری - ایران

### مقدمه

مجدد قرار گرفت، به شدت محدود شده و کمتر به تنهایی مورد استفاده قرار می گیرد. برای حل مشکلات موجود در روش هزینه حفاری واحد طول، روش هایی به عنوان مکمل این روش معرفی گردیده اند، که از میان آنها روش های انرژی ویژه و ارزیابی پارامترهای زمین شناسی و ژئومکانیکی از مقبولیت و کارایی اجرایی بیشتری برخوردار می باشند. این دو روش نیز در این تحقیق در میدان مورد اشاره، مورد بررسی قرار گرفتند.

ساختمان تاقدیسی میدان مورد بررسی، در جنوب ایران و در ناحیه فارس ساحلی واقع شده و شرقی ترین قله از طاقدیس بزرگ عسلویه را تشکیل می دهد. در این طاقدیس مخازن اصلی حاوی هیدروکربور در سازندهای کنگان و دالان بالایی قرار داشته و همچنین لایه های کربناته بخش زیرین سازند تبخیری دشتک و بخش تبخیری نار از سازند دالان نیز حاوی مقادیری گاز می باشند [۱]. ستون سازندهای حفاری شده در این میدان و ضخامت آن ها در جدول (۱) ارائه شده است.

مته اصلی ترین ابزار مورد استفاده مهندس حفار بوده و انتخاب بهترین مته و شرایط حفاری متناظر با آن، یکی از اساسی ترین مشکلاتی است که حفاران با آن مواجه می باشند. انتخاب مته مناسب در گذشته، و قبل از تولید مته هایی با طراحی های جدید و ابتکاری و بهبود طراحی مته های پیشین، فرآیندی نسبتاً ساده بود. هر چند تنوع مته ها در حال حاضر بسیار بیشتر و روند انتخاب مته بهینه پیچیده تر گردیده، اما در کنار آن، روش های جدیدی نیز، برای انتخاب مته مناسب، ابداع شده است.

انتخاب مته مناسب برای شرایط حفاری خاص، نیازمند ارزیابی عوامل مؤثر متعدد می باشد. البته اگر تمامی عواملی را که در انتخاب مته تأثیر گذارند، مورد بررسی قرار گیرد، انتخاب مته بسیار پیچیده خواهد شد. بنابر این هر یک از روش های انتخاب مته، تنها عوامل محدودی را مورد ارزیابی قرار می دهند.

در حال حاضر پذیرفته ترین روش انتخاب مته، استفاده از هزینه حفاری واحد طول می باشد. اما کارایی این روش به دلیل معایبی که در تحقیق انجام شده در یکی از میدانی نفت و گاز ایران، مورد ارزیابی و تأکید

## جدول ۱: سازندهای حفاری شده و ضخامت آنها در میدان

مورد بررسی.

سازند	ضخامت (متر)	سازند	ضخامت (متر)
گچساران	۳۳-۱۷۲	گدوان	۶۴-۷۰
آسماری-چهرم	۴۷۹-۵۱۹	فهلپان	۱۶۰-۱۷۳
پابده	۴۱-۸۲	هیث	۴۱-۶۴
گورپی	۵۹-۸۳	سورمه	۶۶۴-۷۲۳
ایلام	۵۷-۶۴	نیریز	۲۳-۴۶
لافان	۳۵-۴۰	دشتک	۵۵-۵۸۷
سروک	۵۲-۵۹	کنگان	۱۷۰-۱۸۰
کزدمی	۴۶-۵۲	دالان	۳۱-۲۸۱
داریان	۱۰۷-۱۱۵		

## روش هزینه حفاری واحد طول

در بیشتر مواقع، کاهش هزینه‌های چاه همراه با افزایش نرخ نفوذ بوده اما با توجه به شرایط کنونی بازار، مجریان و پیمانکارانی موفق می‌باشند که تا حد امکان اقتصادی‌تر عمل می‌نمایند. عوامل حفاری نبایستی فقط براساس افزایش نرخ نفوذ، تعیین شوند در عوض تصمیم‌گیری‌ها باید بر روی کاهش هزینه حفاری واحد طول، متمرکز شود. با طراحی یک برنامه انتخاب مته، براساس هزینه حفاری واحد طول، عوامل اقتصادی مانند هزینه دکل، قیمت مته و نرخ نفوذ برای دستیابی به کمترین هزینه حفاری واحد طول، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۲].

هزینه حفاری بازه حفر شده از یک چاه، در یک راندن مته، مجموع قیمت مته، هزینه تعویض مته و هزینه عملیاتی دکل حفاری برای مدت زمان حفاری آن بازه می‌باشد. اگر هزینه راندن مته بر طول حفاری شده تقسیم شود، هزینه حفاری واحد طول بازه حفاری شده به دست می‌آید. هزینه حفاری واحد طول یک مته معین، در صورت انتخاب صحیح وزن روی مته و سرعت دوران، حداقل خواهد بود [۳]. کل زمانی که برای حفاری بازه مورد نظر ( $\Delta D$ ) لازم است مجموع زمان حفاری ( $t_b$ )، زمان توقف مته ( $t_c$ ) و زمان بالا و پایین بردن رشته حفاری و تعویض مته ( $t_i$ ) می‌باشد. رابطه هزینه حفاری به صورت زیر ارائه شده است [۴]:

$$C_f = \frac{C_b + C_r(t_b + t_c + t_i)}{\Delta D} \quad (1)$$

که در آن  $C_f$  هزینه حفاری واحد طول،  $C_b$  قیمت مته و  $C_r$  هزینه‌های ثابت عملیاتی دکل حفاری در واحد زمان و مستقل از دیگر عوامل مورد ارزیابی می‌باشد.

متوسط زمان مورد نیاز برای بالا و پایین بردن رشته حفاری و تعویض مته برای اعماق مختلف چاه و اندازه‌های مختلف مته را می‌توان از جداول موجود استخراج نمود. به جای استفاده از جدول، در روش رایج دیگر، در نظر گرفتن مقدار یک ساعت به ازای هر ۱۰۰۰ فوت (۳۰۵ متر) عمق، می‌باشد [۳].

تا زمانی که تابع هزینه حفاری، عوامل ریسک حفاری را در نظر نمی‌گیرد، نتایج ارزیابی هزینه حفاری بایستی توسط قضاوت مهندسی اصلاح گردند. در صورتی که ریسک برخورد با مشکلات حفاری مانند گیر کردن لوله، انحراف چاه و غیره به طور چشمگیر افزایش یابند، کاهش هزینه راندن یک مته لزوماً باعث کاهش هزینه یک چاه نمی‌گردد [۴].

در بررسی حاضر، ابتدا حفاری‌های (راندن‌های) کوتاه مته، که معمولاً به دلایلی غیر از کارکرد نامناسب مته به پایان رسیده‌اند، حذف سپس هزینه حفاری واحد طول برای شش چاه فاز اول حفاری این میدان، شامل چاه‌های شماره ۳، ۶، ۸، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ محاسبه گردید. زمان رفت و برگشت و تعویض مته به منظور حذف خطاهای اندازه‌گیری و هم‌چنین جلوگیری از ورود عوامل غیر مرتبط با کارکرد مته، که در زمانهای ثبت شده در گزارش روزانه حفاری وجود دارد، به صورت تئوری و با در نظر گرفتن یک ساعت به ازای هر ۱۰۰۰ فوت عمق، محاسبه گردید. قیمت مته‌ها نیز از گزارش خرید مته‌های مورد استفاده برای چاه‌های این میدان، که مربوط به سال خرید آنها می‌باشد، استخراج و بر اساس هزینه روزانه دکل که ۱۸۰۰۰ دلار در روز بود، هزینه دکل معادل ۷۵۰ دلار در ساعت به دست آمد. نوع مته‌ها و عمق‌های شروع و خاتمه حفاری توسط آنها نیز از جداول رکورد مته‌های به کار گرفته شده در چاه‌های مختلف، استخراج و بر اساس این داده‌ها هزینه حفاری واحد طول در این شش چاه محاسبه گردید. پس از محاسبه هزینه حفاری واحد طول، مته‌های مورد استفاده در هر چاه به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عنوان مثال هزینه حفاری واحد طول برای مته‌های مورد استفاده و سازند‌های حفاری شده در چاه شماره ۱۴ در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

نکته قابل توجه در حفاری چاه شماره ۱۴، استفاده از مته‌های با کد یکسان در سازندهای مختلف و

.....

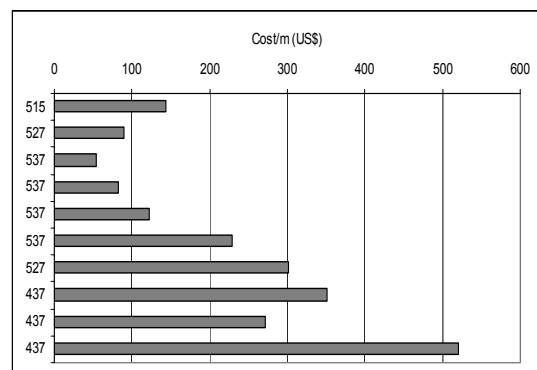
با توجه به آنچه که در مورد عمل کرده ها در این شش چاه به دست آمد، مشخص گردید که بررسی مته های مورد استفاده در یک چاه، به تنهایی نمی تواند روشی مناسب برای ارزیابی مته های استفاده شده در یک میدان باشد زیرا در حفاری، مته در تقابل با سنگ متعلق به سازندی خاص قرار دارد. از آن جایی که از یک سو هر نوع مته دارای مشخصات طراحی و متالورژی خاص خود، که با کد مته بیان می شود، می باشد و از سوی دیگر، سازند نیز با مشخصات زمین شناسی و ژئومکانیکی، مشخص می گردد. بنابراین دو راه برای ارزیابی کارکرد مته های مورد استفاده بر اساس هزینه حفاری واحد طول وجود دارد که یکی مقایسه مته های با کدهای مشابه و دیگری مقایسه کارکرد مته های مورد استفاده در یک سازند یکسان در چاه های مختلف و در نهایت معرفی مته بهینه است.

در بررسی چاه های مختلف مشخص شد که مته های دارای کد یکسان، دارای هزینه حفاری واحد طول متفاوتی در سازندهای مختلف می باشند. این اختلاف گاه تا چندین برابر هزینه حفاری واحد طول می رسد. بنابر این می توان نتیجه گرفت که عوامل زمین شناسی و ژئومکانیکی، که در اغلب بررسی های کارکرد مته نادیده گرفته می شوند، دارای تأثیر قابل توجهی بر عمل کرد حفاری می باشند. به طور خلاصه می توان گفت که اوج کارایی انتخاب مته بر اساس هزینه حفاری واحد طول، انتخاب بهینه مته ای می باشد که کمترین هزینه حفاری را در سازندی با مشخصات زمین شناسی و ژئومکانیکی خاص، ارائه نماید.

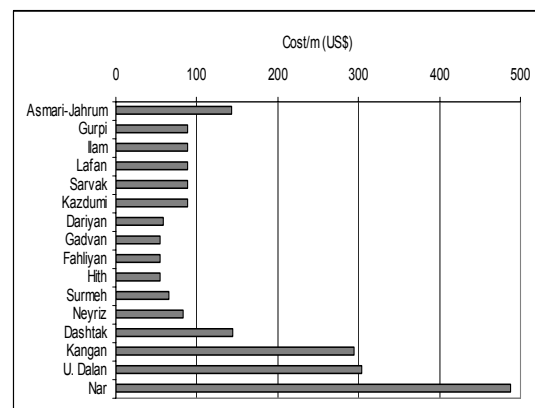
در این بررسی هزینه حفاری واحد طول سازندهای مختلف حفاری شده در شش چاه، مورد ارزیابی قرار گرفته اند که با مقایسه و ارزیابی هزینه حفاری واحد طول سازندهای چاه های مختلف، مته بهینه، یعنی مته ای که با کمترین هزینه در آن سازند حفاری می کند، معرفی شده است. به جزء سازندهای میشان و بخش نار از سازند دالان که فقط به ترتیب در چاه های ۱۵ و ۱۴ حفاری شده اند، بقیه سازندها در تمامی چاه ها حفاری گردیده اند و در نتیجه برای هر سازند حداقل شش هزینه حفاری واحد طول توسط مته های مختلف وجود دارد. در ادامه، به عنوان مثال هزینه حفاری واحد طول سازند دشتک ارائه می شود.

با هزینه حفاری واحد طول متفاوت می باشد (شکل ۱). گروه از مته ها که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند، مته های ۴۳۷ و ۵۳۷ می باشند. مته های ۴۳۷ در سازندهای کنگان، دالان و نار حفاری کرده اند و در سازند نار، که دارای سنگهای دولومیت با میان لایه های سنگ آهک و در برخی اعماق مقدار کمی میان لایه انیدریت می باشد، بیشترین هزینه حفاری واحد طول (۵۲۰/۶ دلار بر متر) را به دست داده اند. مته های ۵۳۷ نیز سازند های از داریان تا کنگان را حفاری کرده اند که بیشترین هزینه حفاری واحد طول آنها مربوط به سازند کنگان (۲۲۸ دلار بر متر)، گزارش شده است.

در چاه شماره ۱۴، پس از سازند گچساران که مانند دیگر چاه ها بیشترین هزینه حفاری واحد طول را دارا می باشد، بخش نار از سازند دالان بیشترین هزینه را به خود اختصاص داده است (شکل ۲) که یکی از دلایل آن عمق زیاد این سازند (۳۰۴۴ متر) و در نتیجه افزایش هزینه حفاری واحد طول با افزایش عمق می باشد.



شکل ۱: هزینه حفاری واحد طول مته های مورد استفاده در چاه شماره ۱۴ از میدان مورد بررسی.



شکل ۲: هزینه حفاری واحد طول سازندهای حفاری شده در چاه شماره ۱۴ از میدان مورد بررسی.

## سازند دشتک

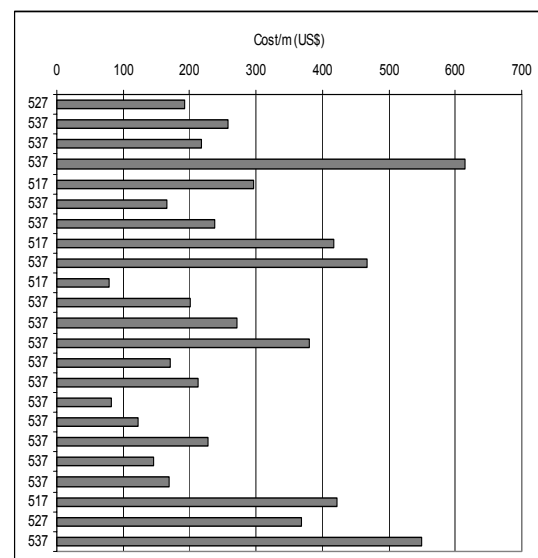
باتوجه به نتایج به دست آمده از محاسبه هزینه حفاری واحد طول برای تمامی سازندهای حفاری شده در این شش چاه می توان گفت که با وجود پتانسیل بالا و مقبولیت بسیار روش هزینه حفاری واحد طول، این روش به دلیل عدم وجود مبنای معتبر و یکسان برای ارزیابی و مقایسه مته های مختلف، نمی تواند به تنهایی در انتخاب مته، مورد استفاده قرار گیرد. یکی از راه های برطرف کردن این مشکل، ارزیابی مته های مورد استفاده در سازندهای یکسان و معرفی معیاری برای ارزیابی هزینه حفاری هر سازند به صورت جداگانه می باشد. اما این روش نیز به دلیل تغییرات بسیار خواص ژئومکانیکی در سازندی یکسان و تأثیر زیاد آن بر کارکرد مته، نمی تواند به تنهایی پاسخگوی مشکلات روش هزینه حفاری واحد طول باشد.

### روش انرژی ویژه

با توجه به مشکلات موجود در ارزیابی مته به روش هزینه حفاری واحد طول، به نظر می رسد روشی ساده و عملی که بتواند کارکرد یک مته را در هر بازه حفاری (یا هر سازند) اندازه گیری نماید، کمک بزرگی برای مهندس حفار باشد به طوری که نتایج آن بایستی قابلیت همبستگی با هزینه حفاری واحد طول را برای انتخاب مته، داشته باشد [۵]. لذا در این ارتباط و به عنوان روشی مکمل که بتواند به کمک روش هزینه حفاری واحد طول انتخاب بهینه مته را ممکن سازد، از روش انرژی ویژه استفاده می شود.

مفهوم انرژی ویژه (SE) در حفاری سنگ برای اولین بار توسط تیله [۶]، به عنوان شاخصی جهت اندازه گیری کارایی مکانیکی کارهای انجام شده بر روی سنگ، پیشنهاد گردید. انرژی ویژه به عنوان انرژی مورد نیاز برای حفر حجم واحد سنگ معرفی می شود که این مفهوم تاکنون به طور بسیار گسترده در مطالعات و کارهای انجام شده بر روی سنگ، هم به عنوان شاخص کارایی و هم به عنوان مقیاس قابلیت حفاری، مورد استفاده قرار گرفته است. برای حفاری حجم مشخصی از سنگ یک حداقل انرژی، که به طور تئوری قابل محاسبه می باشد، مورد نیاز است که این مقدار کاملاً وابسته به طبیعت و ویژگی های سنگ می باشد و عملاً مقدار آن در طی حفاری این حجم سنگ برابر و یا بیشتر از حداقل آن برآورده خواهد بود.

سازند دشتک با حفاری توسط ۲۴ مته در شش چاه، بیشترین مصرف مته را در حالی به خود اختصاص داده است که ضخیم ترین سازند این میدان، یعنی سازند سورمه ۱۵ مته برای حفاری آن، مصرف شده است. ضخامت سازند دشتک ۵۵۰ تا ۵۸۷ متر می باشد که از تناوب سنگ های تبخیری انیدریت، دولومیت، سنگ آهک و شیل تشکیل شده است. سازند دشتک دارای بیشترین تغییرات در خواص زمین شناسی، نسبت به سازندهای حفاری شده دیگر می باشد. این سازند از پایین به بالا به چهار عضو A, B, C و D تقسیم می گردد، که عضو D، به علت دگر شیبی منطقه ای، در میدان مورد بررسی، حذف شده است. کلیه مته های مورد استفاده در این سازند، از نوع دکمه ای می باشند. با این وجود به علت تغییرات گسترده خواص زمین شناسی و ژئومکانیکی در این سازند، هزینه حفاری واحد طول بسیار متغیری، حتی برای مته های یکسان، به دست می آید. به عنوان مثال یک مته ۵۳۷ در چاه ۱۴ و در سازند دشتک دارای هزینه حفاری واحد طولی برابر ۸۳ دلار می باشد در حالی که مته دیگری با همین کد و در همین سازند در چاه شماره ۳، هزینه حفاری واحد طول ۶۱۵ دلار را به دست داده است (شکل ۳). این اختلاف نشان دهنده تأثیر عوامل دیگر، هم چون تغییرات خواص ژئومکانیکی، علاوه بر عوامل زمین شناسی، بر هزینه حفاری واحد طول می باشد.



شکل ۳: هزینه حفاری واحد طول مته های مورد استفاده در سازند دشتک در شش چاه مورد بررسی.

نرخ نفوذ R، تحت شرایط هیدرولیک بهینه، می‌گردد که این افزایش، تعادل رابطه (۴) را حفظ خواهد نمود. از آن جایی که نرخ نفوذ به شدت تحت تأثیر تغییرات WN می‌باشد و برای یک مته معین، مقادیر بسیاری برای نرخ نفوذ، در هر ترکیب ممکن از مقادیر WN به دست می‌آید، هنگامی که انرژی ویژه با نرخ نفوذ مقایسه می‌شود، حساسیت کمتر آن به تغییرات WN، آن را به ابزاری مناسب برای انتخاب مته مبدل می‌سازد. از طرفی انرژی ویژه، اندازه‌گیری مستقیمی از کارکرد مته در سازندی مشخص بوده و شاخصی را برای ارزیابی اثر متقابل مته و سنگ فراهم می‌نماید [۸].

در صورتی که انرژی ویژه به طور صحیح در بررسی کارکرد مته استفاده شود، می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب در انتخاب مته مورد استفاده قرار گیرد. از آن جایی که حفاری بهینه با مقدار پایین انرژی ویژه شناخته می‌شود. در نتیجه، مته‌هایی که کمترین مقدار انرژی ویژه را برای سنگ معلوم تولید نمایند، در شرایط برابر، مته مناسب برای استفاده‌های بعدی در همان سازند به حساب می‌آیند [۷].

#### محاسبه انرژی ویژه در چاه‌های مورد بررسی

هر چند روش انرژی ویژه عوامل زمین‌شناسی و ژئومکانیکی را به طور مستقیم بررسی نمی‌کند، اما با در نظر گرفتن عوامل و مشخصه‌های عملیاتی حفاری، هم چون نرخ نفوذ و گشتاور، این پارامترها را به طور غیر مستقیم در فرآیند بررسی وارد می‌نماید. استفاده از انرژی ویژه به دو صورت ارزیابی هم‌زمان با حفاری مته (به منظور تعیین زمان تعویض مته) و ارزیابی پس از حفاری (به منظور ارزیابی کارکرد مته)، انجام می‌شود.

در بررسی حاضر انرژی ویژه حفاری که برای چاه‌های شماره ۸ و ۱۴، که در آنها نرخ نفوذ و گشتاور لحظه‌ای اندازه‌گیری شده است، محاسبه گردیده نشان می‌دهد که روش انرژی ویژه به شدت وابسته به تغییرات خواص زمین‌شناسی و ژئومکانیکی سازند می‌باشد. به عنوان مثال وابستگی انرژی ویژه به تغییرات سنگ‌شناسی در نمودار انرژی ویژه در برابر عمق مته ۱۷ از چاه ۸ در شکل (۴) نشان داده شده است که نشان دهنده افزایش انرژی ویژه (الف) در اثر افزایش میزان شیل (ب) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل پیداست، با افزایش میزان

تفاوت بین مقادیر تئوری و حقیقی، هم‌چنین تفاوت بین مقادیر حقیقی هنگام استفاده از ابزارهای مختلف حفاری، معرف وجود مقداری کار اضافی است. به عنوان مثال می‌توان از حفاری مجدد خرده‌های حفاری شده، غلبه بر اصطکاک و انرژی منتقل شده به سنگ‌های اطراف چاه و هم‌چنین گرم کردن سیال حفاری نام برد. به علاوه مقادیر انرژی ویژه برای ابزارهای مختلف، که سنگ یکسانی را حفاری کرده‌اند، می‌تواند به عنوان مقیاسی برای تعیین ابزاری با بیشترین کارایی در شرایط حفاری موجود، به کار رود [۵].

هم‌چنین می‌توان از انرژی ویژه به عنوان شاخصی برای نشان دادن تغییرات سنگ‌شناسی و تصحیح انتخاب مته براساس کارکرد حفاری، استفاده نمود. روش انرژی ویژه به تنهایی برای انتخاب مته به کار نمی‌رود بلکه به عنوان وسیله کمکی از طریق روش‌های دیگر، مانند بررسی رکورد مته‌های قبلی و هزینه حفاری واحد طول، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

در حفاری دورانی کار انجام شده را می‌توان به دو بخش کار انجام شده توسط نیروی محوری (وزن روی مته، W) و کار انجام شده توسط مؤلفه دورانی (گشتاور، T) تقسیم نمود. سرعت دوران N، سطح درگیر مته A و نرخ نفوذ R می‌باشد. بنابراین کل کار انجام شده توسط مته (W<sub>Total</sub>) با پیشروی به اندازه Y و با صرف نظر کردن از انرژی از دست رفته یا صرف کارهایی غیر از حفاری شده، می‌تواند به صورت رابطه (۲) نوشته شود:

$$W_{Total} = WY + 2\pi N \left( \frac{T}{R} \right) Y \quad (2)$$

با توجه به این که حجم سنگ کنده شده برابر AY خواهد بود، بنابراین انرژی ویژه (SE) برابر خواهد شد با:

$$SE = \frac{W}{A} + \frac{2\pi NT}{AR} \quad (3)$$

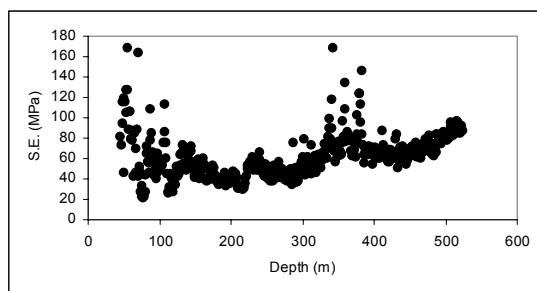
یا

$$SE = \frac{4WR + 8\pi NT}{\pi D^2 R} \quad (4)$$

به طوری که در آن D قطر مته می‌باشد. جداول انرژی ویژه به توسط رابطه فوق تهیه می‌شود [۵].

رابطه (۴) هم‌چنین نشان می‌دهد که، برای مته‌ای معین در سازندی با مقاومت مشخص، انرژی ویژه در هر ترکیبی از وزن روی مته و سرعت دوران، ثابت خواهد بود. زیرا افزایش WN معمولاً باعث افزایش مقدار

زمین شناسی و ژئومکانیکی نسبتاً پایدار و همچنین نیاز به اندازه گیری گشتاور در تمام طول چاه، نمی تواند به عنوان مکملی آرمانی برای هزینه حفاری واحد طول به کار رود.



شکل ۵: نمودار تغییرات انرژی ویژه در برابر عمق در سازند آسماری چهارم برای مته شماره ۲ از چاه ۱۴.

### روش قابلیت حفاری

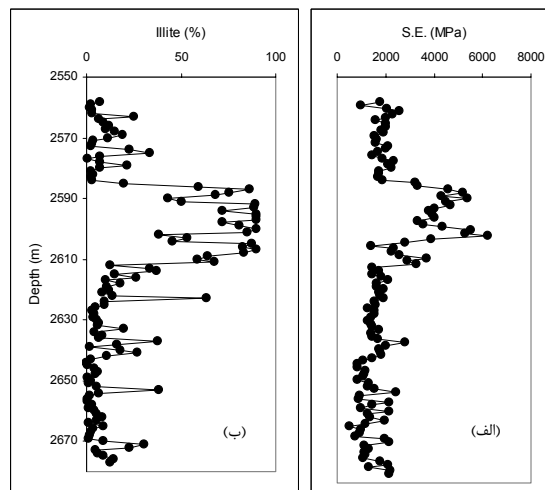
به دلیل مشکلات ذکر شده در روش های قبلی و به منظور بررسی اثر عوامل سازند در کارآیی مته، محققین روش هایی را برای کمی کردن اثر عوامل ژئومکانیکی در انتخاب و کارکرد مته ارائه داده اند. این روش ها می توانند به عنوان مکمل روش های دیگر انتخاب مته، هم چون روش هزینه حفاری واحد طول، به کار روند.

در مقیاس های بزرگ، قابلیت حفاری سازند (FD)، واکنش سازندی خاص را به حفاری توسط انواع مختلف مته، پیش بینی می نماید. این روش هم چنین برای بررسی اثر اصلاح نوع خاصی از مته بر روی حفاری یک سازند مشخص، مورد استفاده قرار می گیرد [۹].

مقاومت فشاری و قابلیت حفاری به صورت تجربی و از طریق انجام آزمایش، در اوایل دهه ۱۹۶۰ به یکدیگر مرتبط شدند. هر چند که مقاومت فشاری بایستی به عنوان یک تابع از میزان تنش جانبی توصیف شود، این مفهوم که مقاومت فشاری با افزایش تنش جانبی، افزایش می یابد به خوبی شناخته شده و به سادگی با معیار شکست موهر قابل توصیف می باشد [۱۰].

تلاش های زیادی که توسط وارن و همکاران [۱۱] و [۱۲] انجام شده نشان داد که مقاومت حفاری را می توان برای مته های مخروطی تعیین نمود و برای برخی کاربردها، هم چون شبیه سازی حفاری و انتخاب مته، مورد استفاده قرار داد. مقاومت حفاری می تواند به عنوان مقاومت در برابر نفوذ مته در حین حفاری، که تابعی از خواص سنگ می باشد، تعریف شود.

شیل، انرژی ویژه نیز افزایش یافته است. در نتیجه هنگام ارزیابی مته توسط روش انرژی ویژه بایستی تغییرات زمین شناسی را نیز لحاظ نمود زیرا که تغییرات ناگهانی مشخصه های زمین شناسی و ژئومکانیکی، به عنوان مثال در هنگام حفاری یک میان لایه با نرخ نفوذ کمتر، انرژی ویژه را به یکباره افزایش داده و پس از حفاری آن لایه به سطح قبلی خود باز می گردد. بنابر این با در نظر گرفتن این تغییرات از تعویض زودهنگام مته جلوگیری می شود.



شکل ۴: نمودارهای انرژی ویژه (الف) و درصد شیل (ب) در برابر عمق برای مته شماره ۱۷ از چاه ۸.

از دیگر مشکلات عمده ارزیابی کارآیی مته با روش انرژی ویژه، حساسیت بالای این روش به عوامل عملیاتی حفاری می باشد که منجر به تغییرات بسیار زیاد انرژی ویژه در بازه ای محدود می شود به طوری که در برخی مواقع ارزیابی مته را با این روش، ناممکن می سازد. به عنوان مثال نمودار تغییرات انرژی ویژه در برابر عمق در سازند آسماری - چهارم برای مته شماره ۲ از چاه ۱۴ در شکل (۵) نشان می دهد، که در آن انرژی ویژه در یک سازند با مشخصات زمین شناسی و ژئومکانیکی مشابه به دلیل تغییر پارامترهای عملیاتی حفاری دارای تغییرات وسیعی می باشد.

برای مته های مورد استفاده در دو چاه شماره ۸ و ۱۴ میدان مورد بررسی، حداقل، حداکثر و متوسط انرژی ویژه مصرف شده در هر سازند محاسبه و با نتایج هزینه حفاری واحد طول مقایسه گردید. به طور خلاصه می توان گفت که انرژی ویژه، به دلیل وابستگی به پارامترهای غیر مرتبط با کارکرد مته، تغییرات بسیار در بازه ای با خواص

زمان سیر موج فشاری سنگ های موجود و هم چنین استفاده از نتایج حاصل از بررسیهای انجام شده در سه میدان نفتی دیگر ایران، برای نسبت زمان سیر موج برشی به فشاری [۱۴]، محاسبه گردید. چکیده این محاسبات در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است. پس از محاسبه زمان سیر موج برشی، مدول های یانگ، برشی و حجمی برای سازندها و بازه های حفاری شده توسط مته های مختلف محاسبه گردید.

**جدول ۱: تخلخل معرف، چگالی و زمان سیر موج فشاری سنگهای مورد بررسی.**

چاه	سازند	سنگ شناسی	تخلخل معرف (%)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	زمان سیر موج فشاری (μsec/ft)
۸	دشتک	انیدریت	۰	۲/۹۶	۵۰
		کلسیت	۱/۵	۲/۷۵	۵۰
		دولومیت	۱	۲/۸۵	۴۶
		ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰
	کنگان	انیدریت	۰	۲/۹۸	۵۰
		کلسیت	۲	۲/۷۳	۵۱
		دولومیت	۱	۲/۸۵	۴۶
		ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰
	دالان بالایی	کلسیت	۱	۲/۷۰	۴۸
		دولومیت	۳	۲/۸۵	۴۴
		ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰
	۱۴	دشتک	انیدریت	۰	۲/۹۷
کلسیت			۱	۲/۷۳	۵۱
دولومیت			۱	۲/۸۴	۴۷
ایلیت			۱۰	۲/۶۸	۹۰
کنگان		انیدریت	۰	۲/۹۶	۵۰
		کلسیت	۱	۲/۷۳	۵۱
		دولومیت	۱	۲/۸۵	۴۶
		ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰
دالان بالایی		کلسیت	۱/۵	۲/۷۱	۵۳
		دولومیت	۲	۲/۸۵	۴۴
		ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰
نار		کلسیت	۱/۵	۲/۷۱	۵۳
	دولومیت	۲	۲/۸۵	۴۴	
	ایلیت	۱۰	۲/۶۸	۹۰	

**جدول ۲: نسبت زمان سیر موج برشی به فشاری [۱۴].**

سنگ شناسی	( $\Delta t_s / \Delta t_c$ )
انیدریت	۱/۸۵
کلسیت	۱/۹
دولومیت	۱/۷۵
ایلیت	$(\Delta t_s / \Delta t_c)_{sh} = -1.5\rho_{sh} + 6.1$

پس از محاسبه زمان سیر موج برشی، مدول یانگ (E)، مدول برشی (G) و مدول حجمی (K) از روابط ۵ تا

از سوی دیگر تلاش هایی برای برقراری روابطی بین قابلیت حفاری، نرخ نفوذ حفاری و خواص مکانیکی سنگ با اطلاعات لاگهای الکتریکی و خواص الاستیک سنگ نیز صورت گرفته است. واکر و همکاران [۱۳] معادلاتی را که وزن روی مته، عمق، مقاومت فشاری برج، تخلخل و متوسط اندازه دانه های سنگ را به نرخ نفوذ مته های کاجی مرتبط می ساخت پیشنهاد دادند. اما مقاومت فشاری بر جا، که در روابط آنها به کار می رفت، نیازمند استفاده از اطلاعاتی مانند وزن روی مته و زاویه اصطکاک داخلی بود که به ترتیب از اطلاعات حفاری و آزمایش های مکانیک سنگی، حاصل می شود.

برخی محققین تلاش کرده اند تا پارامتر بدون بعدی را از ترکیب این عوامل تأثیرگذار ارائه دهند و برخی دیگر این عوامل را به صورت نسبی و با معرفی یک مبنا ارائه داده اند. این عوامل تحت عنوان های قابلیت حفاری، شاخص طراحی، شاخص حفاری و غیره ارائه شده اند.

در بررسی قابلیت حفاری، اولین گام برآورد عوامل ژئومکانیکی سازند می باشد که در این تحقیق آنها را در دو دسته جداگانه مدولهای الاستیک دینامیک سنگ (مدولهای یانگ، برشی و حجمی) و عوامل مقاومتی سازند، بررسی می کنیم. علت این تقسیم بندی این است که در مورد مدولهای دینامیک سنگ، روابطی تثبیت شده و با مقبولیت جهانی وجود دارند که به وسیله آنها و با استفاده از زمان سیر موج فشاری و برشی و هم چنین چگالی سنگ، می توان این مدول ها را تعیین نمود. اما برای ارزیابی پارامترهای مقاومتی سنگ توسط اطلاعات موجود در مورد سازندها، روشی واحد و با مقبولیت جهانی در صنعت نفت وجود ندارد بلکه روش های موجود در حد فرضیه بوده و کارآیی آنها تنها به طور موردی به اثبات رسیده است.

### تعیین مدول های الاستیک دینامیک سنگ

برای تعیین مدول های الاستیک دینامیک سنگ علاوه بر زمان سیر موج فشاری، زمان سیر موج برشی نیز مورد نیاز می باشد، اما در میدان مورد بررسی، همچون اکثر میادین نفت و گاز ایران، زمان سیر موج برشی اندازه گیری نشده است. بنابراین ابتدا بایستی زمان سیر موج برشی را با استفاده از زمان سیر موج فشاری برآورد نمود. زمان سیر موج برشی با محاسبه تخلخل معرف، چگالی و

$$UCS = \frac{S}{12} \quad (10)$$

روش دیگری که در این بررسی به کار گرفته شد، تعیین مقاومت حفاری با استفاده از مدول یانگ و حجم شیل می باشد. در این روش که دارای مقبولیت نسبتاً بیشتری می باشد، مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از مدول یانگ دینامیکی و هم چنین حجم شیل، از رابطه ۱۱ به دست می آید [۱۸]:

$$UCS = E[0.008 \times V_{sh} + 0.00045 \times (1 - V_{sh})] \quad (11)$$

هم چنان که در ادامه خواهد آمد، این مقاومت ها، در واقع مقاومت در برابر حفاری بوده و در برابر مقاومت فشاری تک محوره نمی باشند.

### ارزیابی عوامل ژئومکانیکی سازندها

بررسی های انجام شده در این میدان بر روی پنج مته از چاه ۸ و چهار مته از چاه ۱۴، که در آنها اطلاعات لازم برای تعیین مدول ها، مقاومت و هم چنین نرخ نفوذ در اختیار بوده است، متمرکز گردید. سنگ های سازندهای حفاری شده توسط این مته ها عبارتند از انیدریت، کلسیت، دولومیت و شیل. با بررسی نرخ نفوذ در سنگ های مختلف این میدان، شیل به عنوان سنگ تأثیرگذار بر نرخ نفوذ شناخته شد. بنابراین در بررسی نمودارهای مدول های دینامیکی سنگ در برابر نرخ نفوذ، نمودار درصد شیل نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

در بازه های دارای شیل، حتی با وجود مقدار نسبتاً پایین مدول های الاستیک سنگ، نرخ نفوذ پایین می باشد. به عنوان مثال نمودار درصد شیل، مدول های الاستیک و هم چنین نرخ نفوذ برای مته شماره ۱۷ از چاه ۸ در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که در شکل به خوبی دیده می شود با افزایش میزان شیل، مقدار مدول های الاستیک دینامیک سنگ کاهش می یابد. این موضوع با توجه به افزایش تخلخل در بازه های دارای شیل و هم چنین مقاومت پایین شیل، نسبت به دیگر سنگ های حاضر در این میدان، قابل توجیه می باشد. با توجه به رابطه مستقیم مقاومت سنگ و مدول های الاستیک، انتظار می رود در بازه های دارای شیل، با توجه به مقدار نسبتاً کم مدول های الاستیک، نرخ نفوذ افزایش یابد. اما بر خلاف انتظار در بازه های دارای شیل نه تنها نرخ نفوذ افزایش نمی یابد بلکه حتی این بازه ها دارای نرخ نفوذ نسبتاً کمتری بوده که علت آن

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

$$K_B = \rho V_c^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \quad (7)$$

که در روابط مذکور  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج برشی و فشاری بر حسب متر بر ثانیه،  $\rho$  چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $E$ ،  $G$  و  $K$  بر حسب پاسکال می باشند.

### مقاومت در برابر حفاری

همان طور که گفته شد روش های محدود و اثبات نشده ای برای تعیین عوامل مقاومتی سازند وجود دارند. اما در حفاری نفت، بیش از آنکه مقاومت مطلق سنگ دارای اهمیت باشد، مقاومت در برابر حفاری است، که از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در بسیاری از مقالات، روابطی برای تعیین عواملی هم چون مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از داده های چاه نمودارها ارائه شده است اما نتایج این روابط، با وجود آن که به عنوان مقاومت فشاری تک محوری معرفی شده اند، در واقع مقاومت در برابر حفاری می باشند و این موضوع در بررسی جاری در میدان مورد بررسی، به خوبی نشان داده شده است. به این منظور دو روش تعیین مقاومت حفاری از داده های چاه نمودارها، در بررسی های انجام شده در این میدان به کار گرفته شدند. یکی از این روش ها تعیین مقاومت حفاری بر اساس مدل کوتس- دنو است. در این روش ابتدا با استفاده از زمان سیر موج فشاری و برشی و هم چنین چگالی، تراکم پذیری حجمی با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می گردد [۱۷]:

$$C_b = 1000 \rho_b \left[ \frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3 \Delta t_s^2} \right] \quad (8)$$

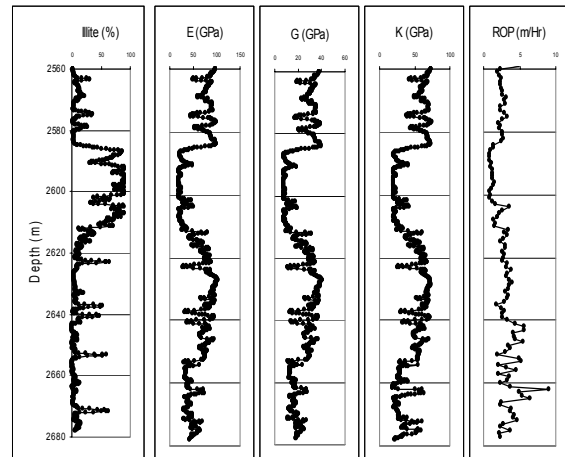
سپس مقاومت چسبندگی ( $S$ ) بر اساس مدل کوتس- دنو و با استفاده از مدول یانگ، تراکم پذیری حجمی و هم چنین شیل ( $V_{sh}$ )، محاسبه می شود:

$$S = 0.025 \times 10^6 \frac{E}{C_b} [0.008 \times V_{sh} + 0.00045 \times (1 - V_{sh})] \quad (9)$$

در پایان، مقاومت فشاری تک محوره، که تنش فشاری مورد نیاز برای شکست نمونه نامحصور سنگ می باشد، از رابطه ۱۰، تعیین می گردد:



چسبندگی بالای شیل و در نتیجه چسبیدن خرده های حفاری به مته و کاهش نرخ نفوذ آن می باشد.



شکل ۶: نمودار مقایسه درصد شیل و نرخ نفوذ با مدول های الاستیک سنگ های حفاری شده (E, G, K) توسط مته شماره ۱۷ در چاه شماره ۸ از عمق ۲۵۶۰ تا عمق ۲۶۸۰ متری در سازندهای دشتک و کنگان.

بررسی های انجام شده در این میدان نشان می دهد که در بازه های دارای شیل، با توجه به تخلخل بالای شیل، مدول های الاستیک کاهش پیدا می نمایند، ضمن این که به دلیل مشکلات حفاری در شیل ها، نرخ نفوذ نیز کاهش می یابد. اما در بازه های فاقد شیل، با کاهش مدول های الاستیک و در نتیجه کاهش مقاومت سنگ، نرخ نفوذ افزایش می یابد. لازم به یادآوری است که مقدار کم شیل نیز می تواند بر نرخ نفوذ تاثیر بسیار داشته باشد. این موضوع در روابط ارائه شده برای برآورد مقاومت حفاری، با استفاده از داده های چاه نمودارها (روابط ۱۰ و ۱۱)، منعکس شده است. در حالی که افزایش میزان شیل، با توجه به سنگ های دیگر موجود در این میدان و تخلخل نسبتاً بالای شیل، همراه با کاهش مقاومت تک محوری فشاری می باشد، مقاومت به دست آمده از این روابط با افزایش میزان شیل، افزایش می یابد. این موضوع بیانگر این نکته می باشد که مقاومت معرفی شده در این روابط، مقاومت حفاری بوده و مقاومت فشاری تک محوری سنگ نمی باشد.

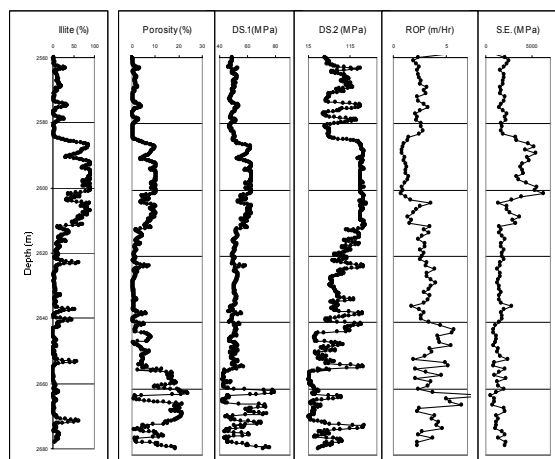
بر اساس بسیاری از مدل های تجربی تعیین مقاومت فشاری تک محوره، با فرض ثابت بودن شرایط، افزایش تخلخل موجب کاهش مقاومت فشاری تک محوره می شود، در نتیجه در بررسی های مربوط به مقاومت فشاری تک محوره، نمودار تخلخل و انرژی ویژه نیز مورد

ارزیابی قرار گرفتند. اما در این نمودارها با افزایش تخلخل، که مترادف با افزایش میزان شیل می باشد، بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱، مقاومت فشاری تک محوره افزایش می یابد، که این موضوع در تناقض با اصول ژئومکانیکی و روابط تجربی تعیین مقاومت فشاری تک محوره می باشد. این موضوع بر این که روابط ارائه شده، برای تعیین مقاومت حفاری به کار می روند نه مقاومت فشاری تک محوری، تأکید دارد.

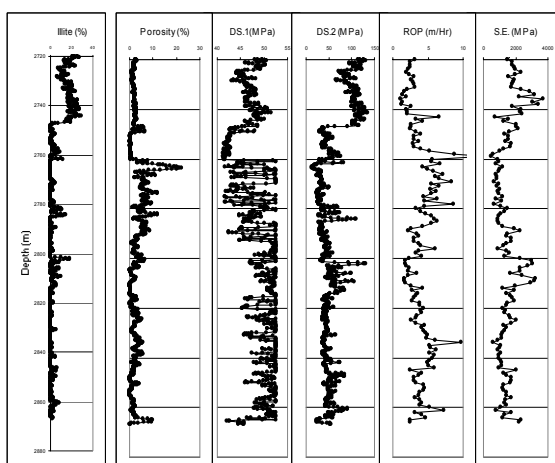
به عنوان مثال نمودارهای درصد شیل، تخلخل و مقاومت حفاری به دست آمده از رابطه ۱۰ (DS1) و مقاومت حفاری محاسبه شده از رابطه ۱۱ (DS2) برای مته شماره ۱۷ از چاه ۸ در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که از شکل نیز به خوبی قابل تشخیص است، با افزایش میزان شیل از عمق ۲۵۸۰ تا ۲۶۲۰ متری، تخلخل نیز افزایش می یابد. با افزایش مقاومت های محاسبه شده از روابط ۱۰ و ۱۱ (DS.1) و (DS.2) نیز افزایش یافته که نشان دهنده مقاومت های اندازه گیری شده مقاومت در برابر حفاری می باشند و در مقابل مقاومت فشاری تک محوره نیستند. با افزایش مقاومت حفاری در این اعماق، نرخ نفوذ کاهش و انرژی ویژه صرف شده برای حفاری سنگ های این بازه، افزایش یافته است. با توجه به اینکه افزایش مقاومت های حفاری محاسبه شده، همراه با کاهش نرخ نفوذ و افزایش انرژی ویژه می باشد و هم چنین پارامترهای زمین شناسی و ژئومکانیکی سازند را نیز به طور مستقیم مورد ارزیابی قرار می دهند، بنابر این مقاومت های حفاری محاسبه شده می توانند به عنوان مکملی آرمانی در کنار هزینه حفاری واحد طول برای ارزیابی مته های مصرف شده و انتخاب مته های آتی، به کار روند.

در مثالی دیگر، درصد شیل، تخلخل، مقاومت های حفاری، نرخ نفوذ و انرژی ویژه مته شماره ۱۰ از چاه ۱۴ در شکل (۸) نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این نمودار، کاهش مقاومت حفاری محاسبه شده از رابطه ۱۱، DS.2، در اثر افزایش تخلخل در بازه های بدون شیل، در اعماق ۲۷۶۰ تا ۲۸۰۰ متری، می باشد. ضمن این که افزایش نرخ نفوذ و کاهش انرژی ویژه در اثر کاهش مقاومت حفاری در این بازه ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار است و توانایی مقاومت حفاری محاسبه شده از این روش را برای برآورد شرایط واقعی حفاری، به خوبی

نمایان می سازد. در نمودار این مته، مقاومت حفاری محاسبه شده از رابطه ۱۰، DS.1، دارای تغییرات بسیار و گاه غیر هم بسته با شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی و هم چنین عوامل عملیاتی حفاری می باشد، که بیان گر عدم توانایی این روش در برآورد شرایط حفاری و کمک به انتخاب مته مناسب می باشد.



شکل ۷: نمودار مقایسه در صد شیل و تخلخل با مقاومت حفاری، نرخ نفوذ و انرژی ویژه مته شماره ۱۷ از چاه شماره ۸ در سازندهای دشتک و کنگان.



شکل ۸: نمودار مقایسه در صد شیل و تخلخل با مقاومت حفاری، نرخ نفوذ و انرژی ویژه مته شماره ۱۰ از چاه شماره ۱۴ از عمق ۲۷۲۰ تا ۲۸۶۷ متری در سازندهای کنگان و دالان.

برای ارزیابی عوامل ژئومکانیکی محاسبه شده، متوسط مدول های الاستیک و هم چنین مقاومت حفاری محاسبه شده از دو روش مذکور، روابط ۱۰ و ۱۱، برای مته های مورد بررسی در این دو چاه با نتایج نرخ نفوذ، انرژی ویژه و هزینه حفاری واحد طول مقایسه گردیده که نتایج آن در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. به عنوان

مثال مته شماره ۲۱ از چاه ۸ و مته شماره ۱۱ از چاه ۱۴ هر دو در سازند دالان حفاری کرده اند که از نظر خواص زمین شناسی مشابه می باشند، از نظر خواص ژئومکانیکی نیز، پارامترهای اندازه گیری شده بیانگر تشابه شرایط ژئومکانیکی سازند حفاری شده توسط این دو مته می باشد، اما با این وجود، مته شماره ۱۱ از چاه ۱۴ دارای نرخ نفوذ بسیار بالاتر و انرژی ویژه و هزینه حفاری واحد طول به مراتب پایین تری می باشد. بنابراین با در نظر گرفتن تمامی جوانب می توان گفت که در حالت کلی و برای این سازند، مته ای که در چاه ۱۴ رانده شده از مته رانده شده در چاه ۸، مناسب تر می باشد. در نتیجه مته دکمه ای با کد ۴۳۷ که در چاه ۱۴ رانده شده، در برابر مته دکمه ای با کد ۵۴۷ رانده شده در چاه ۸، مته مناسب تری می باشد.

جدول ۳: متوسط مدول های الاستیک مته های مورد بررسی.

چاه	شماره مته	سازند	متوسط مدول یانگ (GPa)	متوسط مدول برشی (GPa)	متوسط مدول حجمی (GPa)
۸	۱۶	دشتک	۷۷	۳۰	۶۱
	۱۷	دشتک و کنگان	۵۹	۲۳	۴۶
	۱۸	کنگان	۵۸	۲۲	۴۹
	۲۰	کنگان و دالان بالایی	۶۹	۲۷	۵۵
	۲۱	دالان بالایی	۷۲	۲۸	۵۷
۱۴	۷	دشتک و کنگان	۶۷	۲۶	۵۴
	۸	کنگان	۵۳	۲۰	۴۵
	۱۰	کنگان و دالان بالایی	۸۰	۳۱	۶۰
	۱۱	دالان	۶۹	۲۷	۵۳

نتایج این روش نیز نیازمند بررسی عوامل عملیاتی حفاری می باشد. در تعیین قابلیت حفاری سازند که از ترکیب پارامترهای تعیین شده در این تحقیق و برخی عوامل دیگر به دست می آید بایستی عوامل عملیاتی را نیز، دخالت داد. به عنوان مثال مته ۱۸ از چاه ۸ و مته ۸ از چاه ۱۴ هر دو در سازند کنگان، با خواص زمین شناسی و ژئومکانیکی مشابه حفاری کرده اند (این موضوع به خوبی از داده های ارائه شده در جداول (۳) و (۴)، قابل استنباط است). با وجود این تشابه، و ضمن این که این دو مته از کد یکسان ۵۲۷ و حتی از تولیدات یک شرکت هستند، اما نرخ نفوذ، انرژی ویژه حفاری و هزینه حفاری واحد طول بسیار متفاوتی را دارا هستند که بیان گر تأثیر

عوامل عملیاتی بر روی کارآیی مته ها می باشد.

**جدول ۴: متوسط مقاومت حفاری، انرژی ویژه و هزینه حفاری واحد طول مته های مورد بررسی.**

چاه	شماره مته	سازند	متوسط DS.2 (MPa)	متوسط نرخ نفوذ (m/Hr)	متوسط انرژی ویژه (MPa)	هزینه واحد طول (\$)
۸	۱۶	دشتک	۷۹	۲/۳	۱۹۲۴	۲۷۲
	۱۷	دشتک و کنگان	۹۱	۲/۸	۲۱۱۳	۳۸۱
	۱۸	کنگان	۹۳	۳/۲	۱۵۲۸	۴۰۷
	۲۰	کنگان و دالان بالایی	۷۱	۲/۱	۲۶۲۹	۵۷۱
	۲۱	دالان بالایی	۴۰	۳	۲۰۸۸	۴۴۷
۱۴	۷	دشتک و کنگان	۹۳	۴/۸	۸۵۷	۲۲۹
	۸	کنگان	۹۳	۵/۳	۸۵۷	۳۰۲
	۱۰	کنگان و دالان بالایی	۵۸	۴	۱۵۵۲	۳۵۱
	۱۱	دالان	۳۷	۵/۴	۱۲۸۸	۲۷۲

به طور خلاصه می توان گفت، برخی از روابطی که برای تعیین مقاومت فشاری سنگ از داده های چاه نمودارها در چاه های نفت و گاز ارائه شده اند، در واقع مقاومت در برابر حفاری را محاسبه می نمایند. از میان این روابط دو رابطه که با داده های میدان مورد بررسی قابل استفاده بودند مورد ارزیابی قرار گرفتند. مدل کوتس-دنو، به دلیل تغییرات وسیع در دامنه ای کوتاه، با شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی نسبتاً پایدار، هم چنین عدم هم بستگی با نرخ نفوذ و انرژی ویژه، بر اساس بررسی های انجام شده در این میدان نمی تواند به عنوان روشی سودمند در انتخاب مته مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، رابطه ۱۱ دارای پتانسیل بالایی برای ارزیابی مقاومت در برابر حفاری می باشد. همبستگی بالای مقاومت محاسبه شده از رابطه ۱۱، با نرخ نفوذ و انرژی ویژه نشان دهنده توانایی این روش در مدل کردن شرایط واقعی حفاری چاه می باشد. در نتیجه بر اساس بررسی های انجام شده در این میدان، می توان از رابطه ۱۱، به عنوان مکملی آرمانی در کنار هزینه حفاری واحد طول، برای انتخاب صحیح مته استفاده نمود. ضمن این که باید در کنار این روش عوامل عملیاتی حفاری را که بر کارکرد مته مؤثر می باشند نیز مورد توجه قرار داد.

### نتیجه گیری

بررسی کارکرد مته های مورد استفاده در شش

چاه یک میدان گازی جنوب ایران نتایج زیر را به دست داده است:

۱ - روش هزینه حفاری واحد طول به دلیل نداشتن مبنایی معتبر و یکسان برای مقایسه مته هایی که سنگ هایی با خواص زمین شناسی و ژئومکانیکی متفاوت را حفاری کرده اند، و یا در شرایط عملیاتی متفاوتی به کار گرفته شده اند، نمی تواند به تنهایی در فرآیند بررسی مته های مورد استفاده و انتخاب مته جدید به کار گرفته شود.

۲ - در روش هزینه حفاری واحد طول، در صورت تغییرات وسیع خواص زمین شناسی و ژئومکانیکی در سازندی واحد، امکان مقایسه مته های مورد استفاده در آن سازندها و پیشنهاد مته بهینه وجود ندارد.

۳ - روش انرژی ویژه به دلایلی مانند: وابستگی به عوامل غیر مرتبط با کارکرد مته، نیاز به اندازه گیری گشتاور در تمام طول چاه (که معمولاً صورت نمی گیرد) و داشتن تغییرات بسیار در بازه ای محدود، نمی تواند به عنوان مکملی آرمانی برای هزینه حفاری واحد طول به کار رود.

۴ - برخی از روابطی که برای تعیین مقاومت فشاری سنگ از داده های چاه نمودارها در چاه های نفت و گاز ارائه شده اند، در واقع مقاومت در برابر حفاری را محاسبه می کنند و به کارگیری آنها به عنوان مقاومت تک محوری فشاری با تقریب بالایی همراه خواهد بود.

۵ - بر اساس بررسی های انجام شده روش تعیین مقاومت حفاری بر اساس مدل کوتس-دنو، به دلیل تغییرات وسیع در دامنه ای کوتاه با شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی نسبتاً پایدار، هم چنین عدم هم بستگی با نرخ نفوذ و انرژی ویژه، نمی تواند به عنوان روشی سودمند در انتخاب مته مورد استفاده قرار گیرد.

۶ - روش تعیین مقاومت حفاری با استفاده از مدول یانگ و حجم شیل، دارای پتانسیل بالا برای ارزیابی مقاومت در برابر حفاری می باشد. هم بستگی بالای مقاومت محاسبه شده از این روش با نرخ نفوذ و انرژی ویژه، نشان دهنده توانایی این روش در مدل کردن شرایط واقعی حفاری چاه می باشد. در نتیجه بر اساس بررسی های انجام شده، می توان از این روش به عنوان مکملی آرمانی در کنار هزینه حفاری واحد طول، برای انتخاب صحیح مته استفاده نمود، که باید البته نتایج حاصل از این روش بر اساس عوامل عملیاتی حفاری تعدیل شوند.

**مراجع**

- 1 - *Petroleum Engineering & Development Company (PEDEC)*. (2006). Completion reports of the studied wells.
  - 2 - Thomas, J. M. (1989). *Case History: PC Analysis of Bit Records Enhance Drilling Operations in Southern Alabama*, SPE 18632.
  - 3 - Adams, N. J. and Charrier, T. (1985). *Drilling Engineering*, Penn Well Books, USA.
  - 4 - Bourgoyne, Jr. A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E. and Young Jr, F. S. (1991). *Applied Drilling Engineering*, SPE, USA.
  - 5 - Rabia, H., Farrelly, M. and Barr, M. V. (1986). *A New Approach to Drill Bit Selection*, SPE 15894.
  - 6 - Teale, R. (1965). "The concept of specific energy in drilling." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 2, PP. 57-73.
  - 7 - Farrelly, M. and Rabia, H. (1987). *Bit Performance and Selection: A Novel Approach*, SPE 16163.
  - 8 - Rabia, H. (1985). *Oilwell Drilling Engineering*, Graham & Trotman, UK.
  - 9 - Perrin, V. P., Mensa-Wilmot, G. and Alexander, W. L. (1997). *Drilling Index - a New Approach to Bit Performance Evaluation*, SPE 37595.
  - 10 - Spar, J. R., Ledgerwood, L.W., Goodman, H., Graff, R. L. and Moo, T. J. (1995). *Formation Compressive Strength Estimates for Predicting Drillability and PDC Bit Selection*, SPE 29397.
  - 11 - Warren, T. M. (1981). "Drilling model for soft-formation bits." *JPT*. PP. 963-970.
  - 12 - Warren, T. M. (1987). "Penetration rate performance of roller cone bits." *SPE Drilling Engineering*, PP. 9-18.
  - 13 - Walker, B. H., Black, A. D., Klanker, T. L. and Khodavirdian, M. (1986). *Roller Bit Penetrating Rate Response as a Function of Rock Properties and Well Depth*, SPE 15620.
  - 14 - Azizi, V. and Memarian, H. (2006). *S wave velocity estimation for evaluating geomechanical properties of rocks in oil and gas wells of Iran*. 1<sup>st</sup> Iranian Petroleum Engineering Congress. 30-31 May, Tehran. Paper No 30.
  - 15 - Vutukuri, V. S. and Katsuyama, K. (1994). *Introduction to Rock Mechanics*. Industrial Publishing and Consulting, Inc
  - 16 - Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Vol. 2, Trans Tech Publications, Germany.
  - 17 - Al-Qahtani, M. and Zillur, R. (2001). *A Mathematical Algorithm for Modeling Geomechanical Rock Properties of the Khuff and Pre-Khuff Reservoirs in Gahwar Field*, SPE 68194.
  - 18 - Gavito, D. G. (1996). *A new Strength Model and Its Practical Applications*, SPE 35322.
  - 19 - Azizi, V. (2006). *lection and bit life estimation in Iranian oil and gas fields*. MSc thesis, Faculty of Engineering, University of Tehran.
-