

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
رشته مهندسی معدن گرایش استخراج  
پایان نامه کارشناسی ارشد

## طبقه بندی ژئومکانیکی سازندهای نفتی بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری در حفاری های عمیق

محمد محمدی بهبود

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضانزاده

استاد مشاور:

دکتر بهزاد تخمچی

شهریور ۹۵

این تحقیق پیشکشی است به **پدر و مادر** عزیز و فداکارم، که عاشقانه و  
صبورانه همیار و همراه زندگی‌ام هستند

و

تمامی **عزیزانی** که لبخند زندگی را بر وجودم نشانده‌اند.

## تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد عزیزم جناب آقای **دکتر احمد رمضان زاده** به عنوان استاد راهنما که در تمامی مراحل این تحقیق مرا صمیمانه یاری کرده و در مسیر صنعتی شدن پروژه نقش قابل توجهی را ایفا کردند تشکر نمایم.

همچنین از مشاوره استاد عزیز جناب آقای **دکتر بهزاد تخم‌چی** که به عنوان استاد مشاور پایان‌نامه پاسخگوی بی‌دریغ تمام ابهامات و مشکلات پیش‌رو بودند تشکر و تقدیر فراوان به عمل می‌آید.

همچنین از مشاورین محترم جناب آقای مهندس علی جوزی کارشناس شرکت ملی حفاری و جناب آقای مهندس کردوانی کارشناس اداره پتروفیزیک شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب که به عنوان مشاور پایان‌نامه پاسخگوی مشکلات پیش‌رو بودند تشکر و تقدیر فراوان به عمل می‌آید.

از همه دوستان و اساتیدی که در طی انجام این پروژه مرا از لطف خود بی‌بهره نگذاشتند، آقایان مهندس محمد انه منگلی، مهندس محمد جوکار، مهندس علیرضا احمدی، مهندس محمدرضا حاج سعیدی صادق و مهندس مهدی عبادی که در امر ویرایش متن حاضر به من یاری رساندند کمال تشکر را می‌نمایم و برای تمام عزیزان آرزوی موفقیت دارم.

**این پایان‌نامه با حمایت شرکت ملی حفاری و شرکت مناطق نفت خیز جنوب** انجام شده است لذا از همکاری ارزنده ریاست محترم پژوهش و توسعه **شرکت ملی حفاری** جناب آقای **دکتر هادی محمدی** و همچنین ریاست محترم پژوهش و توسعه **شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب** جناب آقای **دکتر پور قاسم** جهت تحقق اهداف این پژوهش صمیمانه تشکر می‌کنم.

## تعهد نامه

اینجانب **محمد محمدی بهبود** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن- استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طبقه بندی ژئومکانیکی سازندهای نفتی بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری در حفاری های عمیق تحت راهنمایی جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد 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 تأثیرگذار بودند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- 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 رایانه ای، نرم افزار ها 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 نمی باشد.

## چکیده

از آنجا که فرآیند عملیات حفاری در صنایع بالادستی نفت از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و یکی از پر هزینه‌ترین فعالیت‌ها در صنعت بالادستی است؛ لذا افزایش راندمان و سرعت حفاری بسیار مورد توجه است. افزون بر پارامترهایی مانند زمان مرتبط با جابه‌جایی، وقفه و زمان‌های از دست رفته، نرخ نفوذ مته و انرژی ویژه حفاری به عنوان عوامل مهم در راندمان دکل‌های حفاری مورد توجه است. در این پژوهش، انرژی ویژه حفاری از پارامترهای عملیاتی، که از طریق گزارش‌های روزانه عملیاتی جمع‌آوری شده، محاسبه شده است. مهم‌ترین عوامل تاثیر گذار بر روی انرژی ویژه به دو دسته کلی عوامل قابل کنترل (عملیاتی) و غیر قابل کنترل (محیطی) تقسیم بندی شدند. با توجه به اهمیت پارامترهای ژئومکانیکی در فرآیند حفاری، در این پژوهش تلاش بر این است که تاثیر پارامترهای محیطی بر تغییرات انرژی ویژه حفاری بر اساس داده‌های موجود بررسی شود. بنابراین پس از گردآوری داده‌های موجود از چاه‌های مورد مطالعه و انجام بررسی مقدماتی برای شناخت هر چه بهتر تغییرات داده‌ها در بانک اطلاعات موجود، با استفاده از برازش چند متغیره برای مدل سازی و تشخیص الگو استفاده شد. پس از تحلیل و بررسی مدل، ضریب همبستگی‌های به دست آمده برای چاه شماره (۱) و (۲) به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۰ و برای مجموع دو چاه ۰/۷۸ ملاحظه گردید. برای دسته بندی و مرتب سازی داده‌های ژئومکانیکی و عملیات حفاری از الگوریتم خود سازمانده (SOM)، استفاده گردید. بر این اساس ابتدا داده‌های انرژی ویژه حفاری با استفاده از الگوریتم SOM خوشه بندی شد، سپس پارامترهای ژئومکانیکی سازند بر اساس این خوشه بندی، طبقه‌بندی شدند. بر اساس این الگوریتم خوشه بندی، سازندهایی با مقادیر انرژی ویژه حفاری آن بیش از ۱۸۰ psi در خوشه سنگ سخت و بسیار سخت و سازندهایی با مقادیر انرژی ویژه حفاری کمتر از ۱۸۰ psi در خوشه سنگ متوسط تا نرم قرار گرفت. همچنین با استفاده از الگوریتم ANFIS-PSO خصوصیات ژئومکانیکی چاه از قبیل مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و چسبندگی ذاتی سنگ با دقت بالایی از انرژی ویژه حفاری تخمین زده شد. از آنجا که بخش مهمی از مشکلات حفاری در زون خارج مخزن است که معمولاً داده‌های بسیار محدودی از آن در دسترسی

وجود دارد. این الگوریتم می‌تواند به خوبی جهت تخمین خصوصیات ژئومکانیکی از انرژی ویژه حفاری ارائه نماید.

**کلمات کلیدی:** انرژی ویژه حفاری، خصوصیات ژئومکانیکی، خوشه‌بندی، الگوریتم SOM،

**الگوریتم ANFIS-PSO**

## فهرست مطالب

|                                                                     |         |
|---------------------------------------------------------------------|---------|
| فصل یک: کلیات.....                                                  | ۱.....  |
| ۱-۱- تعریف مساله.....                                               | ۲.....  |
| ۲-۱- سابقه‌ی تحقیق.....                                             | ۳.....  |
| ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....                                         | ۵.....  |
| ۴-۱- اهداف و روش تحقیق.....                                         | ۶.....  |
| ۵-۱۱- ساختار پایان نامه.....                                        | ۷.....  |
| فصل دوم: عوامل موثر بر انرژی ویژه حفاری.....                        | ۹.....  |
| ۱-۲- مقدمه.....                                                     | ۱۰..... |
| ۲-۲- حفاری.....                                                     | ۱۰..... |
| ۱-۲-۲- حفاری ضربه ای (کابلی).....                                   | ۱۱..... |
| ۲-۲-۲- حفاری دورانی.....                                            | ۱۲..... |
| ۳-۲- متدهای حفاری.....                                              | ۱۳..... |
| ۱-۳-۲- متدهای کاجی.....                                             | ۱۴..... |
| ۲-۳-۲- متدهای تیغه ثابت.....                                        | ۱۵..... |
| ۴-۲- مکانیزم شکست.....                                              | ۱۸..... |
| ۱-۴-۲- حفاری فرو تعادلی.....                                        | ۱۹..... |
| ۲-۴-۲- حفاری تعادلی.....                                            | ۲۰..... |
| ۳-۴-۲- حفاری فرا تعادلی.....                                        | ۲۱..... |
| ۵-۲- انرژی ویژه حفاری.....                                          | ۲۳..... |
| ۵-۲- ۱- تاثیر عوامل قابل کنترل بر انرژی ویژه حفاری.....             | ۲۴..... |
| ۵-۲- ۲- تاثیر عوامل محیطی بر انرژی ویژه حفاری.....                  | ۲۷..... |
| ۵-۲- ۲- مروری بر روابط انرژی ویژه حفاری.....                        | ۳۷..... |
| ۶-۲- جمع بند.....                                                   | ۴۱..... |
| فصل سوم: مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌های میدان مورد مطالعه..... | ۴۳..... |
| ۱-۳- مقدمه.....                                                     | ۴۴..... |
| ۲-۳- معرفی میدان.....                                               | ۴۵..... |
| ۱-۲-۳- مخزن آسماری.....                                             | ۴۶..... |

|    |                                                                                      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ۴۶ | ۳-۲-۲- مخزن بنگستان                                                                  |
| ۴۶ | ۳-۲-۳- مخزن خامی                                                                     |
| ۴۷ | ۳-۳- سنگ شناسی سازندها                                                               |
| ۴۸ | ۳-۴- نگارهای چاه پیمایی                                                              |
| ۴۹ | ۳-۴-۱- نگار مقاومت ویژه                                                              |
| ۴۹ | ۳-۴-۲- نگار پرتو گاما                                                                |
| ۵۰ | ۳-۴-۳- نگار صوتی                                                                     |
| ۵۰ | ۳-۴-۴- نگار نوترون                                                                   |
| ۵۱ | ۳-۴-۵- نگار چگالی                                                                    |
| ۵۱ | ۳-۴-۶- نگار کالیپر                                                                   |
| ۵۲ | ۳-۵- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ                                                 |
| ۵۲ | ۳-۵-۱- تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آزمایش روی مغزه                    |
| ۵۳ | ۳-۵-۲- تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از داده‌های نگاره‌ها                  |
| ۶۵ | ۳-۶- جمع بندی                                                                        |
| ۶۷ | <b>فصل چهارم: توسعه مدل‌های تجربی با استفاده از تحلیل آماری پایگاه داده</b>          |
| ۶۸ | ۴-۱- مقدمه                                                                           |
| ۶۸ | ۴-۲- تشکیل پایگاه داده‌ها                                                            |
| ۷۵ | ۴-۳- بررسی کیفی عوامل موثر بر انرژی ویژه حفاری                                       |
| ۸۲ | ۴-۴- روش کمی ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه                              |
| ۸۳ | ۴-۴-۱- بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه حفاری                         |
| ۸۵ | ۴-۴-۲- بررسی مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی بر روی انرژی ویژه حفاری چاه شماره (۱)  |
| ۸۸ | ۴-۴-۳- بررسی مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی بر روی انرژی ویژه حفاری چاه شماره (۲)  |
| ۹۰ | ۴-۴-۴- تعیین اعتبار نتایج معادله آماری برازشی                                        |
| ۹۲ | ۴-۵- جمع بندی                                                                        |
|    | <b>فصل پنجم: طبقه‌بندی ژئومکانیکی سازندهای مورد مطالعه بر اساس مقادیر انرژی ویژه</b> |
| ۹۵ | <b>حفاری</b>                                                                         |
| ۹۶ | ۵-۱- مقدمه                                                                           |
| ۹۷ | ۵-۲- خوشه بندی                                                                       |
| ۹۷ | ۵-۲-۱- الگوریتم خود سازمانده                                                         |

|          |                                                              |
|----------|--------------------------------------------------------------|
| ۱۰۳..... | ۵-۲-۲- الگوریتم K-Means                                      |
| ۱۰۵..... | ۵-۳- تخمین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ از روی داده‌های انرژی ویژه |
| ۱۰۶..... | ۵-۳-۱- ساختار شبکه ANFIS و تابع موجک                         |
| ۱۰۸..... | ۵-۳-۲- مدل سازی و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی                |
| ۱۱۲..... | ۵-۴- جمع بندی                                                |
| ۱۱۳..... | <b>فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>                       |
| ۱۱۴..... | ۶-۱- نتیجه گیری                                              |
| ۱۱۶..... | ۶-۲- پیشنهادات                                               |
| ۱۱۷..... | منابع                                                        |

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): نمونه ای از مته دکمه‌ای ..... ۱۴
- شکل (۲-۲): نمونه ای از مته دندان‌های ..... ۱۵
- شکل (۳-۲): مته سایشی با تیغه فولادی ..... ۱۶
- شکل (۴-۲): مته الماس معمولی ..... ۱۷
- شکل (۵-۲): مته الماسی PDC و TSP ..... ۱۸
- شکل (۶-۲): اثر اختلاف فشار بر سرعت حفاری در حالت فراترازی ..... ۲۰
- شکل (۷-۲): مکانیزم شکست سنگ در مته‌های سایشی و نفوذ گر ..... ۲۰
- شکل (۸-۲): رابطه بین انرژی ویژه و وزن روی مته ..... ۲۴
- شکل (۹-۲): تاثیر انرژی ویژه حفاری در برابر مقاومت فشاری تک محوری ..... ۲۵
- شکل (۱۰-۲): دستگاه حفاری چکشی مورد استفاده در آزمایش ..... ۲۶
- شکل (۱۱-۲): رابطه بین انرژی ویژه حفاری و مدول یانگ ..... ۲۹
- شکل (۱۲-۲): تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ثابت  $m$  ..... ۳۰
- شکل (۱۳-۲): رابطه بین فشار منفذی و انرژی ویژه ..... ۳۴
- شکل (۱۴-۲): رابطه بین مقاومت ویژه سنگ و انرژی ویژه ..... ۳۵
- شکل (۱۵-۲): رابطه بین مقدار فشار محصور کننده و انرژی ویژه ..... ۳۵
- شکل (۱۶-۲): رابطه بین فشار ته چاه و انرژی ویژه ..... ۳۹
- شکل (۱۷-۲): نمودار عمق برش و انرژی ویژه ..... ۴۰
- شکل (۱۸-۲): محاسبه مقدار فاکتور هیدرولیک مته با توجه به مقدار قطر مته ..... ۴۱
- شکل (۱-۳): تغییرات الاستیک چاه شماره (۱) ..... ۵۶
- شکل (۲-۳): تغییرات الاستیک چاه شماره (۲) ..... ۵۶
- شکل (۳-۳): مقاومت فشاری تک محوری چاه‌ها ..... ۶۱
- شکل (۴-۳): تغییرات فشار منفذی بر حسب عمق در چاه شماره (۱) و (۲) ..... ۶۴
- شکل (۱-۴): نمودار فراوانی داده‌های عملیاتی چاه شماره (۱) ..... ۷۱
- شکل (۲-۴): نمودار فراوانی داده‌های ژئومکانیکی چاه شماره (۱) ..... ۷۲
- شکل (۳-۴): نمودار فراوانی داده‌های عملیاتی چاه شماره (۲) ..... ۷۳
- شکل (۴-۴): نمودار فراوانی داده‌های ژئومکانیکی چاه شماره (۲) ..... ۷۴
- شکل (۵-۴): نمودار تغییرات انرژی ویژه حفاری و نرخ نفوذ و عوامل موثر بر آن بر حسب عمق در چاه شماره (۱) .. ۷۶

- شکل (۴-۶): نمودار تغییرات انرژی ویژه حفاری و نرخ نفوذ و عوامل موثر بر آن بر حسب عمق در چاه شماره (۲) ۷۷... ۷۸.....
- شکل (۴-۷): نمودار جعبه‌ای انرژی ویژه حفاری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه شمار (۱) و (۲) ۹۱.. ۹۱..
- شکل (۴-۸): تحلیل باقی مانده‌ها برای پیش بینی انرژی ویژه حفاری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه (۱) ۹۱.. ۹۱..
- شکل (۴-۹): تحلیل باقی مانده‌ها برای پیش بینی انرژی ویژه حفاری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه (۲) ۹۱.. ۹۹.....
- شکل (۵-۱): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری بر اساس الگوریتم SOM به سه خوشه ۹۹..... ۹۹.....
- شکل (۵-۲): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری بر اساس الگوریتم SOM به پنج خوشه ۹۹..... ۱۰۰.....
- شکل (۵-۳): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری به پنج خوشه ۱۰۰..... ۱۰۰.....
- شکل (۵-۴): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی به سه خوشه ۱۰۰..... ۱۰۴.....
- شکل (۵-۵): خوشه بندی بر اساس الگوریتم K-means ۱۰۴..... ۱۰۴.....
- شکل (۵-۶): تقسیم بندی انرژی ویژه و مقاومت فشاری بر اساس الگوریتم K-means به سه خوشه ۱۰۴..... ۱۰۷.....
- شکل (۵-۷): تجزیه انرژی ویژه حفاری به وسیله موجک db1 تا سطح چهارم ۱۰۷..... ۱۰۸.....
- شکل (۵-۸): ساختار شبکه انفیس ۱۰۸.....
- شکل (۵-۱۰): نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر آموزش داده شده توسط ANFIS-PSO به رنگ قرمز و واقعی حاصل از انرژی ویژه حفاری به رنگ آبی، برای پارامترهای مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی، ضریب اصطکاک داخلی ۱۰۹.....
- شکل (۵-۱۰): نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر آموزش داده شده توسط ANFIS-PSO به رنگ قرمز و واقعی حاصل از انرژی ویژه حفاری به رنگ آبی، برای پارامترهای مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی، ضریب اصطکاک داخلی ۱۱۰.....

## فهرست علائم و نشانه‌ها:

| علائم             | توضیحات                   | علائم                   | توضیحات                  |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| WOB               | وزن روی مته               | $V_p$                   | سرعت موج فشاری           |
| RPM               | سرعت دوران مته            | $V_s$                   | سرعت موج برشی            |
| $D$               | عمق                       | $\Delta T$              | تغییرات زمان موج فشاری   |
| $d$               | قطر مته                   | $T_s$                   | مقاومت کششی سنگ          |
| ROP               | نرخ نفوذ مته              | $E_{sta}$               | مدول یانگ استاتیکی سنگ   |
| $C_F$             | قابلیت حفاری سنگ          | $E_{dyn}$               | مدول یانگ دینامیک سنگ    |
| PoreP             | فشار منفذی                | $G_{dyn}$               | مدول برشی دینامیکی سنگ   |
| $S$               | مقاومت در برابر حفاری     | $G_{sta}$               | مدول برشی استاتیکی سنگ   |
| $P_e$             | فشار تفاضلی سازند         | $\lambda_{dyn}$         | ثابت لامه دینامیکی سنگ   |
| $P_w$             | فشار چاه                  | $\lambda_{sta}$         | ثابت لامه استاتیکی سنگ   |
| SE                | انرژی ویژه                | $\nu_{dyn}$             | نسبت پواسون دینامیکی سنگ |
| MSE               | انرژی ویژه مکانیکی        | $\nu_{sta}$             | نسبت پواسون استاتیکی سنگ |
| DSE               | انرژی ویژه حفاری          | $K_{dyn}$               | مدول حجمی دینامیکی سنگ   |
| FLOW              | نرخ جریان سیال            | $K_{sta}$               | مدول حجمی استاتیکی سنگ   |
| PHI               | زاویه اصطکاک داخلی        | $\sigma_v$              | نقش عمودی برجا           |
| UCS               | چگالی سیال حفاری          | $\sigma_h$              | نقش افقی حداقل برجا      |
| UCS               | مقاومت فشاری تک محوره سنگ | $\sigma_H$              | نقش افقی حداکثر برجا     |
| $g$               | میانگین ابعاد ذرات سنگ    | $S_{H\ max}$            | نقش موثر افقی حداکثر     |
| RHOB              | نگار چگالی                | $S_{h\ min}$            | نقش موثر افقی حداقل      |
| NPHI              | نگار تخلخل                | $\rho$                  | چگالی سنگ                |
| GR                | نگار پرتو گاما            | RT                      | نگار مقاومت ویژه         |
| Adjusted R Square | ضریب تعیین تعدیل شده      | R Square                | ضریب تعیین               |
| R                 | ضریب همبستگی              | Std Error of Estimation | تخمین انحراف معیار       |



فصل یک

# کلیات

## ۱-۱- تعریف مساله

دستگاه‌های حفاری از نقش بسزایی در تحقق اهداف صنعت نفت و گاز، معدنکاری و نیز فعالیت‌های عمرانی برخوردارند. بر اساس شرایط ویژه عملیاتی این دستگاه‌ها، ابزارهای برش مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابزارهای حفاری، همواره نقطه تماس دستگاه با سنگ بوده و با ایجاد ترک‌های کششی و یا برشی، موجب خردایش آن می‌شوند. بازدهی این عملیات خردایش به عوامل مختلفی من جمله نحوه انتقال انرژی بین مته و سنگ بستگی دارد. لذا به منظور مدیریت بهتر زمان و نیز بهینه‌سازی فرآیند حفاری، به دست آوردن مدلی که بتواند ارتباط بین انرژی ویژه حفاری و عوامل تاثیر گذار بر حفاری (عوامل محیطی و عملیاتی) را با دقت کافی بیان کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقدار انرژی ویژه حفاری یکی از معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم حفاری و میزان بازدهی آن است. تعداد فاکتورهای موثر در عملیات حفاری نشان دهنده پیچیدگی تقابل مته و سنگ می‌باشد. در نتیجه پارامترهای مذکور بعضاً به شدت به یکدیگر وابسته بوده و روابط بین آنها اصولاً به صورت غیر خطی است. مشخصات توده سنگ (سازند) مورد نظر، به عنوان محیط حفاری، نقشی بسیار اساسی در تعیین میزان سرعت حفاری، استهلاک مته و اجزا مختلف سیستم حفاری و در نهایت میزان هزینه‌های عملیات حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا نقش مهمی در انتخاب سیستم حفاری متناسب با شرایط را خواهد داشت.

این تحقیق با توجه به اهمیت نقش پارامترهای ژئومکانیکی و مشکلات تامین اطلاعات مربوطه، به مطالعه تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگ بر روی انرژی ویژه حفاری خواهد پرداخت. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان مبنای یک روش جدید، جهت طبقه بندی مناسب حفاری‌های عمیق در سازندهای نفتی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

## ۱-۲- سابقه‌ی تحقیق

مفهوم انرژی ویژه در حفاری‌های عمیق در سنگ، برای اولین بار توسط تیل<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) به عنوان شاخصی جهت اندازه‌گیری کارایی مکانیکی ابزار خردایش سنگ پیشنهاد گردید. انرژی ویژه به عنوان انرژی مورد نیاز برای خردایش واحد حجم سنگ معرفی می‌شود که این مفهوم تاکنون به طور گسترده در مطالعات انجام شده در زمینه خردایش سنگ، به عنوان شاخص ارزیابی کارایی فرآیند خردایش و نیز به عنوان قابلیت حفاری در کاربردهای معدنی، عمرانی و نفتی مورد استفاده قرار گرفته است.

تیل دریافت که به حداقل رساندن انرژی ویژه به معنای افزایش بازدهی عملیات حفاری است. روشن است که در فرآیند حفاری، خرد کردن سنگ به قطعات کوچک‌تر از ابعاد مورد نظر، باعث مصرف انرژی بیشتر از مورد نیاز می‌شود (Teale, 1965). زئوچ<sup>۲</sup> و فینگر<sup>۳</sup> (۱۹۸۵) دریافتند که برش‌های اولیه جهت خردایش سنگ، انرژی بیشتری نسبت به برش‌های بعدی نیاز دارد. برش در سنگ‌های آسیب دیده، تراشه‌های بیشتری در هر سیکل کاری در مقایسه با سنگ سالم تولید خواهد کرد (Zeuch and Finger, 1985). ارسوی<sup>۴</sup> و والر<sup>۵</sup> (۱۹۹۷) آزمایش‌های متعددی برای تعیین انرژی ویژه حفاری انجام دادند. آنها مشاهده کردند که نرخ نفوذ بهینه هنگامی تحقق می‌یابد که سطح تماس ابزار و سنگ کاملاً عاری از خرده‌های حفاری باشد. از سوی دیگر، با افزایش بار روی مته نرخ نفوذ افزایش پیدا می‌کند. اما در صورتی که وزن روی مته بیش از اندازه افزایش یابد، ممکن است حفاری متوقف شود. انرژی ویژه بهینه حفاری، در وزن روی مته مناسب محقق می‌شود (Ersoy and Waller, 1997) کالهن<sup>۶</sup> و کای سیدو<sup>۷</sup> (۲۰۰۵) یک روش پیش بینی نرخ نفوذ مته، با استفاده از انرژی ویژه مکانیکی پیشنهاد کردند. این

---

<sup>1</sup>-Teale

<sup>2</sup>-Zeuch

<sup>3</sup>-Finger

<sup>4</sup>-Ersoy

<sup>5</sup>-Waller

<sup>6</sup>-Calhoun

<sup>7</sup>-Caicedo

روش در سال ۲۰۰۵ با استفاده از داده‌های واقعی حاصل از عملیات حفاری مورد آزمایش قرار گرفت (Caicedo and Calhoun, 2005).

همچنین در سال ۲۰۰۵، مطالعات گسترده‌ای توسط ویز<sup>۱</sup>، دوپریست<sup>۲</sup>، کدرلیتز<sup>۳</sup> در مورد استفاده از انرژی ویژه مکانیکی برای بهینه کردن نرخ نفوذ صورت گرفت. آنها با استفاده از داده‌های عملیات حفاری، انرژی ویژه مکانیکی را محاسبه نموده و سپس داده‌های نگاره‌های چاه را با استفاده از انرژی ویژه اصلاح کردند. از آن جا که بهبود راندمان حفاری از طریق پایش مقادیر انرژی ویژه مکانیکی امکان پذیر شد، مقادیر انرژی ویژه به عنوان یک شاخص مناسب جهت پایش داده‌های عملیاتی حفاری مد نظر قرار گرفت (Koederlitz and Weis, 2005), (DuPriest and Koederlitz, 2005).

هارمیک<sup>۴</sup> (۲۰۱۱) آزمایش‌های متعددی را برای بهینه کردن پارامترهای حفاری انجام داد. وی با بهینه کردن پارامترهای قابل کنترل توانست انرژی ویژه مکانیکی را کمینه کرده و در نهایت موجبات بیشینه شدن نرخ نفوذ فراهم شد (Harmick, 2011). آمادی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تکنیک‌های بهینه سازی انرژی ویژه مکانیکی، هزینه حفاری را کاهش داد. او از طریق پیش بینی نرخ نفوذ بهینه بر اساس اطلاعات عملیات حفاری و اطلاعات ذاتی سازند، انرژی ویژه را بهینه کرد. هنگامی که داده‌های چاه‌های مجاور به صورت دقیق موجود است، می‌توان از مقادیر نرخ نفوذ به عنوان مبنایی برای بهینه کردن هزینه‌ها کمک گرفت (Amadi et al, 2012).

لاوسری پایبون<sup>۶</sup> و همکاران در سال (۲۰۱۵) با استفاده از مقادیر انرژی ویژه و داده‌های نگاره چاه، انتخاب محل مشبک کاری چاه را بدون توجه به وزن کم فشار انجام دادند (Laosripaiboon et al., 2015). وی و همکاران (۲۰۱۵) مطالعات خود را بر روی انرژی ویژه حفاری و ضربه‌های جت حفار

---

<sup>1</sup> - Weis

<sup>2</sup> - DuPriest

<sup>3</sup> - Koederlitz

<sup>4</sup> - Hamrick

<sup>5</sup> - Amadi

<sup>6</sup> -Laosripaiboon

انجام دادند. آنها از طریق تجزیه، تحلیل و آزمایشات نظری، مدل انرژی ویژه مکانیکی را برای حفاری به وسیله ضربه جت ارائه دادند (Wei et al., 2015).

### ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

از آنجا که بازدهی عملیات حفاری می‌تواند توسط انرژی ویژه مکانیکی (MSE) صورت پذیرد، حفاری-هایی که با انرژی ویژه کمتر، حجم بیشتری از سنگ را خرد کند، مطلوب‌تر خواهند بود (Harmick, 2011). با توجه به مشکلاتی که در ارزیابی کارایی حفاری وجود دارد، روش انرژی ویژه خردایش سنگ یک روش عملی است که می‌توان از آن برای ارزیابی عملیات حفاری استفاده نمود (Rabia et al, 1987).

ابزار حفاری با ایجاد ترک‌های کششی و برشی موجب خردایش سنگ می‌شوند. بازدهی این عملیات به عوامل بسیار متنوعی من جمله نحوه انتقال انرژی بین مته و سنگ بستگی دارد. از آن جایی که نرخ نفوذ به شدت تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی می‌باشد، هنگامی که انرژی ویژه با نرخ نفوذ مقایسه می‌شود، حساسیت کمتر آن نسبت به تغییرات (RPM) و (WOB) آن را به شاخص مناسبی برای ارزیابی راندمان حفاری و انتخاب مته مبدل می‌سازد (Rabia, 1985).

افزایش راندمان حفاری و در نتیجه کاهش هزینه‌ها، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی شرکت‌های فعال در زمینه حفاری است. تا به حال تحقیقات زیادی روی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی انرژی ویژه حفاری صورت گرفته است اما همواره عدم توجه کافی به تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگ در این تحقیقات احساس شده است. به همین جهت ایجاد یک مدل ژئومکانیکی می‌تواند در برآورد قابلیت حفاری و تعیین مقدار بهینه پارامترهای موثر در حفاری چاه‌ها نقش مهمی ایفا کند. مدل ژئومکانیکی شامل اطلاعات مرتبط با زمین شناسی، خواص مکانیک سنگ، فشار منفذی و تنش‌های منطقه است که به عنوان گامی اساسی جهت مطالعات مختلفی از جمله افزایش سرعت حفاری، شکست هیدرولیک،

پایداری چاه، پتانسیل تولید ماسه و... در نظر گرفته می‌شود. عدم توجه به تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ در حفاری و نیز بازدهی، ضرورت انجام چنین تحقیقی را بیش از پیش روشن می‌سازد.

## ۱-۴-اهداف و روش انجام تحقیق

همواره یافتن مدلی که بتواند ارتباط خوبی بین پارامترهای موثر بر انرژی ویژه حفاری را برقرار سازد از اهمیت بسزایی برخوردار است. این مدل می‌تواند نمایانگر شاخص حفاری سازندهای نفتی و ابزاری برای تخمین میزان انرژی ویژه حفاری برای استفاده سایر چاه‌ها در میدان مورد نظر باشد. طبق مطالعات کتابخانه‌ای به عمل آمده پارامترهای ژئومکانیکی موثر بر انرژی ویژه شامل مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، فشار منفذی، ساینده‌گی، سختی و... می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی مانند صوتی فشاری، صوتی برشی، چگالی، تخلخل و... پارامترهای ژئومکانیکی برآورد خواهند شد. با تخمین این پارامترها و به وسیله نرم افزار پتروفیزیکی (IP)، نگاره‌های ژئومکانیکی برای چاه مورد نظر تعیین می‌شود. سپس ستون‌های مربوط به داده‌های حفاری که شامل سرعت چرخش دورانی، وزن روی مته، نرخ سیال حفاری، گشتاور و... متناظر با عمق چاه است، آماده سازی می‌شود.

در نهایت یک بانک اطلاعاتی متشکل از لیتولوژی سازند، خصوصیات ژئومکانیکی مخزن و پارامترهای عملیاتی حفاری بر حسب عمق و همچنین نوع و سایز مته برای هر یک از چاه‌های مورد مطالعه تشکیل می‌شود (جدول ۱-۱). سپس بر اساس پارامترهای حفاری موجود، مقدار انرژی ویژه آن محاسبه می‌گردد. با استفاده تکنیک‌های آماری مناسب ترین مدل برای بررسی ارتباط بین انرژی ویژه حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ انتخاب و مورد استفاده قرار خواهد گرفت. سپس با استفاده از روش‌های هوشمند (مانند الگوریتم SOM)، شاخص انرژی ویژه خوشه بندی شده و در نهایت پارامترهای مکانیکی

سنگ با استفاده از این شاخص، طبقه بندی می‌شود. برای اعتبار سنجی طبقه بندی از الگوریتم K-

means استفاده شده و نتایج آن با نتایج الگوریتم SOM مقایسه خواهد شد.

جدول شماره (۱-۱): نمونه پایگاه داده‌های حفاری و ژئومکانیکی.

| Geomechanical data | n            |  |        |
|--------------------|--------------|--|--------|
|                    | $\phi$       |  |        |
| c                  |              |  |        |
| $\nu$              |              |  |        |
| E                  |              |  |        |
| UCS                |              |  |        |
| Operational data   | UBD/ OBD     |  |        |
|                    | Mud lost     |  |        |
|                    | Mud pressure |  |        |
|                    | SE           |  |        |
|                    | ROP          |  |        |
|                    | Torque       |  |        |
|                    | RPM          |  |        |
|                    | WOB          |  |        |
| Bit Type/size size |              |  |        |
| lithology          |              |  |        |
| depth              |              |  |        |
|                    | Well 1       |  | Well 2 |

## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در این فصل کلیات موضوع تحقیق، ضرورت و اهداف مورد بررسی قرار گرفت. در فصل دوم به انواع روش‌های حفاری و مته‌های حفاری اشاره می‌شود. سپس تاثیر عوامل موثر بر روی انرژی ویژه حفاری مورد بررسی قرار گرفته که خود به دو دسته کلی عوامل محیطی و عوامل غیر محیطی تفکیک شده است. در فصل سوم اطلاعات میدان نفتی و چاه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرند سپس نتایج مدل سازی ژئومکانیکی چاه‌های مورد نظر انجام شده و نتایج آن ارائه می‌شود. این فصل شامل برآورد پارامترهای مکانیکی سنگ از قبیل مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و... می‌باشد. در فصل چهارم پس از تشکیل بانک اطلاعات داده‌های حفاری و ژئومکانیکی، ابتدا مقیاس داده‌ها به تناسب اصلاح شده و سپس ارتباط بین پارامترهای ژئومکانیکی و انرژی ویژه حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از برازش غیر خطی مدل‌های ترکیبی، تخمین انرژی ویژه بر اساس اطلاعات ارائه شده است. در فصل پنجم با استفاده از روش‌های هوشمند، طبقه بندی سازندهای نفتی بر اساس انرژی ویژه حفاری انجام گرفته و با استفاده از الگوریتم SOM، انرژی ویژه حفاری خوشه‌بندی شده است و بر این

اساس خصوصیات مکانیکی سنگ بر مبنای این شاخص طبقه‌بندی گردید. همچنین بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری و مقادیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ (از قبیل مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و چسبندگی) با دقت قابل قبولی پیش بینی شده است. در نهایت در فصل آخر نتایج و پیشنهادات حاصل از این تحقیق ارائه شده است.

## فصل دوم

# عوامل موثر بر انرژی ویژه حفاری

## ۲-۱- مقدمه

نرخ بالای تقاضای نفت خام، منجر به حفاری صدها کیلومتر چاه قائم و جهت دار در اعماق زیاد در سرتاسر جهان شده است. نظر به اینکه آغاز عملیات بهره برداری از یک میدان به سرعت و کیفیت عملیات حفاری وابسته است، هرچه زمان و هزینه‌های اولیه احداث چاه کمتر باشد، نرخ بازگشت سرمایه و سودآوری بهره‌برداری بیشتر خواهد بود. لذا می‌توان با کاهش وقفه و مشکلات قابل پیش‌بینی در مسیر حفاری، این فرایند را تا حد امکان کم هزینه و سریع نمود. در این تحقیق سعی بر این است که با توجه به اهمیت درک عملیات حفاری و روش‌های ارزیابی عملکرد سیستم، عوامل موثر بر انرژی ویژه حفاری در سازندها مورد بررسی قرار گیرد. عوامل تاثیر گذار بر انرژی ویژه حفاری به دو دسته عوامل کنترلی (عملیاتی) و عوامل غیر کنترلی (محیطی من جمله خصوصیات سنگ) تقسیم بندی می‌شود.

در این فصل ابتدا به تعریف اجمالی انواع روش‌های حفاری پرداخته شده است. سپس مته‌های مختلف حفاری و مکانیزم خردایش مته‌ها تشریح شده و درنهایت عوامل موثر بر انرژی ویژه حفاری مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۲- حفاری

انسان‌ها از زمان‌های دور به منظور دسترسی با آب و مواد معدنی اقدام به انجام عملیات حفاری می‌کردند. مخازن زیرزمینی نفت و گاز در اعماق زمین قرار گرفته‌اند. برای استفاده از این منابع زیرزمینی، باید به نحوی این مخازن دسترسی پیدا کرد که حفاری چاه یکی از عملی‌ترین راه حل موجود است. تا قبل از حفر نخستین چاه نفتی به کمک روش‌های نوین، این ماده مهم فقط از چشمه‌های سطحی نفت، یا چاه‌های کم عمق که به وسیله دست حفر می‌شد، استخراج می‌گردید.

در ۲۴ ژانویه سال ۱۸۵۹ میلادی برای اولین بار یک چاه که به منظور استخراج نفت حفر شده بود، به طور محدود به نفت رسید و بدین ترتیب برای نخستین بار در تاریخ، این ماده حیاتی از اعماق زمین بیرون آورده شد. این چاه توسط سرهنگ ادوین دریک<sup>۱</sup> در ایالت پنسیلوانیای امریکا حفر گردید. اولین حلقه چاه اکتشافی در ایران در سال ۱۲۸۷ در عمق ۳۶۰ متری و با عمق ۲۰ متری توسط شرکت اکتشاف دارسی، در نفتون فوران کرد. با احداث این چاه، میدان نفتی عظیم مسجد سلیمان کشف شد که این خود آغاز توسعه صنعت نفت ایران و خاورمیانه گردید. بعد از این تاریخ عملیات حفاری به منظور توسعه منطقه مسجد سلیمان و نیز اکتشاف منابع جدید نفت گسترش پیدا کرد. در سال ۱۳۰۴ میدان نفتی هفت گل و سپس میدان‌های گچساران، آغاچاری و پازنان کشف شد. عملیات حفاری تا سال ۱۳۳۲ توسط شرکت نفت ایران و انگلیس انجام می‌شد. پس از کودتای ۲۸ مرداد و انعقاد قرارداد کنسرسیوم، حضور شرکت‌های حفاری به میزان قابل توجهی در ایران افزایش یافت و در سال ۱۳۵۱ با گران شدن قیمت نفت تعداد دکل‌های حفاری به طور ناگهانی رو به فزونی گذاشت. روش‌های حفاری به دو دسته کلی حفاری ضربه‌ای و حفاری دورانی تقسیم بندی می‌شود. در ادامه به اجمال انواع روش‌های حفاری پرداخته می‌شوند.

## ۲-۲-۱- حفاری ضربه‌ای (کابلی)<sup>۲</sup>

این نوع حفاری که جزء متداول ترین و رایج ترین روش‌های حفاری در گذشته محسوب می‌شود. در این روش مته حفاری به صورت سقوط آزاد به داخل چاه رها شده و در اثر برخورد با سنگ، فرآیند خردایش صورت گرفته و خرده سنگ‌ها را بوسیله گل حفاری از داخل چاه خارج می‌نمایند. از عمده مشکلات این روش متوقف شدن حفاری در هنگام خارج نمودن خرده سنگ‌ها از داخل چاه است. در حال حاضر از این روش به منظور حفاری چاه‌های آب کم عمق استفاده شده و عملاً برای حفر چاه‌های نفت و گاز غیر قابل استفاده می‌باشد (Nguyen, 1996). عمیق‌ترین چاهی که تاکنون با روش ضربه‌ای

---

<sup>۱</sup> -Edwin Drake

<sup>۲</sup> -Cable Tool drilling

حفر شده است در ایالت نیویورک توسط شرکت گاز طبیعی ایالت نیویورک طی سال ۱۹۴۸-۱۹۵۳ تا عمق ۱۱۱۴۵ فوت حفر شد که به نفت نرسید. از مزیت‌های این روش، اقتصادی بودن برای تعبیه گمانه‌های با قطر زیاد (تا ۶۰ سانتیمتر) در انواع مصالح است. از محدودیت‌های این روش حفاری، پایین بودن سرعت حفاری در خاک‌های بسیار مستحکم و نیز سنگ می‌باشد. البته این مساله را باید یادآور شد که در این روش مغزه‌گیری و نمونه‌گیری سنگ امکان‌پذیر نیست.

## ۲-۲-۲- حفاری دورانی<sup>۱</sup>

ابداع روش حفاری دورانی، جهشی در صنعت حفاری به وجود آورد. در اواخر قرن نوزدهم، گونه‌های ساده این روش به کار گرفته شد اما با طی شدن روند تکاملی و پیشرفت سریع در ساخت دکل‌ها، مته‌ها و پمپ‌ها در سال ۱۹۳۰، تقریباً به طور کامل جانشین حفاری ضربه‌ای برای چاه‌های نفت شدند. فرایند حفاری دورانی توسط مجموعه‌ای از ابزار و تجهیزات که به طور کلی دکل حفاری نامیده می‌شود صورت می‌گیرد. در این روش حفاری، از مته‌های متنوعی استفاده می‌شود. این مته‌ها با حرکت چرخشی روی سنگ، باعث خرد شدن و ساییده شدن آن می‌شوند. انرژی لازم برای به چرخش در آوردن مته، توسط سیستم دورانی تامین می‌گردد. از مهم‌ترین عواملی که باعث بالا بردن سرعت حفاری می‌شود گل حفاری است که در عملیات حفاری به هنگام چرخش مته از نازل‌ها موجود بر روی مته خارج شده و به دلیل داشتن خاصیت حمل‌کنندگی، کنده‌های حفاری<sup>۲</sup> را به سطح زمین می‌آورد. گل حفاری یکی از عوامل موثر در بالا رفتن سرعت حفاری است، همچنین از گیر کردن مته در چاه جلوگیری می‌کند (Osguie, 2007).

---

<sup>۱</sup> -Rotary Drilling

<sup>۲</sup> - Cutting

## ۲-۳- مته‌های حفاری

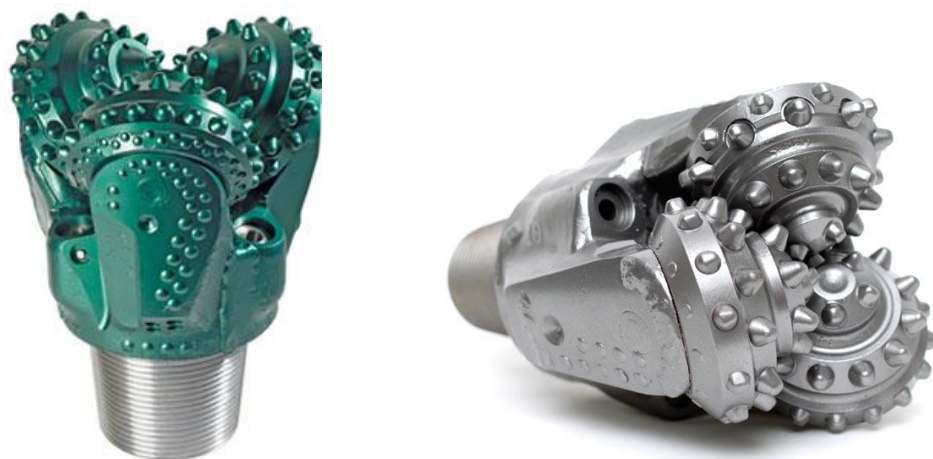
مته یکی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در عملیات حفاری یک چاه نفت یا گاز است. اگر مته بطور درست انتخاب و مورد استفاده قرار بگیرد، مطمئناً در کاهش هزینه چاه مؤثر خواهد بود. گزینش مته با توجه به نوع سازند، نقش هیدرولیک مته و کنترل صحیح پارامترهای عملیاتی (از قبیل وزن روی مته، گشتاور و سرعت چرخش مته) از جمله مسائلی هستند که بایستی به صورت هماهنگ در بکارگیری مته مد نظر قرار گیرند. علاوه بر موارد فوق، دانش و مهارت و تجربه حفار، در بکارگیری فاکتورهای فوق الذکر مهم می‌باشد.

بر طبق برآوردهای انجام شده، هزینه مته‌های استفاده شده در فرآیند حفاری یک چاه، حدود ۱/۶ درصد هزینه احداث یک چاه می‌باشد ولی بر طبق بررسی‌های انجام شده در دو چاه میدان کوپال در جنوب کشور هزینه مته در حدود ۲ تا ۳ درصد بوده است. بنابراین کنترل انتخاب صحیح مته و فراهم آوردن شرایط بهینه استفاده از آن، در کاهش هزینه‌ها نقش اساسی خواهد داشت (حیدری، ۱۳۸۵).

انتخاب نوع مته، بستگی به ویژگی‌های سنگی دارد که باید حفاری شود. به علاوه عوامل اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. مته‌ها به دو گروه اصلی مته‌های کاجی و مته‌های تیغه ثابت تقسیم‌بندی می‌شوند. مته‌های تیغه‌ای جهت حفاری شیل‌های نرم و سنگ‌های جوان رسوبی، مته‌های دندان‌های برای حفاری شیل‌های سخت و ماسه سنگ مناسب می‌باشند. در ادامه به تشریح انواع مته‌های حفاری پرداخته می‌شود.

## ۲-۳-۱- مته کاجی

این مته‌ها دارای بخش‌های کاج<sup>۱</sup> شکل می‌باشند که این بخش‌ها حول محور خود می‌چرخند. در اثر بار اعمالی روی مته، دندانه‌ها و یا دکمه‌های روی کاج، در سنگ فرو رفته و باعث خرد شدن سنگ می‌شود. مته‌های سه کاجه<sup>۲</sup> معروف‌ترین نوع مته‌های کاجی می‌باشد که بیشترین متر از حفاری شده در دنیا به وسیله این گونه مته‌ها انجام گرفته شده است. این نوع مته‌ها به دو صورت دندانه‌ای و دکمه‌ای تقسیم می‌شوند. در مته دکمه‌ای، دکمه‌ها یا دندانه‌های تنگستن کارباید در حرارت خیلی بالا روی بدنه کاج تعبیه می‌شوند. با پیشرفت فناوری استخراج نفت در اعماق زیاد، ضرورت تولید مته‌های مستحکم جهت حفاری در اعماق زیاد بیش از پیش آشکار شد. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از مته‌های دکمه‌ای نشان داده شده است (Osguie, 2007).



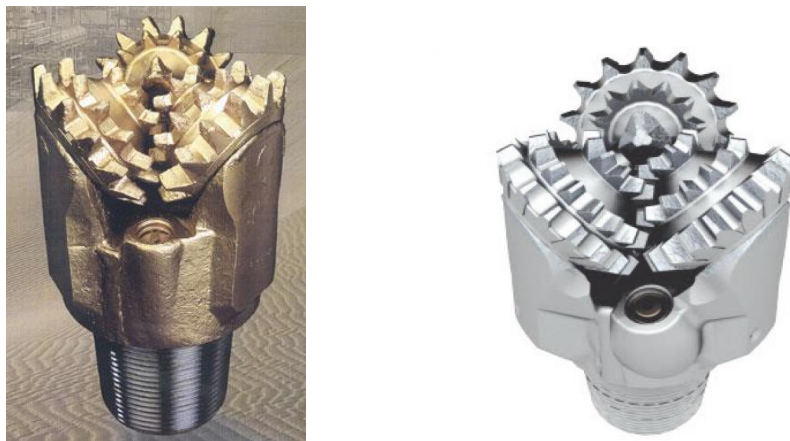
شکل (۱-۲): نمونه‌ای از مته‌های سه کاجی دکمه‌ای (Schlumberger, 2002)

---

<sup>۱</sup> -Cone

<sup>۲</sup> -Tre Cone

اما مته‌های دندانه‌ای در تمام سازندها قابل استفاده اند اما بیشتر برای حفاری در سنگ نرم و متوسط توصیه می‌شوند. بعضی از انواع آن در سازند سخت نیز به کار برده می‌شوند. در این نوع مته‌ها، دندانه‌های مته از جنس خود کاج بوده و به صورت یک پارچه ساخته شده است. جهت جلوگیری از فرسایش دندانه‌های مته، سطح آن توسط پودر تنگستن کارباید سخت کاری<sup>۱</sup> می‌شود (Nguyen, 1996). در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از مته‌های دندانه‌ای نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): نمونه‌ای از مته‌های سه کاجی دندانه‌ای (Schlumberger, 2002)

## ۲-۳-۲- مته‌های تیغه ثابت<sup>۲</sup>

مته‌های تیغه ثابت که به درگ بیت<sup>۳</sup> نیز معروف هستند، شامل قطعات برنده ثابتی هستند که با بدنه مته به صورت یک پارچه بوده و مستقیماً با چرخیدن رشته حفاری به گردش در می‌آیند. این نوع مته‌ها به دلیل نداشتن بخش چرخنده می‌تواند در چاه‌های با قطر کم نیز استفاده شود. این نوع مته‌ها به چهار دسته؛ مته تیغه فولادی، مته الماس طبیعی، مته الماس مصنوعی و مته الماس پایدار دسته بندی می‌شوند (Parssel, 2001).

<sup>۱</sup>-Hard Facing

<sup>۲</sup>-Fixed Cutter Bit

<sup>۳</sup>-Drag Bit

مته‌های تیغه فولادی را می‌توان قدیمی‌ترین نوع مته‌ها به حساب آورد. این نوع مته‌ها دارای تیغه هستند و فاقد کاج می‌باشند. از این نوع مته در سازندهای نرم استفاده می‌شود. ممکن است دارای یک، دو، سه و یا چند تیغه باشند و معمولاً به نام مته دم ماهی<sup>۱</sup> نیز مشهور هستند. از این نوع مته‌ها در حفاری‌های کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرند. عدم امکان اعمال وزن زیاد روی مته و عدم استفاده در سازندهای سخت باعث شد که مته‌های الماس طبیعی<sup>۲</sup> و مته الماس مصنوعی<sup>۳</sup> جایگزین این مته‌ها شوند (Combes, 1964). در شکل (۳-۲) نمونه‌ای از مته تیغه فولادی نمایش داده شده است.



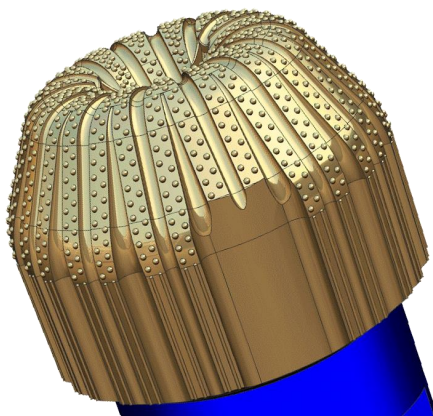
شکل (۳-۲): مته تیغه فولادی (Combes, 1964)

مته‌های الماس طبیعی از یک فلز بسیار سخت درست شده که دانه‌های الماس در شرایط خاصی از دما و فشار در آن تعبیه می‌شوند. متراژ حفاری این نوع مته‌ها خیلی بیشتر از مته‌های کاجی می‌باشد. هر چند که از نظر قیمت چندین برابر مته‌های معمولی می‌باشد ولی به علت عمر بالا در بعضی مواقع از نظر اقتصادی به صرفه می‌باشند. مته‌های الماس معمولی دارای دانه‌های الماس بسیار ریز است که در سطح مته کاشته می‌شوند. همچنین بدنه آنها از فولاد و تنگستن کارباید ساخته می‌شود (Prassl, 2001). در شکل (۴-۲) نمونه‌ای از مته الماس طبیعی نشان داده شده است.

<sup>1</sup> - Fish Tail

<sup>2</sup> - Natural Diamond Bit

<sup>3</sup> - Polycrystalline Diamond Compact (PDC)



شکل (۲-۴): مته الماس معمولی (Schlumberger, 2002)

هزینه زیاد مته‌های الماس طبیعی باعث تولید مته‌های الماس مصنوعی شد. بدنه این مته‌ها می‌تواند فولادی یا ماتریسی باشد. ساخت بدنه فولادی نسبت به بدنه ماتریسی آسان‌تر است. همچنین مته بدنه ماتریسی مقاومت سایشی بالاتری دارد. بدنه این مته به صورت قالب درست می‌شود و تیغه‌های برنده با نظم روی آن تعبیه می‌شود.

مته‌های الماس مصنوعی پایدار حرارتی<sup>۱</sup> (TSP) جدیدترین فناوری در این مته‌ها می‌باشد. مته‌های TSP نسبت به مته PDC پایداری حرارتی بالاتری دارد. بنابراین در سازندهای خیلی سخت و خیلی ساینده کاربرد بهتری نسبت به مته‌های PDC دارند. از نظر اندازه و شکل نیز این مته‌ها بیشتر شبیه مته‌های الماس طبیعی هستند (Prassl, 2001; حیدری، ۱۳۸۵). در شکل (۲-۵) دو نوع مته PDC و TSP نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> - Thermally Stable PDC (TSP)



(ب)



(الف)

شکل (۲-۵): مته الماس مصنوعی - شکل (الف): مته PDC و شکل (ب): مته TSP (Schlumberger, 2002)

## ۲-۴- ساز و کار شکست

کاربرد اصلی مته‌ها در فرآیند حفاری، انتقال انرژی به سنگ جهت خردایش آن می‌باشد. از آنجایی که مکانیسم شکست سنگ، بسته به خصوصیات رفتاری سازند و شرایط درون چاهی می‌تواند به روش‌های متعددی رخ دهد، طراحی مته‌ها به صورت‌های بسیار متنوعی انجام می‌گیرد. برای ارزیابی نحوه طراحی و انتخاب مته، ابتدا ضروری است که چگونگی شکستن سنگ و نحوه تاثیر شرایط سازند بر عملکرد حفاری مورد توجه قرار گیرد.

فشار همه جانبه تاثیر بسزایی در رفتار سنگ دارد. در شرایط تعادلی، فشار همه جانبه در ته چاه، با تفاضل بین فشار حاصل از ستون سیال حفاری درون چاه و فشار سازند یا فشار منفذی سنگ<sup>۱</sup> مساوی است. این کمیت معمولاً با عبارت تفاضل فشار<sup>۲</sup> یا  $\Delta P$  بیان می‌شود. مقدار  $\Delta P$  وضعیت چاه را از نظر فروتعادلی، تعادلی یا فراتعادلی مشخص می‌کند. هر یک از این حالات چاه، به همراه دما و سرعت تغییر شکل، مکانیسم‌های شکست سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد که این نیز به نوبه خود بر سرعت حفاری

<sup>۱</sup> - Pore Pressure

<sup>۲</sup> - Differential Pressure

تاثیر می‌گذارد. سرعت حفاری هم‌چنین تحت تاثیر پدیده فشاری دیگری به نام نیروی نگهدارنده تراشه<sup>۱</sup> قرار دارد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که گل حفاری یا ذرات ریز سیال حفاری، ترک‌ها یا شکستگی‌های حاصل از عملکرد مته حفاری را مسدود می‌کنند. نیروی نگهدارنده تراشه با حاصل ضرب مساحت تراشه در اختلاف فشار برابر است (Bourgoyne, 1986). در ادامه به اختصار انواع وضعیت چاه را از در حالت فروتعادلی، تعادلی یا فراتعادلی تشریح می‌شود.

## ۲-۴-۱- حفاری فرو تعادلی<sup>۲</sup>

اگر فشار وارد از طرف ستون سیال کم‌تر از فشار هیدرواستاتیک باشد، اختلاف فشار کوچکتر از صفر است و چاه در وضعیت زیر فشار تعادل حفاری می‌شود. این وضعیت در زمان حفاری با هوا، آب شیرین یا گل‌هایی با وزن کم‌تر از ۸/۶ ppg (۶۴/۳ pcf) رخ می‌دهد.

در شرایط حفاری زیر فشار تعادل، سنگ از خود رفتار تُردی و شکنندگی نشان می‌دهد. در واقع سنگ مقاومت شکست نسبتاً پایینی دارد و به راحتی می‌شکند. از آنجایی که سطح سنگ در حالت کشش است، عملاً تحت نیروی تراکمی مته منفجر می‌شود. فشار رو به پایینی جهت تقویت نیروی نگهدارنده تراشه وجود ندارد؛ بنابراین، حفاری مجدد یا سایش مجدد کنده‌های تازه حفاری شده به ندرت به وجود می‌آیند. این مساله باعث دستیابی به سرعت حفاری نسبتاً بالایی می‌گردد. اگرچه فواید این روش آشکار هستند، اما تنها در مناطقی عملی و کاربردی است که سیالات سازند به راحتی قابل کنترل باشد و خطر فوران در میان نباشد. در این حالت فشار گل و فشار هیدرواستاتیک یک مقدار منفی می‌باشد (عادل زاده، ۱۳۸۵). رابطه (۱-۲) برای حفاری در فرو تعادلی برقرار است.

$$P_{\text{mud}} - P_f < 0$$

رابطه (۱-۲)

<sup>۱</sup> - Chip Hold - Down

<sup>۲</sup> - Underbalanced Condition

## ۲-۴-۲- حفاری در حالت تعادلی

اگر فشار ستون سیال درون چاه با فشار هیدرواستاتیک برابر باشد، چاه در حالت تعادل است. این حالت عموماً هنگام حفاری با آب نمک یا گل با وزن ۸/۶ ppg اتفاق می‌افتد. تحت شرایط تعادل، سنگ هنوز در حالت شکنندگی قرار دارد و نسبتاً راحت می‌شکند. به طور کلی سرعت حفاری از آن‌چه که در شرایط زیر فشار تعادل دیده می‌شود کمتر است، چرا که از نیروی نگهدارنده تراشه ناشی از نیروهای پیوستگی بین ذرات سنگ همراه تداخل ناشی از گرانی سیال اثر کمی وجود دارد. حفاری تعادلی همانند حفاری فرو تعادل با خطر فراوان همراه است و تنها زمانی می‌تواند کاربرد داشته باشد که افزایش ناگهانی در فشار سازند پیش‌بینی نشود. در این حالت اختلاف فشار هیدرواستاتیک گل و فشار سازند صفر می‌باشد (Bourgoyne, 1986).

$$P_{\text{mud}} - P_f = 0$$

رابطه (۲-۲)

در عمل، فشار هیدرواستاتیک گل را در حدود ۲۰۰ psi از فشار سازند بالاتر اعمال می‌کنند.

## ۲-۴-۳- حفاری فرا تعادلی<sup>۱</sup>

در حفاری بالای فشار تعادل یا حالت فرا تعادلی، فشار ستون گل از فشار هیدرواستاتیک بیشتر می‌شود. در مناطقی که شیب فشار نرمال باشد و وزن گل از ۸/۶ ppg تجاوز کند، این حالت اتفاق می‌افتد. به دلایل ایمنی، حفاری فرا تعادلی در بیشتر مناطق رایج است. هنگامی که در یک چاه با حالت فرا تعادلی، اختلاف فشار افزایش می‌یابد مقاومت و قابلیت شکل‌پذیری سنگ در چاه به تدریج افزایش می‌یابد. بنابراین فرآیند انتشار ترک‌های ایجاد شده توسط مته را کند می‌شود (Bourgoyne, 1986).

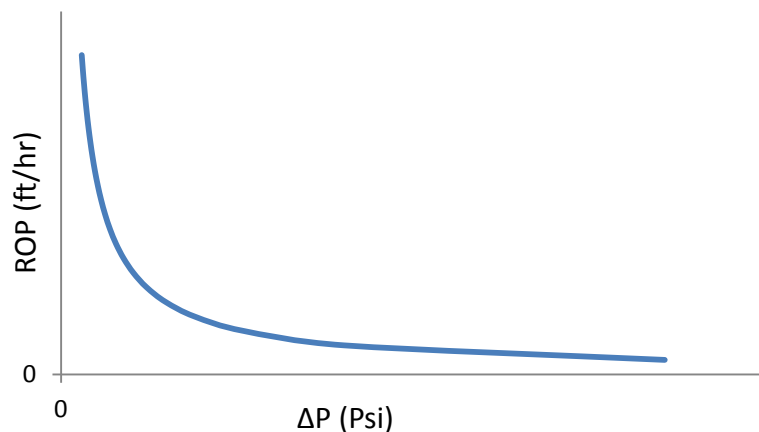
---

<sup>1</sup> - Overbalanced Condition

اختلاف فشاری بین ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ پام در لوییزیانای جنوبی، تگزاس جنوبی، دریای شمال، خاورمیانه و دیگر مخازن قدیمی یک امر عادی است. مقاومت برجای سنگ و نیروی نگهدارنده تراشه بسیار بالای ناشی از این اختلاف فشار زیاد، موجب می‌شود که مته‌های کاج‌دار به راحتی نتوانند این سازندها را که در حالت عادی نرم و قابل حفاری هستند، به سرعت حفاری کنند. عملیات حفاری، مستلزم این است که وزن گل  $0.4 - 0.2$  ppg از وزن گل معادل فشار هیدرواستاتیک بیش‌تر باشد. در حالی که این کار ضریب اطمینانی برای کنترل چاه تامین می‌کند می‌تواند موجب تفاضل فشارهای زیاد شود که به نوبه خود، سرعت حفاری را به شدت محدود می‌کند. شکل (۶-۲) سرعت حفاری در برابر اختلاف فشار را نشان می‌دهد. این شکل نشان دهنده اثر فاحشی است که حالت فراتعادلی بر سرعت حفاری دارد. با ثابت نگه داشتن کلیه شرایط دیگر، افزایش تفاضل فشار موجب کاهش سرعت حفاری و افزایش اثر نیروی نگهدارنده تراشه می‌گردد. در حالت فرا تعادلی، اختلاف فشار گل و فشار هیدرواستاتیک مثبت می‌باشد (Bourgoyne, 1986; عادل زاده، ۱۳۸۵).

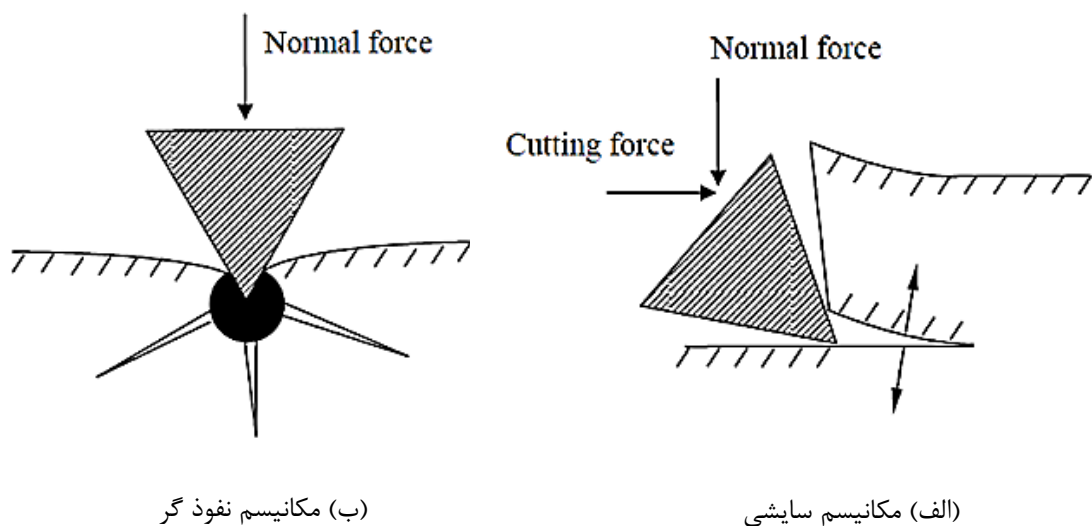
$$P_{\text{mud}} - P_f > 0$$

رابطه (۳-۲)



شکل (۶-۲): اثر اختلاف فشار بر سرعت حفاری در حالت فرا تعادلی (عادل زاده، ۱۳۸۵).

اساساً فرآیند خردایش سنگ توسط مته به دو دسته مکانیزم نفوذگر و سایشی (گوه‌ای) تقسیم بندی می‌شود که توسط ضربه، چرخش و سایش در مته‌ها ایجاد می‌شود. شکست سنگ در مته‌های با کاربرد مکانیزم نفوذگر ناشی از نیروی عمودی وارده بر سطح سنگ است. در مته‌های با مکانیزم سایشی، عمدتاً نیروی افقی موازی با سطح باعث ایجاد شکست می‌شود (Yao, 2012؛ نوروزی، ۱۳۹۳). این مکانیزم شکست در شکل (۷-۲) نشان داده شده است.



شکل (۷-۲): مکانیزم شکست سنگ (الف) - مکانیزم سایشی (ب) - مکانیزم نفوذگر (Yao, 2012).

مته‌های مختلف با توجه به نحوه‌ی ساخت و عملکرد آن‌ها ممکن است از مکانیزم‌های متعددی در فرآیند حفاری بهره‌مند شوند. مته‌های غلطکی مخروطی دارای مکانیزم نفوذگر هستند. اما مته‌های سایشی با توجه به نحوه اعمال نیرو به سطح سنگ، مکانیزم سایش صورت می‌پذیرد (Hartman et al, 1992). در فرآیند خردایش سنگ با توجه به میزان انرژی مصرفی جهت خردایش حجم مشخصی از سنگ، پارامتری به نام انرژی ویژه مکانیکی تعریف می‌شود که این پارامتر، عامل تاثیرگذاری در فرآیند حفاری است (Thuro, 1997).

## ۲-۵- انرژی ویژه حفاری

انرژی ویژه حفاری به عنوان انرژی مورد نیاز برای خردایش واحد حجم سنگ معرفی می‌شود که با واحدهای psi و یا Mpa سنجیده می‌شود. این مفهوم تاکنون به طور گسترده در مطالعات و کارهای انجام شده بر روی سنگ، به عنوان شاخص ارزیابی کارایی خردایش و جهت سنجش قابلیت حفاری، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که انرژی ویژه از پارامترهای حفاری روزانه بدست می‌آید در نتیجه در هر بازه حفاری می‌توان انرژی ویژه حفاری را بدست آورد (Teale, 1965). با ارزیابی این پارامتر، می‌توان عملکرد حفاری در هر سازند و تاثیر پارامترهای حفاری و عملیاتی را در حفاری توصیف کرد. عوامل تاثیر گذار بر روی انرژی ویژه به دو دسته کلی عوامل قابل کنترل و عوامل محیطی تقسیم بندی می‌شوند:

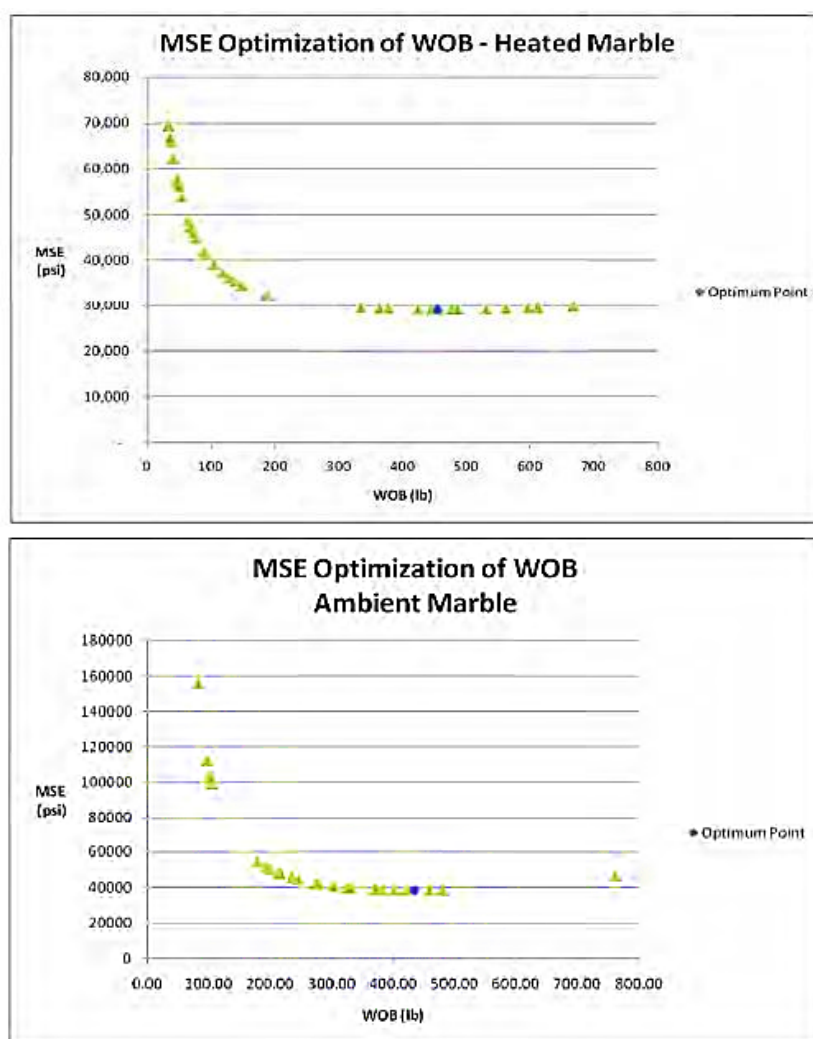
- عوامل قابل کنترل یا عملیاتی: تغییر این عوامل در اختیار عامل انسانی می‌باشد.
- عوامل غیرقابل کنترل یا عوامل محیطی: عوامل مرتبط با محیط حفاری یعنی سازندهای تشکیل دهنده زمین (به ویژه پارامترهای مکانیکی سنگ) بر عملیات حفاری تاثیر گذاشته و حفار در تغییر آنها نقشی ندارد. در ادامه تاثیر عوامل عملیاتی و محیطی بر انرژی ویژه حفاری تشریح می‌شود.

## ۲-۵-۱- تاثیر عوامل قابل کنترل بر انرژی ویژه حفاری

عوامل قابل کنترل در اختیار عامل انسانی بوده و نسبت به پارامترهای محیطی، از قابلیت انعطاف بیشتری برخوردارند. بر اساس شرایط اقتصادی و زمین شناسی، کنترل این پارامترها در دسترس‌تر خواهد بود (Osguie 2007; Tuna Eren 2010). انتخاب بهینه مقادیر قابل کنترل باعث می‌شود تا با حداقل انرژی بهترین عملکرد حفاری حاصل شود. کنترل مقادیر پارامترهای عملیاتی در کاهش مخاطرات عملیات حفاری تاثیر بسزایی دارد. مهم‌ترین این عوامل به شرح زیر می‌باشد:

## - وزن روی مته

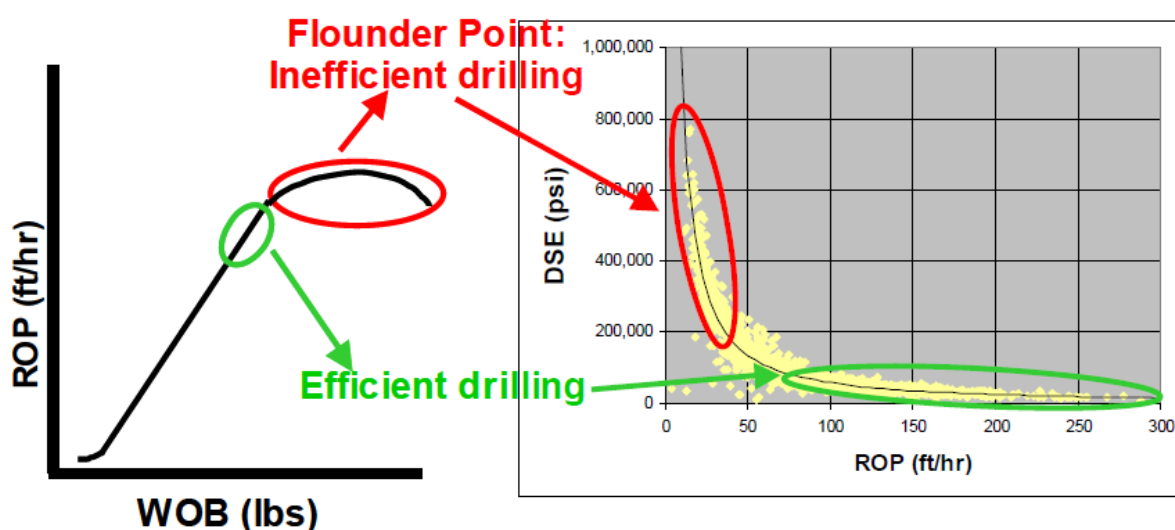
هارمیک آزمایش‌های خود را بروی سنگ مارن انجام داد و نتیجه گرفت که با افزایش وزن روی مته، انرژی ویژه کاهش می‌یابد. او نتیجه گرفت برای بهینه کردن انرژی ویژه مکانیکی، یک وزن روی مته مناسب وجود دارد. همچنین افزایش بیش از حد وزن روی مته باعث گیر افتادن مته و توقف حفاری می‌شود. در شکل (۸-۲) رابطه بین انرژی ویژه مکانیکی و وزن روی مته نمایش داده شده است (Harmick, 2011).



شکل (۸-۲): رابطه بین انرژی ویژه مکانیکی و وزن روی مته (Harmick, 2011).

## – نرخ نفوذ

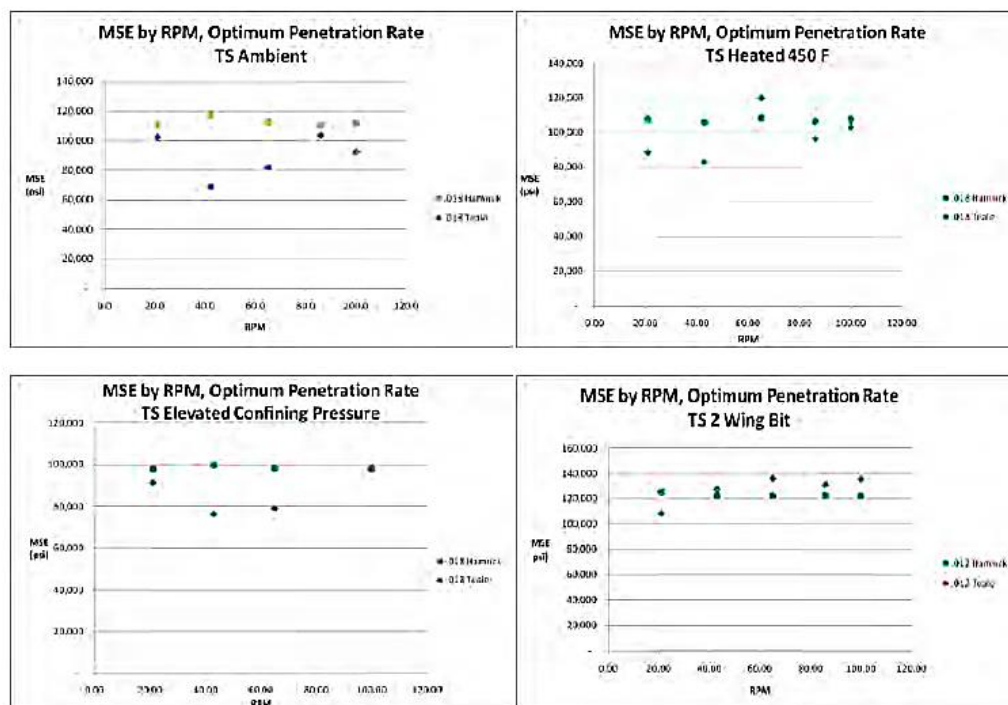
با توجه به رابطه انرژی ویژه حفاری، نرخ نفوذ رابطه معکوس با انرژی ویژه حفاری دارد. هر چه نرخ نفوذ افزایش پیدا کند انرژی ویژه کاهش پیدا می‌کند. نرخ نفوذ اگر بیشتر از مقدار بهینه باشد، باعث گیر کردن مته می‌شود و اگر کمتر از مقدار بهینه باشد باعث سایش مته می‌شود. بهترین راندمان حفاری زمانی حاصل می‌شود که با کمترین انرژی بیشترین نرخ نفوذ ایجاد شود. در شکل (۹-۲) رابطه بین نرخ نفوذ و انرژی ویژه حفاری نشان داده شده است (Armenta, 2008).



شکل (۹-۲): رابطه بین نرخ نفوذ و انرژی ویژه حفاری (Armenta, 2008).

## – سرعت دوران مته

نتایج آزمایش‌های هارمیک بر روی سنگ‌های متفاوت نشان داد که مقدار انرژی ویژه حفاری با میزان سرعت چرخش مته (در نرخ نفوذ بهینه) رابطه‌ای وجود ندارد یا رابطه معکوس با ضریب همبستگی پایین دارد. به این معنی که هرچه سرعت دوران مته افزایش یابد انرژی ویژه حفاری کاهش می‌یابد (Harmick, 2011). در شکل (۱۰-۲) رابطه بین سرعت چرخش مته و انرژی ویژه حفاری نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۰): رابطه بین انرژی ویژه و سرعت چرخش مته (Harmick, 2011).

## سیال حفاری -

مهم‌ترین وظیفه گل حفاری حمل خرده‌های حفاری به بیرون از چاه می‌باشد همچنین یکی از وظایف اصلی دیگر گل حفاری ایجاد شناوری برای وسایل و تجهیزات درون چاه می‌باشد؛ بدین صورت که با شناور شدن اجزا از وزن آن‌ها کاسته شده و در نتیجه از فشار وارد بر رشته‌های حفاری به مقدار زیاد کم می‌شود. همچنین دیگر وظیفه مهم گل ایجاد فشار بر چاه جهت جلوگیری از فوران چاه می‌باشد. انتخاب مناسب گل حفاری باعث می‌شود تا خرده‌های حفاری کمتری در داخل چاه باقی مانده و از خردایش مجدد خرده‌های حفاری داخل چاه جلوگیری به عمل می‌آید. در نتیجه باعث کارایی بیشتر مته و کاهش انرژی ویژه حفاری خواهد شد (Osguie, 2007).

## - هیدرولیک مته

نازل جت مته در بهبود شرایط حفاری 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 می‌تواند موجب بهبود شرایط حفاری و بهتر درگیر شدن مته با سازند حفاری می‌شود که این باعث انتقال انرژی بهتر از مته با سازند می‌شود. هیدرولیک مته تابع عواملی همانند توان هیدرولیک مته، فشار جت، عدد رینولدز و سایر پارامترها می‌باشد که بر نرخ نفوذ مته، انرژی ویژه حفاری تاثیر گذارند. پارامتر هیدرولیک از فاکتورهای متعددی مثل چینه‌شناسی، نوع مته، فشار ته چاه، شرایط دمایی تاثیر می‌پذیرد (Eren & Ozbayoglu, 2010; Wadlaw, 1969).

## ۲-۵-۲- تاثیر عوامل محیطی بر انرژی ویژه حفاری

تعدد فاکتورهای موثر در عملیات حفاری نشان دهنده پیچیدگی اندرکنش مته - سنگ می‌باشد که وابستگی پارامترها و غیرخطی 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 سایر بخش‌های سیستم حفاری و در نهایت هزینه‌های کلی حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا، کمک بسیار زیادی در بهبود بازدهی عملیات حفاری خواهد نمود (نوروزی، ۱۳۹۳).

تا به حال به جهت هزینه بالای چاه نگاری و عدم دسترسی کافی به مغزه‌های حفاری، مطالعات محدودی در راستای تاثیر عوامل محیطی در صنعت حفاری نفت انجام شده است (Nguyen, 1996). با توجه به مطالعات انجام شده و نیز منابع معتبر در مجموع می‌توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی موثر در سرعت حفاری را در سه گروه اصلی زیر طبقه بندی نمود (Hoseinie et al, 2008):

۱- مشخصات فیزیکی و کانی شناسی ماده سنگ

۲- مشخصات مکانیکی

۳- مشخصات ساختاری توده سنگ (درزه داری، چین خوردگی و گسلش)

تا کنون پژوهشگران متعددی نقش و تاثیر این پارامترها را تشریح نموده و رابطه هر پارامترها با انرژی ویژه و سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی تاثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی (پارامترهای مکانیک سنگی) پرداخته خواهد شد.

### – تاثیر مقاومت فشاری تک محوره بر انرژی ویژه حفاری

ردیش<sup>۱</sup> و یاسار<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۶ ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با انرژی ویژه حفاری مورد نیاز برای برش سنگ ها را مورد بررسی قرار دادند. بررسی نتایج حاصله را مطابق شکل (۲-۱۱) و رابطه (۲-۱) با هدف تعریف ارتباط بین انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوره برای انواع سنگ ها پیشنهاد کردند (Reddish & Yasar, 1996):

$$SE = 9.9278(UCS) - 73.791 \quad \text{رابطه (۲-۱)}$$

که در رابطه (۲-۱)، SE انرژی ویژه ( $MJ/m^2$ ) و UCS مقاومت فشاری تک محوری (Mpa) است.

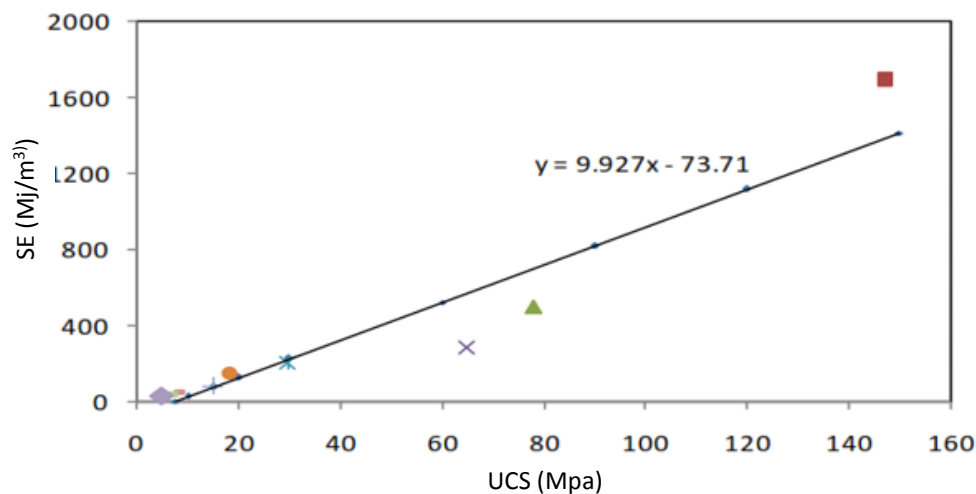
یاسار و ردیش آزمایش‌های خورد را بر روی ماسه سنگ و سیلت استون انجام داده و گزارش کردند که یک رابطه تقریباً خطی بین انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوری سنگ برقرار است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که راندمان حفاری به عواملی مثل مقاومت فشاری تک محوری، اندازه ذرات، نحوه خردایش سنگ (حفاری به صورت ضربه ای یا دورانی باشد)، شکل هندسی و میزان تیزی مته بستگی دارد.

---

<sup>۱</sup> -Reddish

<sup>۲</sup> -Yasar

از بین این عوامل میزان تیز بودن مته و توان مورد استفاده برای خردایش (حفاری) مهم‌ترین عوامل موثر بر نتایج این آزمون هستند (Reddish & Yasar, 1996).

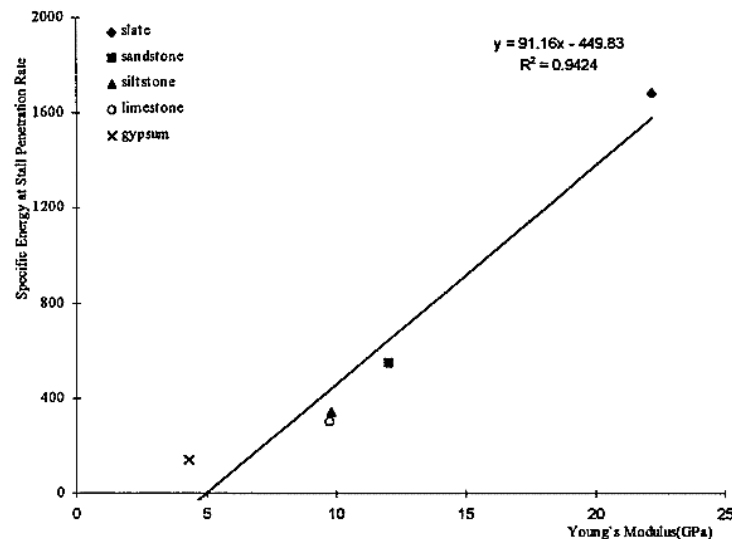


شکل (۱۱-۲) : تاثیر انرژی ویژه در برابر مقاومت فشاری تک محوری (Reddish & Yasar, 1996).

### – تاثیر مدول یانگ بر انرژی ویژه

همانگونه که قبلاً بیان شد انرژی ویژه به طور عمده به ویژگی رفتاری سنگ، میزان شکستگی سنگ و ظرفیت تجهیزات مورد استفاده بستگی دارد. راه‌های زیادی برای تعیین انرژی ویژه حفاری وجود دارد اما نتایج حاصله، فقط در همان مکانسیم خردایش قابل مقایسه است. ردیش و یاسار با استفاده از دستگاه شبیه ساز حفاری، مقدار انرژی ویژه را در آزمایشگاه محاسبه کردند. آن‌ها رابطه انرژی ویژه با مدول یانگ بدست آمده از ماسه سنگ و سیلت استون بدست آوردند و مشاهد نمودند که بین مقدار انرژی ویژه حفاری و مقدار مدول یانگ یک رابطه خطی برقرار است (Reddish & Yasar, 1996).

در واقع مدول یانگ بیانگر میزان سفتی و صلبیت یک جسم را نشان می‌دهد هر چقدر مقدار مدول یانگ بیشتر باشد بیانگر این است که سنگ مورد نظر مستحکم‌تر است و صلبیت بیشتری دارد لذا مقدار انرژی ویژه بیشتری برای حفاری آن مورد نیاز است. شکل (۲-۱۲) نشان می‌دهد یک رابطه تقریباً خطی بین مقدار مدول یانگ و انرژی ویژه حفاری برقرار است (Reddish & Yasar, 1996).



شکل (۲-۱۲): رابطه بین مقدار مدول یانگ و انرژی ویژه حفاری (Reddish & Yasar, 1996).

### –تأثیر مقدار فشار محصور کننده بر انرژی ویژه

آزمایش‌های تیله نشان داد که مقدار انرژی ویژه مکانیکی از لحاظ عددی بسیار نزدیک به مقدار مقاومت فشاری تک محوری در شرایط حفاری ایده‌آل بوده است. به هر حال این آزمون در شرایط اتمسفر انجام گرفته است. در فرآیندهای واقعی حفاری، مقدار انرژی ویژه حفاری بسیار نزدیک به مقدار فشار محصور کننده خواهد شد. به عبارتی زمانی که انرژی مصرفی استفاده شده برای تخریب یک حجم سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد و هیچ نوع افت انرژی نداشته باشد، حفاری مورد نظر در شرایط بهینه حفاری خواهد بود (Xuyue Chen, 2014).

ژیو چن<sup>۱</sup> از آزمایش‌های خود نتیجه گرفت که مقدار انرژی ویژه مکانیکی ارتباط مستقیم با فشار محصور کننده دارد. او همچنین نشان داد که مقدار انرژی ویژه مکانیکی می‌تواند برابر مقدار فشار محصور کننده سنگ باشد. به منظور بررسی دقت مدل انرژی ویژه مکانیکی، پارامترهای واقعی حفاری را می‌توان برای محاسبه مقدار انرژی ویژه مکانیکی مورد استفاده قرار داد. سپس مقدار انرژی ویژه مکانیکی با مقدار فشار محصور کننده منطقه مورد مقایسه قرار بگیرد. بر اساس روابط (۲-۲) و (۳-۲)، می‌توان مقدار فشار محصور کننده را به شرح ذیل محاسبه نمود (Xuyue Chen, 2014):

$$CCS = UCS + D_p + 2D_p \times \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

در شرایط حفاری چاه برای سنگ‌های نفوذپذیر، مقدار فشار محصور کننده در ته چاه می‌تواند به صورت زیر بیان شود (Xuyue Chen, 2014):

$$D_p = ECD_p - P_p \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

CCS = مقدار مقاومت فشار محصور کننده بر حسب psi

UCS = مقدار مقاومت فشاری تک محوره بر حسب psi

$D_p$  = تفاضل فشار ناشی از وزن گل و فشار منفذی

$\varnothing$  = زاویه اصطکاک داخلی سنگ بر حسب درجه

$ECD_p$  = مقدار فشار ناشی از وزن گل معادل ( $ECD_p$  که بر حسب ppg است) بر حسب psi

$P_p$  = مقدار فشار منفذی بر حسب psi

<sup>1</sup> - Xuyue Chen

<sup>2</sup> -Equivalent Circulating Density (ppg)

## -تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر انرژی ویژه

دتورنی<sup>۱</sup> و چی<sup>۲</sup> رابطه زیر را برای انرژی ویژه حفاری پیشنهاد دادند که از پارامترهای مقدار انرژی حفاری در شرایط اتمسفر، ضریب  $m$  و فشار در ته چاه تشکیل شده است، Detournay and Chee, (2002).

$$SE = \varepsilon_0 + mp_m \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

$\varepsilon_0$  برابر است با مقدار انرژی حفاری در شرایط اتمسفر بر حسب (psi) و ضریب  $m$  بین مقادیر ۳ تا ۲۰ تغییر می‌کند و  $P_m$  مقدار فشار در ته چاه می‌باشد.

کارشناسان صنعت حفاری اعتقاد دارند که عملکرد حفاری، به مقدار اختلاف فشار بین فشار ته چاهی و فشار منفذی بستگی دارد ( $P_m - P_0$ ). لذا رابطه مقدار انرژی ویژه به صورت زیر اصلاح شده است (Detournay and Chee, 2002).

$$SE = \varepsilon_0 + m(\theta, \varphi, \psi)(p_m - p_0) \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

که در آن ضریب  $m$  تابعی از زاویه‌های  $\theta$  (زاویه بین تیغه مته با خط قائم)،  $\varphi$  (زاویه اصطکاک داخلی سنگ و  $\psi$  (زاویه فصل مشترک بین تیغه ها و سطح سنگ) می‌باشد. با فرض بر اینکه مکانیسم شکست به صورت یک شکست برشی در جلو مته باشد مقدار ضریب  $m$  به صورت تجربی برابر است با:

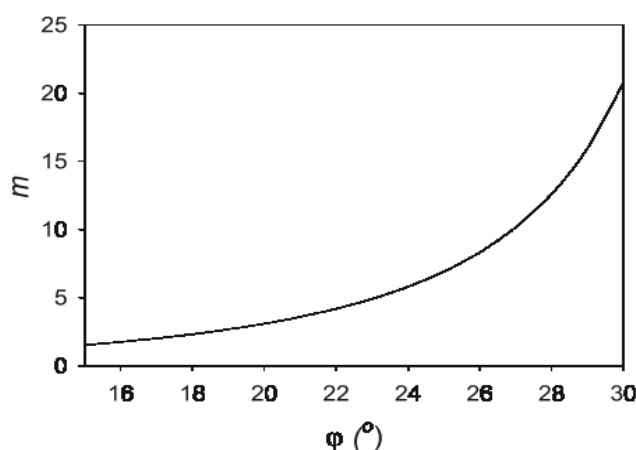
$$m = \frac{2 \sin \varphi \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\theta + \varphi + \psi)} \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

---

<sup>۱</sup> -Detournay

<sup>۲</sup> -Chee

مقدار ضریب  $m$  بین محدوده ۳ تا ۲۵ تغییر می‌کند. شکل (۲-۱۳) تابعی از مقدار  $m$  بر حسب  $\phi$  را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی سنگ مقدار ضریب  $m$  بیشتر می‌شود. با توجه به رابطه (۲-۶)، با افزایش ضریب  $m$  مقدار انرژی ویژه حفاری بیشتر می‌شود. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ مقاومت و استحکام سنگ بیشتر می‌شود، در نتیجه برای حفاری سنگ انرژی بیشتری نیاز خواهد داشت.



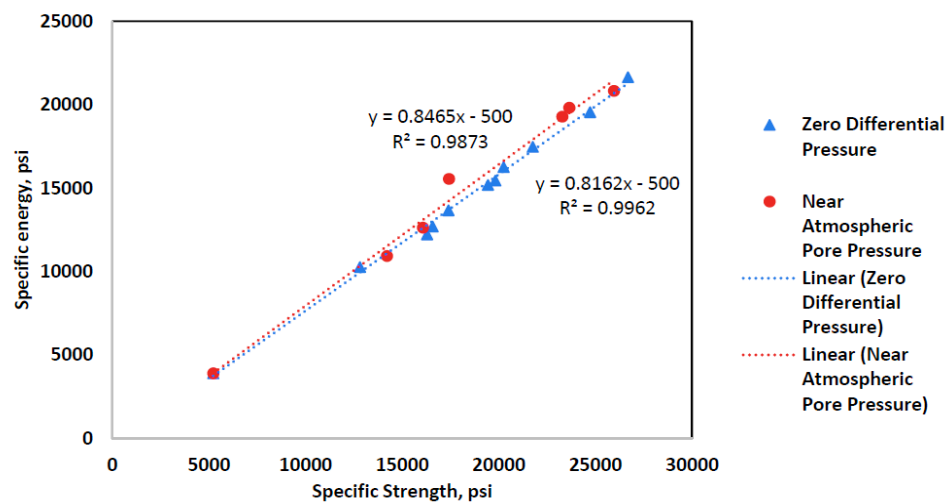
شکل (۲-۱۳) : تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر ثابت  $m$  (Detournay and Chee, 2002).

### -تاثیر فشار منفذی بر انرژی ویژه

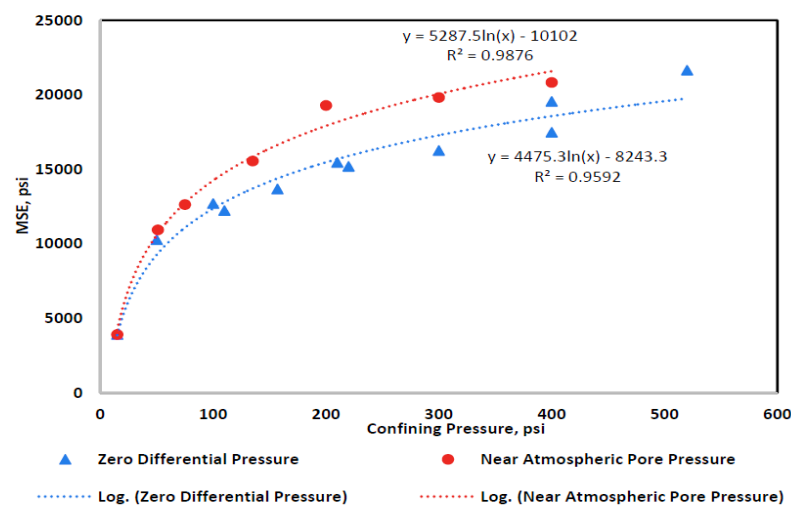
در صنعت حفاری انرژی مورد نیاز برای حفاری یک سازند به عوامل متعددی وابسته است که مقدار فشار منفذی یکی از این عوامل مهم و تاثیر گذار بر انرژی ویژه حفاری است. اگر مقدار فشار منفذی بیشتر شود، انرژی مورد نیاز برای حفاری کمتر خواهد شد. به دلیل اینکه فشار منفذی باعث می‌شود تنش مؤثر اصلی بر روی ماتریکس سنگ کاهش پیدا کند که کاهش تنش مؤثر سبب می‌شود تا سنگ به راحتی بشکند. البته مشاهده شده است که این اثر می‌تواند برای یک نوع سنگ با سنگ دیگر متفاوت باشد (Akbari & Mikasa, 2014). در موسسه تحقیقات حفاری دانشگاه تولسا<sup>۱</sup>، آزمایشی تحت عنوان تاثیر فشار منفذی بر انرژی ویژه انجام گرفت که با افزایش مقاومت فشار محصور کننده، انرژی ویژه مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. شکل (۲-۱۴) نشان می‌دهد زمانی که فشار منفذی وجود

<sup>1</sup> - Tulsa

داشته باشد، مقاومت ویژه سنگ کاهش پیدا می‌کند. شکل (۲-۱۵) اثر افزایش مقاومت فشاری محصور کننده بر مقدار انرژی ویژه مکانیکی در حالت وجود فشار منفذی و یا نبود فشار منفذی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲-۱۵) مشاهده می‌شود، انرژی ویژه در حضور فشار منفذی کاهش یافته است.



شکل (۲-۱۴) : رابطه بین مقدار مقاومت ویژه سنگ و انرژی ویژه- در حالت وجود فشار منفذی و یا نبود فشار منفذی (Akbari & Mikasa, 2014).



شکل (۲-۱۵) : رابطه بین مقدار فشار محصور کننده و انرژی ویژه- در حالت وجود فشار منفذی و یا نبود فشار منفذی (Akbari & Mikasa, 2014).

## ۲-۵-۳- مروری بر روابط انرژی ویژه حفاری

مطالعات متعددی در زمینه انرژی ویژه و پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ صورت گرفته است. مدل‌های متنوع نشان دهنده‌ی شرایط عملیاتی و محیطی مختلف در حفاری می‌باشند. در ادامه به تعدادی از تحقیقات مطرح در این زمینه اشاره خواهد شد.

تیله انرژی ویژه را کار انجام شده برای ایجاد حفره بر حجم سنگ (A.u) تعریف و مقدار آن برابر با  $(F.u + 2\pi NT)$  در نظر گرفت. رابطه (۲-۸) برای محاسبه انرژی ویژه پیشنهاد گردید (Teale, 1965):

$$SE = \frac{F}{A} + \left(\frac{2\pi}{A}\right) \left(\frac{RPM \times T}{ROP}\right) \quad \text{رابطه (۲-۸)}$$

او همچنین از زیر نویس های  $r$  و  $t$  برای مشخص کردن مقدار انرژی ویژه حفاری برای مولفه دورانی و فشاری به صورت زیر استفاده کرده است:

$$SE_t = \frac{F}{A} \quad \text{رابطه (۲-۹)}$$

$$SE_r = \left(\frac{2\pi}{A}\right) \left(\frac{RPM \times T}{ROP}\right) \quad \text{رابطه (۲-۱۰)}$$

$$SE = SE_t + SE_r \quad \text{رابطه (۲-۱۱)}$$

$SE$  انرژی ویژه (psi)

$WOB$  وزن روی مته (lb)

$RPM$  سرعت دوران رشته (r/min)

$ROP$  نرخ نفوذ (ft/h)

$D$  قطر مته (in)

$A$  سطح درگیر مته (in<sup>2</sup>)

$T$  گشتاور بر حسب (lb.ft)

رابیا<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) از انرژی ویژه به عنوان شاخصی برای نشان دادن تغییرات ویژگی‌های سازندها و تصحیح انتخاب مته براساس کارکرد حفاری استفاده نمود (Rabia, 1985). کار انجام شده در حفاری دورانی را می‌توان به دو بخش کار انجام شده توسط نیروی محوری (وزن روی مته) و کار انجام شده توسط مؤلفه دورانی (گشتاور) تقسیم نمود. بنابراین کل کار انجام شده توسط مته ( $W_{Total}$ ) با پیشروی به اندازه  $Y$  را می‌تواند به صورت رابطه (۲-۱۲) نوشت (Farrelly and Rabia, 1985):

$$W_{Total} = (WOB \times Y) + 2\pi \times RPM \left( \frac{T}{ROP} \right) Y \quad \text{رابطه (۲-۱۲)}$$

با توجه به این که حجم سنگ کنده شده برابر  $A \times Y$  خواهد بود، بنابراین انرژی ویژه ( $SE$ ) برابر خواهد شد با:

$$SE = \frac{WOB}{A} + \frac{2\pi \times RPM \times T}{A \times ROP} \quad \text{رابطه (۲-۱۳)}$$

$SE$  انرژی ویژه خردایش سنگ (psi)

$WOB$  وزن روی مته (lb)

$RPM$  سرعت دوران رشته (r/min)

$ROP$  نرخ نفوذ (ft/h)

$D$  قطر مته (in)

$A$  سطح درگیر مته ( $in^2$ )

$T$  گشتاور بر حسب (lb-ft)

فارلی<sup>۲</sup> و رابیا (۱۹۸۷) نشان دادند که می‌توان از انرژی ویژه به عنوان یکی از فاکتورهای مناسب در ارزیابی عملکرد مته و انتخاب آن استفاده نمود (Farrelly and Rabia, 1987). هانگ<sup>۳</sup> و وانگ<sup>۴</sup> (۱۹۹۷) (۱۹۹۷) با استفاده از مته‌های مغزه گیری، آزمایشی طراحی کردند که با کمک این آزمایش، معادله‌ای برای محاسبه انرژی ویژه مورد نیاز برای خردایش سنگ ارائه دادند. آن‌ها دریافتند که در مقادیر کم

---

<sup>۱</sup> -Rabia  
<sup>۲</sup> -Farrelly  
<sup>۳</sup> -Huang  
<sup>۴</sup> -Wang

وزن روی مته، انرژی توسط اصطکاک هدر می‌رود. همچنین افزایش وزن روی مته باعث افزایش گشتاور و کاهش انرژی ویژه می‌شود. آنها گزارش کردند که وزن روی مته بهینه‌ای وجود دارد که باعث بهینه شدن انرژی ویژه می‌شود.

آنها روابط (۲-۱۴) و (۲-۱۵) را برای محاسبه انرژی ویژه ارائه دادند (Huang and Wang, 1997).

$$T = 6.426 \times e^{0.0003W} \quad \text{رابطه (۲-۱۴)}$$

$$SE = \frac{8 \times T \times RPM}{(D_h^2 - D_c^2) \times ROP} \quad \text{رابطه (۲-۱۵)}$$

که در رابطه (۲-۱۵) ROP نرخ نفوذ بر حسب (m/h)، RPM سرعت دوران بر حسب (r/min)، WOB وزن روی مته بر حسب (N)، T گشتاور بر حسب (N-m)،  $D_h$  قطر چال بر حسب (m)،  $D_c$  قطر مغزه بر حسب (m) و SE انرژی ویژه خردایش بر حسب ( $MJ/m^3$ ).

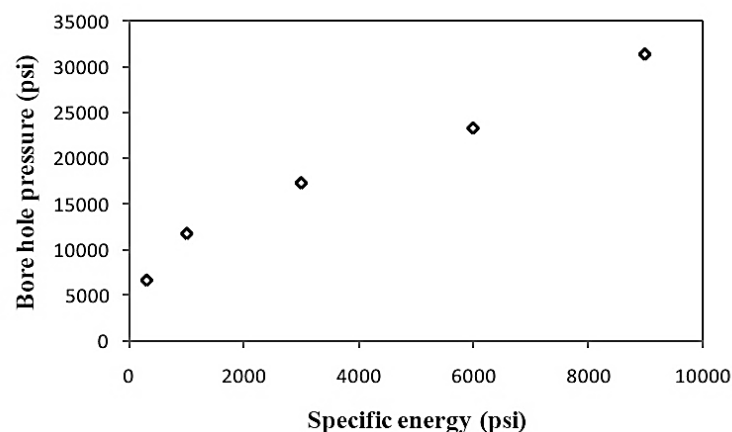
اسمیت (۱۹۹۸) یک رابطه برای انرژی ویژه حفاری بر حسب نیروهای عمل کننده بر روی تیغه‌ها، برای از بین بردن و خرد کردن حجمی از سنگ ارائه داد. کار انجام شده برای شکستن نمونه برابر با مقدار  $F_N D + F_T \pi D$  و مقدار حجم سنگ خرد شده برابر با  $\pi d D w$  است. از تقسیم مقدار کار انجام شده بر حجم سنگ خرد شده مقدار انرژی ویژه حاصل می‌شود. رابطه (۲-۱۶) معادله انرژی ویژه را نشان می‌دهد (Smith, 1998).

$$SE = \frac{F_N}{\pi d w} + \frac{F_T}{D w} \quad \text{رابطه (۲-۱۶)}$$

که در آن مقدار SE برابر مقدار انرژی ویژه (psi)،  $F_N$  مولفه نیروی عمودی تیغه بر روی نمونه،  $F_T$  مولفه نیروی مماسی تیغه بر روی نمونه،  $d$  قطر تیغه،  $D$  عمق برش،  $w$  مقدار عرض برش می‌باشد. او آزمایش خود را بر روی شیل کاتوسا<sup>۱</sup> برای مطالعه دلایل عملکرد پایین مته‌های PDC در اعماق انجام

<sup>۱</sup> - Catoosa

داد. این مطالعه برای یافتن علل راندمان پایین حفاری در شیل‌ها صورت گرفت. او آزمایش خود را بر روی یک نمونه به قطر ۳/۵ اینچی انجام داد. نیروهای مماسی و نرمال ثبت شد و سپس برای محاسبه مقدار انرژی مورد استفاده قرار گرفت. اسمیت<sup>۱</sup> همچنین ارتباط مستقیم بین انرژی ویژه و فشار داخل چاه<sup>۲</sup> به دست آورد. او نتیجه گرفت که مقدار انرژی ویژه با افزایش مقدار فشار ته چاه افزایش می‌یابد که این امر بیان کننده اهمیت فشار ته چاه بر عملکرد مته است. شکل (۲-۱۶) تغییرات مقدار انرژی ویژه را در برابر مقدار فشار داخل چاه نشان می‌دهد (Smith, 1998).



شکل (۲-۱۶): رابطه بین انرژی ویژه حفاری و فشار ته چاه (Smith, 1998).

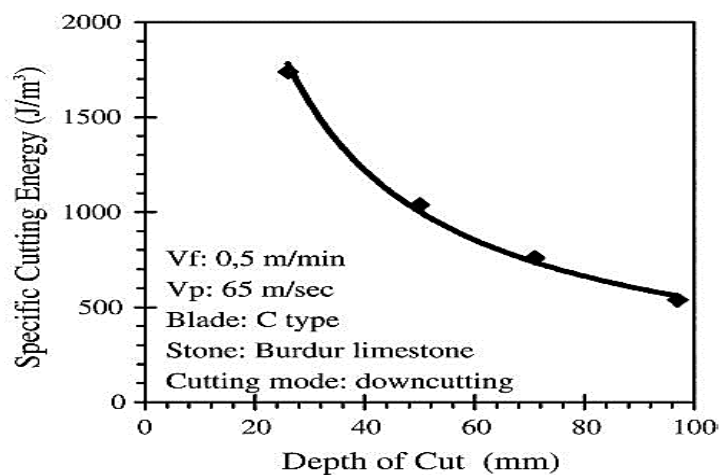
در اوایل سال ۲۰۰۰ منافع تجاری، باعث ورود تکنیک‌های پیچیده در صنعت حفاری شد و راندمان حفاری از طریق آزمون و خطا بهبود یافت. پیشرفت حفاری با نوآوری در تمام جنبه‌های صنعت حفاری از جمله طراحی مته، سیالات حفاری، طراحی دکل و بسیاری از پارامترهای دیگر ممکن شد. از انرژی ویژه مکانیکی به عنوان یک روش برای ارزیابی راندمان حفاری استفاده شد (Lambert et al, 2005). در سال ۲۰۰۳ ارسوی<sup>۳</sup> مطالعات خود را جهت بررسی عملکرد دستگاه برش دورانی سنگ را انجام داد و نتیجه گرفت که انرژی ویژه مکانیکی، می‌تواند برای ارزیابی میزان بهره‌وری خردایش سنگ استفاده

<sup>۱</sup> -Smith

<sup>۲</sup> -Wellbore pressure

<sup>۳</sup> -Ersoy

شود. او مشاهده کرد که افزایش عمق برش باعث کاهش انرژی ویژه می‌گردد. در شکل (۲-۱۷) تغییرات عمق برش حفاری نسبت به انرژی ویژه حفاری نشان داده شده است (Ersoy and Atici, 2004).



شکل (۲-۱۷): تغییرات عمق برش و انرژی ویژه خردایش (Ersoy and Atici, 2004).

آرمنتا<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۸ نتیجه گرفت که هیدرولیک مته حفاری عامل بسیار مهمی است که باید در معادله انرژی ویژه حفاری در نظر گرفته شود. بر این اساس هیدرولیک مته باعث افزایش نرخ نفوذ مته در سازند می‌شود. سنگ توسط انرژی مکانیکی خرد شده و خرده‌های حفاری توسط عوامل هیدرولیکی از مقابل مته کنار زده می‌شود. هر چقدر انتقال خرده‌ها سریع‌تر انجام گیرد انرژی کمتری برای حفاری مجدد آن‌ها لازم خواهد بود (Armenta, 2008).

در واقع مقدار انرژی ویژه حفاری (DSE) شامل پارامترهای فشاری، دورانی و هیدرولیک مته است و با مقدار انرژی ویژه مکانیکی (MSE) متفاوت است. زیرا در مدل MSE فاکتور هیدرولیک مته در نظر گرفته نمی‌شود. از انرژی ویژه حفاری می‌توان برای ارزیابی عملکرد حفاری استفاده کرد. مقدار فاکتور

<sup>۱</sup> -Armenta

هیدرولیک مته ( $\lambda$ ) عدد بدون بعد است که مطابق شکل (۲-۱۸) نسبت به قطر مته تعیین می‌شود.

آرمنتا، رابطه (۲-۱۷) برای محاسبه انرژی ویژه حفاری ارائه داد (Armenta, 2008):

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \times \pi \times RPM \times T}{A_B \times ROP} - \frac{1980000 \times \lambda \times HP_B}{ROP \times A_B} \quad \text{رابطه (۲-۱۷)}$$

که در آن؛

DSE انرژی ویژه حفاری (psi)

WOB وزن روی مته (lb)

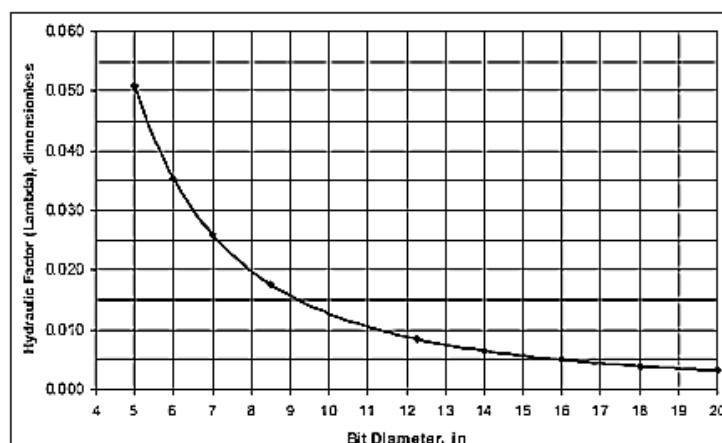
RPM سرعت دوران رشته حفاری (r/min)

ROP نرخ نفوذ (ft/h)

$A_B$  سطح درگیر مته ( $\text{in}^2$ )

T گشتاور بر حسب (lb-ft)

$\lambda$  عامل هیدرولیک مته



شکل (۲-۱۸): محاسبه مقدار فاکتور هیدرولیک مته ( $\lambda$ ) با توجه به مقدار قطر مته (Armenta, 2008).

## ۲-۶- جمع بندی

عملیات حفاری چاه نقش قابل توجهی در هزینه‌های اکتشاف و بهره برداری را در صنعت نفت به خود

اختصاص داده است. پیش بینی انرژی و زمان مورد نیاز برای خردایش سنگ و حفاری چاه، که منجر

به کنترل هزینه‌های عملیاتی می‌شود، بسیار حائز اهمیت است. با بهینه کردن انرژی حفاری، می‌توان

هزینه‌های حفاری یک چاه را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. انرژی ویژه حفاری به عوامل متعددی

وابسته است که به طور کلی می‌توان به دو دسته کلی، عوامل محیطی و عوامل عملیاتی تقسیم بندی

کرد. تعدد فاکتورهای موثر در عملیات حفاری نشان دهنده پیچیدگی تقابل مته و سنگ می باشد که موجب وابستگی بیشتر پارامترها نسبت به هم می شود و باعث غیر خطی شدن روابط بین آنها می شود. برای بررسی ارتباط این عوامل و انرژی ویژه حفاری ضروری است اطلاعات جامع از چاه مورد نظر در دسترس باشد. از آنجایی که انرژی ویژه از پارامترهای حفاری روزانه بدست می آید در نتیجه در هر بازه حفاری می توان انرژی ویژه را محاسبه نمود. با ارزیابی این پارامتر می توان عملکرد حفاری در هر سازند و تاثیر پارامترهای حفاری و عملیاتی را در حفاری توصیف کرد. ترکیب کانی شناسی و بافت، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ، نقش مهمی در فرآیند شکست و در نتیجه انرژی حفاری خواهد داشت. اما توجه بسیار کم به چنین عواملی در صنعت نفت و فقر اطلاعات در این زمینه، خلا بزرگی در بررسی مکانیزم خردایش ایجاد نموده است.



## فصل سوم

### مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌های

#### میدان مورد مطالعه

### ۳-۱- مقدمه

مخازن کربناته پس از مخازن ماسه سنگی مهم‌ترین و فراوان‌ترین مخازن نفتی و گازی را در جهان تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب شناسایی ساختارهای زمین شناسی این نوع از مخازن دارای اهمیت می‌باشد. میدان نفتی مارون دومین میدان بزرگ نفتی ایران است که دارای مخازن کربناته می‌باشد. کاربرد مدل‌سازی ژئومکانیکی در صنعت نفت و گاز به شدت در حال توسعه است. استفاده از مدل‌سازی ژئومکانیکی به منظور پایداری و حفاری چاه، طراحی شکست هیدرولیکی ضروری هست. به همین سبب مدل‌سازی ژئومکانیکی که نمایشی عددی پیوسته از تغییرات خواص مکانیکی سنگ، تنش زمین و فشاری منفذی هست، نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها و بررسی فنی فرایندهای مرتبط خواهد داشت. برای ساخت مدل ژئومکانیکی به طور معمول از داده‌های نگارهای صوتی، تخلخل، چگالی و ... استفاده می‌شود. اما در نهایت مدل با استفاده از نتایج مطالعات آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه و نیز آزمایش‌های درون‌چاهی کالیبره می‌گردد.

روش‌های محدودی برای اندازه‌گیری خواص مکانیک سنگی برجا ابداع شده است. معمول‌ترین این روش‌ها، انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه و یا محاسبه خواص مکانیکی سنگ از نگاره‌های چاه پیمایی می‌باشد. در صنعت نفت، آزمایش مکانیک سنگی به عنوان آزمایش‌های گران قیمت شناخته شده، در نتیجه معمولاً تعداد محدودی از این نوع آزمایش‌ها انجام می‌شود. هم چنین اکثر آزمایش‌های ژئومکانیکی، آزمایش مخرب بوده و باعث از بین رفتن مغزه پس از انجام آزمایش می‌شوند. از این رو این آزمایش‌ها کمتر مورد استقبال قرار می‌گیرند. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، استفاده از نگاره‌ها جهت مدل‌سازی ژئومکانیکی و برآورد خواص مکانیکی سنگ توصیه می‌شود. در این فصل ابتدا توضیحات مختصری درباره میدان نفتی مارون و سازندهای تشکیل دهنده آن داده شده است. سپس شرایط چاه و مخزن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در ادامه پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول‌های الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی، نسبت پوآسون، مقاومت فشاری تک

محوری سازند، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی سازند از روی نگارهای پتروفیزیکی چاه به دست خواهد آمد. در نهایت نتایج حاصل از مدل سازی ژئومکانیکی به صورت کیفی نمایش داده می شود. نتایج مدل سازی ژئومکانیکی در فصل بعد، بانک اطلاعاتی برای یافتن روابط بین انرژی ویژه حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی خواهد شد. در ادامه میدان مورد مطالعه و سنگ شناسی سازند تشریح می شود.

### ۳-۲- معرفی میدان

میدان نفتی مارون دومین میدان بزرگ نفتی ایران است که در استان خوزستان، در شمال غربی شهرستان امیدیه و در فاصله ۴۰ کیلومتری از جنوب شرقی اهواز قرار دارد حجم ذخیره در جای نفت خام این میدان، معادل ۲۲ میلیارد بشکه برآورد می شود، همچنین حجم گاز در جای میدان مارون، معادل ۴۶۲/۱ تریلیون فوت مکعب می باشد. هم اکنون ظرفیت تولید نفت خام میدان مارون بطور متوسط معادل ۵۲۰ هزار بشکه در روز می باشد (رحیمی لرکی، ۱۳۸۸).

میدان مارون در سال ۱۳۴۲ کشف شد و بهره برداری از آن، در سال ۱۳۴۵ آغاز گشت. این میدان از دو مخزن نفتی بنام های آسماری و بنگستان و یک مخزن گاز طبیعی بنام خامی تشکیل شده است. مخزن خامی میدان مارون یکی از عمیق ترین مخازن گازی جهان است. میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین میدان های نفتی حوضه زاگرس است که در مجاورت میدان نفتی آغا جاری، میدان نفتی اهواز و میدان نفتی کوپال قرار گرفته است. این میدان با روند شمال غربی- جنوب شرقی در قسمت غربی تا مرکزی و روند شمال شرقی جنوب غربی در قسمت انتهایی شرقی امتداد یافته و دارای ۶۵ کیلومتر طول و بطور متوسط ۷ کیلومتر عرض می باشد. در ادامه مخزن های آسماری، بنگستان و خامی میدان مارون شرح داده خواهد شد:

### ۳-۲-۱- مخزن آسماری

مخزن آسماری میدان نفتی مارون یکی از مخازن بسیار بزرگ ایران در فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اهواز واقع و دارای ۶۵ کیلومتر طول و ۷ کیلومتر عرض می‌باشد. این مخزن نفتی به عنوان مخزن اصلی و عمده میدان مارون می‌باشد. حفاری اولین چاه در سال ۱۳۴۲ و بهره‌برداری از آن در سال ۱۳۴۵ آغاز و به تدریج تولید افزایش یافت.

تاکنون تعداد ۳۵۳ حلقه چاه در این مخزن، حفاری و از مجموع ۲۰۰ حلقه چاه فعال، روزانه حدود ۴۱۷ هزار بشکه نفت تولید می‌شود. (در حدود ۵۰ حلقه چاه از کل چاه‌های حفاری شده در این مخزن، در محدوده عملیاتی مارون-۲ متعلق به شرکت بهره‌برداری نفت و گاز آگاجاری می‌باشد) به منظور تثبیت فشار مخزن و جلوگیری از هرز رفت نفت و در نهایت افزایش برداشت نهایی، روزانه حدود ۹۵۰ میلیون فوت مکعب گاز از طریق ایستگاه تزریق گاز مارون به این مخزن تزریق می‌گردد.

### ۳-۲-۲- مخزن بنگستان

مخزن بنگستان میدان نفتی مارون در فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی اهواز واقع شده است. مخزن بنگستان مارون، دارای ۶۳ کیلومتر طول و ۵ کیلومتر عرض می‌باشد. چاه شماره (۱) مخزن بنگستان میدان مارون در سال ۱۳۴۷ حفاری شد و بهره‌برداری از این مخزن، از سال ۱۳۵۲ آغاز گردید. تاکنون ۱۷ حلقه چاه نفت در مخزن بنگستان میدان نفتی مارون حفاری شده است و ظرفیت تولید نفت خام این مخزن بطور متوسط معادل ۱۸/۵۰۰ بشکه در روز برآورد می‌شود.

### ۳-۲-۳- مخزن خامی

مخزن خامی میدان نفتی مارون، در ۶۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز واقع شده است، که یکی از پُر فشارترین مخازن گازی ایران و از عمیق‌ترین مخازن گازی جهان بشمار می‌آید. در سال ۱۳۸۵ نخستین حلقه چاه بر روی این مخزن، که فشار آن حدود ۱۵ هزار پوند بر اینچ مربع (پام) با حرارت بالای ۳۰۰ درجه فارنهایت و فشار جریانی ۶ هزار پام بود، حفاری و در مدار تولید قرار گرفت. تاکنون ۵ حلقه چاه

در این مخزن حفاری شده، که از ۳ حلقه چاه فعال آن، تولید صورت می‌گیرد. حجم گاز در جای مخزن گازی خامی میدان مارون، معادل ۴۶۲/۱ تریلیون فوت مکعب و ذخیره قابل برداشت آن معادل ۱۷۹/۱ تریلیون فوت مکعب برآورد می‌شود.

### ۳-۳- سنگ شناسی سازندها

سازندهای میدان مورد مطالعه شامل سازندهای آغاجاری، میشان، گچساران و آسماری می‌باشند.

جدول (۱-۳): ترتیب سازند در چاه شماره (۱).

| سازند   | سر سازند (متر) |
|---------|----------------|
| آغاجاری | ۱۴۵            |
| میشان   | ۲۴۸۰           |
| گچساران | ۲۷۶۰           |
| آسماری  | ۳۵۰۶           |

چاه شماره (۱) در میدان مارون در سازند مخزنی آسماری از عمق ۳۵۰۶ تا عمق ۳۸۷۵ با داشتن نگارهای چاه و اطلاعات عملیاتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

جدول (۲-۳): ترتیب سازند در چاه شماره (۲).

| سازند   | سر سازند (متر) |
|---------|----------------|
| آغاجاری | ۱              |
| میشان   | ۱۱۰۰           |
| گچساران | ۱۳۹۰           |
| آسماری  | ۲۷۰۰           |

چاه شماره (۲) در میدان مارون در سازند مخزنی آسماری از عمق ۲۷۰۰ تا عمق ۳۲۳۲ با داشتن نگارهای چاه و اطلاعات عملیاتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

اولین قدم برای ساخت مدل ژئومکانیکی انتخاب داده مناسب است. لذا لازم است در مورد انواع داده‌های موجود و کاربرد هر یک اطلاعات کافی وجود داشته باشد. مجموعه داده‌های موردنیاز به منظور ساخت

مدل ژئومکانیکی را میتوان به طور خلاصه در جدول (۳-۳) دسته بندی کرد (Al-Wardy and Portillo, 2010).

جدول (۳-۳): داده‌های موردنیاز جهت ساخت مدل (Al-Wardy and Portillo, 2010).

| نام داده                 | نوع داده             | پارامتر قابل محاسبه                                      |
|--------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
| RHOB/RHOZ                | نگار چگالی           | تنش قائم                                                 |
| DTC/DTS                  | نگار صوتی            | مقاومت سنگ و ویژگی‌های ارتجاعی                           |
| CGR                      | نگار پرتوی گاما      | حجم شیل                                                  |
| NPHI                     | نگار تخلخل نوترونی   | تخلخل                                                    |
| PEF                      | نگار جذب فوتوالکتریک | سنگ شناسی سازند                                          |
| LOT/XLOT/Mini frac Tests | آزمایش               | تنش افقی حداقل                                           |
| UCS/TCT                  | آزمایش               | مقاومت سنگ بکر و ویژگی‌های ارتجاعی                       |
| FMI/UBMI/OBMI/Caliper    | نگار تصویری          | جهت‌داری و توزیع شکستگی‌ها جهت تعیین راستای تنش‌های اصلی |
| RFT,MDT,XPT              | آزمایش               | فشار منفذی                                               |

### ۳-۴- نگارهای چاه پیمایی

نگارهای چاه پیمایی ابزارهای مفیدی برای تعیین خصوصیات فیزیکی سازندها و لایه‌های زمین محسوب می‌شوند. این نگارها، اطلاعات ضروری را جهت ارزیابی هیدروکربن، نوع سنگ و خصوصیات سیال درون سازند در اختیار قرار می‌دهد. همچنین این نگارها در برنامه‌ریزی مراحل حفاری و تکمیل چاه نقش بسزایی خواهند داشت. دقت و قدرت تفکیک نگارهای چاه نسبت به داده‌های لرزه‌ای بسیار بیشتر است. اما به این علت که در نگارهای چاه مقادیر به صورت نسبی از یک لایه اندازه‌گیری می‌شود، در تحلیل سنگ‌شناسی نیاز به داده‌های بیشتری می‌باشد (Pile et al, 2002؛ مرادزاده و قوامی، ۱۳۸۶؛ رحمانی، ۱۳۸۹). در ادامه به برخی از نگارهای مورد استفاده در این تحقیق اشاره می‌شود:

### ۳-۴-۱- نگار مقاومت ویژه<sup>۱</sup>

این نگار میزان مقاومت مواد در برابر جریان الکتریسیته را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه تابعی از شوری آب سازند، تخلخل موثر و مقدار هیدروکربن‌هایی که در فضای منفذ به تله افتاده است. همچنین اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه به هندسه منفذ، تنش سازند، ترکیب سنگ، سیالات میان روزنه‌ای و دما وابسته است.

### ۳-۴-۲- نگار پرتو گاما<sup>۲</sup>

نگار پرتو گاما مقدار رادیو اکتیویته طبیعی لایه‌های زمین در عمق‌های مختلف را اندازه‌گیری می‌کند. رادیو اکتیویته طبیعی، متلاشی شدن و تبدیل خود به خودی اتم‌های بعضی از ایزوتوپ‌های مشخص به ایزوتوپ‌های دیگر است. مواد رادیو اکتیویته تمایل دارند در شیل جمع شوند، به همین دلیل شیل‌ها دارای رادیو اکتیویته بالایی هستند.

پرتوهای گاما از عناصر مختلف اورانیوم، توریم و پتاسیم ساطع می‌گردند. برحسب اندازه‌گیری‌های مختلف رادیو اکتیویته گامای طبیعی، انواع نگارهای پرتو گاما به شرح زیر است:

- نگار پرتو گاما معروف به GR که پرتو گامای ساطع شده از سازند را به صورت کامل نمایش می‌دهد.
- نگار طیف سنج پرتو گاما معروف به SGR که نگاری مشابه نگار پرتو گامای کل (GR) تولید می‌کند.
- نگار گامای تصحیح شده (CGR)، پرتو گامای ساطع شده از اورانیوم را فیلتر می‌کند. از این رو مقدار اندازه‌گیری شده پرتو رادیو اکتیو گامای طبیعی توسط نگار CGR همیشه کمتر یا مساوی با مقدار بدست آمده از نگار SGR می‌باشد.

---

<sup>۱</sup>- Resistivity Log

<sup>۲</sup>- Gamma Ray

### ۳-۴-۳- نگار صوتی<sup>۱</sup>

این نگار، سرعت انتشار امواج در درون سازند را اندازه‌گیری می‌کند و زمان عبور موج از داخل ضخامت معینی از آن سازند را برحسب میکروثانیه بر فوت نشان می‌دهد. این روش به چاه نگاری صوتی معروف است. سرعت صوت به نوع سیمان، بافت سنگ، دما و فشار و ماهیت سیالات موجود در خلل و فرج سنگ بستگی دارد. به طور کلی امواج صوتی به دو دسته تراکمی و برشی تقسیم‌بندی می‌شوند.

- امواج تراکمی<sup>۲</sup>؛ این امواج که به امواج فشاری نیز معروفند، نوع خاصی از امواج طولی می‌باشند. این موج که به موازات جهت جابجایی ذرات گسترش می‌یابد قادر به عبور از گازها، مایعات و جامدات می‌باشد.

- امواج برشی<sup>۳</sup>؛ این امواج نوع خاصی از موج عرضی هستند و جهت انتشار آن‌ها عمود بر جهت جابجایی ذرات می‌باشد. این امواج در مواد جامد انتشار می‌یابند و به این دلیل به همراه امواج تراکمی نقش قابل توجهی را در تعیین خصوصیات مکانیکی سنگ ایفا می‌کنند.

### ۳-۴-۱- نگار نوترون<sup>۴</sup>

این نگار عمدتاً برای تعیین تخلخل سازند استفاده می‌شود. سازند تحت بمباران نوترونی قرار گرفته و پاسخ سازند نسبت به این بمباران نگاشته می‌شود. سپس از تعداد نوترون برگشتی تخلخل را حساب می‌کنند. ذرات نوترون در سازند با اتم‌های مواد تشکیل دهنده سازند و اتم‌های سیالات درون سازند برخورد می‌کنند و برحسب نوع اتمی که نوترون برخورد می‌کند انرژی خود را از دست می‌دهد. هر چقدر نوترون‌های کمتری به گیرنده برسد تخلخل بیشتری را نشان می‌دهد (Pile et al, 2002؛ مرادزاده و قوامی، ۱۳۸۶).

---

<sup>۱</sup>- Sonic log

<sup>۲</sup>- Compressive Wave

<sup>۳</sup>- Shear Wave

<sup>۴</sup>- Neutron Log

### ۳-۴-۵- نگار چگالی<sup>۱</sup>

ابزار اندازه‌گیری چگالی (جرم مخصوص) دارای چشمه تولید کننده اشعه گاما و آشکار گرهای اشعه گاما می‌باشد که در هنگام نمودارگیری در مقابل سازند قرار می‌گیرد. اشعه‌های ارسال شده از چشمه با پدیده‌های پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک به سازند برخورد می‌نمایند. این برخوردها در یک بازه زمانی مشخص گردیده و تعداد آن‌ها برای محاسبه چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pile et al, 2002).

### ۳-۴-۶- نگار کالیپر<sup>۲</sup>

زمانی که چاه حفر می‌شود لازم است تا قطر و شکل واقعی آن مشخص شود. هرچه قطر چاه زیادتر باشد، حجم گل در اطراف سوند افزایش یافته و در نهایت تاثیر آن بر نگار بیشتر خواهد بود. در صورتی که قطر چاه از حدی بیشتر باشد، ممکن است هیچ پاسخی از سازند به گیرنده نرسد. اکثر شرکت‌های چاه پیمایی مقادیر حداکثر و حداقل قطر چاه را برای هر ابزار پیشنهاد کرده‌اند. اندازه‌گیری قطر چاه توسط ابزار کالیپر صورت می‌گیرد. یک ابزار کالیپر به طور ساده از دو بازو استفاده می‌کند که به صورت قرینه در دو سوی ابزار واقع شده‌اند. بازوها به یک ولت‌متر متصل بوده و تغییر در قطر چاه که باعث باز و بسته شدن بازوها می‌شود در ولت‌متر منعکس می‌شود. این ابزار در شکل‌های ۴ و ۶ بازویی نیز کاربرد گسترده‌ای دارند (رحمانی، ۱۳۸۹).

---

<sup>۱</sup>- Density Log

<sup>۲</sup>- Calpier Log

### ۳-۵- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ

پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل ضرایب الاستیک، مقاومت سنگ، فشار منفذی و تنش‌های برجا نقشی اساسی را در روش‌های ارزیابی بهبود مخازن از قبیل پایداری چاه، تعیین میزان تولید ماسه، شکاف هیدرولیکی و غیره ایفا می‌کنند. با این وجود، از این پارامترها در عملیات حفاری و تخمین نرخ نفوذ و قابلیت حفاری کمتر استفاده شده است (Zobak, 2010).

پس از آماده سازی داده‌های اولیه، نوبت به محاسبه پارامترهای مکانیک سنگی فرا می‌رسد. انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری مستقیم، مطمئن‌ترین راه برای تعیین خواص سنگ است؛ اما به علت در دسترس نبودن مغزه‌های حفاری به خصوص در صنعت نفت، استفاده و گاهی تکیه به نتایج به دست آمده از روابط تجربی دینامیکی تنها راه تخمین خواص سنگ می‌باشد. از ویژگی‌های روابط تجربی می‌توان به ارزان بودن و پیوستگی داده‌ها در سرتاسر مخزن اشاره نمود (Yale 1994). در این بخش ابتدا به معرفی روابط تجربی موجود جهت محاسبه هر یک از پارامترها پرداخته و سپس نتایج محاسبات انجام شده برای چاه‌های مورد مطالعه نشان داده می‌شود.

### ۳-۵-۱- تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از آزمایش روی مغزه

آزمایش مقاومت فشاری تک محوره سنگ به عنوان یک آزمایش استاندارد بر روی یک نمونه استوانه‌ای شکل با نسبت طول به قطر معین می‌باشد که شرایط آن در اسانداردهای ISRM آورده شده است. با انجام این آزمایش که بر روی مغزه بدست آمده از درون چاه صورت می‌گیرد، مقاومت فشاری تک‌محوره و ثابت‌های ارتجاعی یعنی مدول یانگ و ضریب پواسون بدست می‌آیند. روش آزمایشگاهی دقیق‌ترین روش برای تعیین این قبیل پارامترها است ولی دو نقص عمده دارد:

تعداد مغزه‌های مورد آزمایش نسبت به طول چاه بسیار کم است و داده‌های ناپیوسته‌ای از خصوصیات سنگ در طول چاه به دست می‌آید. دستیابی به مغزه در صنعت نفت و گاز مشکل است. لذا انجام

آزمون آزمایشگاهی در مقیاس وسیع امکان پذیر نیست و فقط می توان داده های تخمین زده شده توسط روش های دیگر را با آن مقایسه و صحت آن را بررسی کرد.

### ۳-۵-۲- تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ با استفاده از داده های نگارها

در مواردی که در مخزن نمونه ای برای آزمون های آزمایشگاهی در دسترس نیست برای تعیین ویژگی های ژئومکانیکی از روابط تجربی استفاده می شود. این روابط تجربی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و داده های بدست آمده از نگارهای صوتی، چگالی، تخلخل و گاما را برقرار می کند. در شرایطی که مغزه در دسترس نیست، استفاده از برخی از این روابط اغلب تنها راه تخمین ویژگی های ژئومکانیکی در بسیاری از موقعیت ها است.

#### -پارامترهای الاستیک

خصوصیات الاستیک سنگ شامل مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی، نسبت پواسون و ثابت لامه می باشد که از طریق نگارهای چگالی و صوتی فشاری و برشی قابل تخمین می باشد (Fjaer et al, 2008). روابط مربوط به این خصوصیات در جدول (۳-۴) آورده شده است. باید توجه داشت که با استفاده از این روابط پارامترهای دینامیکی سنگ بدست می آید که مقادیر آن از پارامترهای استاتیکی بیشتر است (Fjaer et al, 2008; Zobak, 2010). در این روابط واحد چگالی  $\text{kg/m}^3$  و واحد سرعت موج صوتی  $\text{m/s}$  می باشد.

جدول (۳-۴): خصوصیات الاستیک دینامیکی سنگ (Crain, 2013).

| شماره رابطه | پارامتر الاستیک | واحد   | رابطه تجربی                                                                 |
|-------------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| (۱-۳)       | مدول یانگ       | پاسکال | $E_{dyn} = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$ |
| (۲-۳)       | مدول برشی       | پاسکال | $G_{dyn} = \rho V_s^2$                                                      |
| (۳-۳)       | مدول حجمی       | پاسکال | $K_{dyn} = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$                   |
| (۴-۳)       | ثابت لامه       | پاسکال | $\lambda_{dyn} = \rho (V_p^2 - 2V_s^2)$                                     |
| (۵-۳)       | نسبت پواسون     | -      | $\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$                       |

\* ثابت لامه ضریبی است که تردی یک سنگ را مشخص می‌کند (Crain, 2013).

اختلاف در حالت استاتیکی و دینامیکی ناشی از ساختار فیزیکی و بافت ناهمگن سنگ‌ها می‌باشد. به دلیل مشکلاتی که در تهیه و کمبود مغزه وجود دارد، روابط تجربی فراوانی برای تبدیل مقادیر دینامیکی به استاتیکی وجود دارد. این روابط برای مناطق خاص، مطابق با لیتولوژی و شرایط منطقه تهیه شده است. همچنین روابط متعددی جهت تبدیل خصوصیات الاستیک دینامیکی سنگ به خصوصیات استاتیکی آن وجود دارد که هریک مربوط به منطقه خاصی می‌باشد. در روابطی که در ادامه آورده شده است، واحد مدول الاستیک GPa می‌باشد.

عیسی<sup>۱</sup> و کزی<sup>۲</sup> رابطه زیر را برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به مدول یانگ استاتیکی در سنگ آهک پیشنهاد کردند (Eissa and Kazi, 1988):

$$E_{sta} = 0.02 + 0.77 E_d \quad \text{رابطه (۳-۶)}$$

<sup>۱</sup>-Eissa

<sup>۲</sup>-Kazi

فجایر<sup>۱</sup> و همکاران نیز رابطه زیر را برای سنگ‌های آهکی توصیه کردند (Fjaer et al, 2008):

$$E_{sta} = 0.18 E_{dyn}^2 + 0.422 E_d \quad \text{رابطه (۷-۳)}$$

افسری<sup>۲</sup> و همکاران (Afsari et al, 2010) از رابطه زیر جهت تخمین مدول یانگ استاتیک سنگ در مخازن کربناته در ایران استفاده کردند:

$$E_{sta} = 0.4145 E_{dyn} - 1.0593 \quad \text{رابطه (۸-۳)}$$

با توجه به عمومیت استفاده از رابطه (۸-۳) در مخازن کربناته ایران، از این رابطه جهت تخمین مدول یانگ استاتیک سنگ مخزن استفاده گردید. هم‌چنین جهت تخمین پارامترهای استاتیکی مدول‌های برشی و حجمی و ثابت لامه از روابط (۹-۳) تا (۱۱-۳) استفاده می‌شود (Rasouli and Archer, 2012; Fjaer et al, 2008).

$$G_{sta} = \quad \text{رابطه (۹-۳)}$$

$$\frac{E_{sta}}{2(1+V_{sta})}$$

$$k_{sta} = \quad \text{رابطه (۱۰-۳)}$$

$$\frac{E_{sta}}{3(1-2V_{sta})}$$

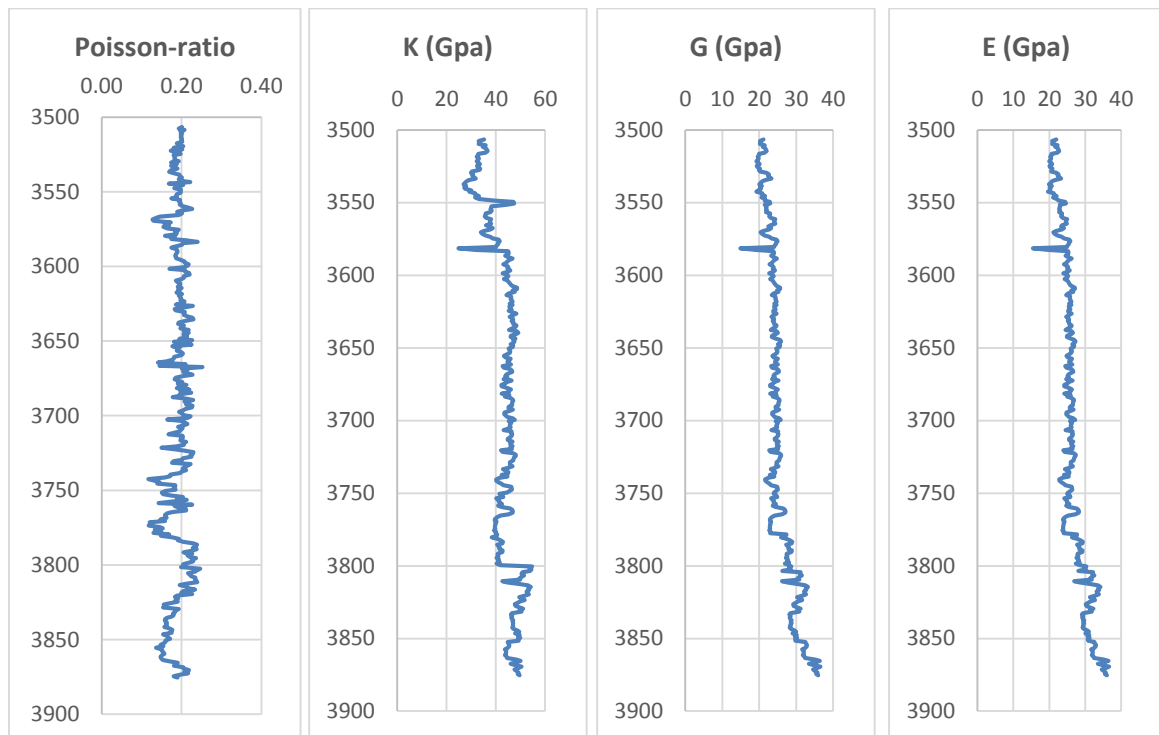
$$\lambda_{sta} = \frac{E_{sta} V_{sta}}{(1+V_{sta})(1-2V_{sta})} \quad \text{رابطه (۱۱-۳)}$$

ضریب پواسون از عوامل مهم در مدل‌سازی ژئومکانیکی و خصوصاً در تخمین فشار شکست سازند است. این ضریب یکی از ضرایب الاستیک و طبق تعریف، نسبت تغییر شکل عرضی به تغییر شکل طولی در اثر اعمال تنش به جسم است. رابطه زیر برای تبدیل نسبت پواسون دینامیکی به استاتیک استفاده می‌شود:

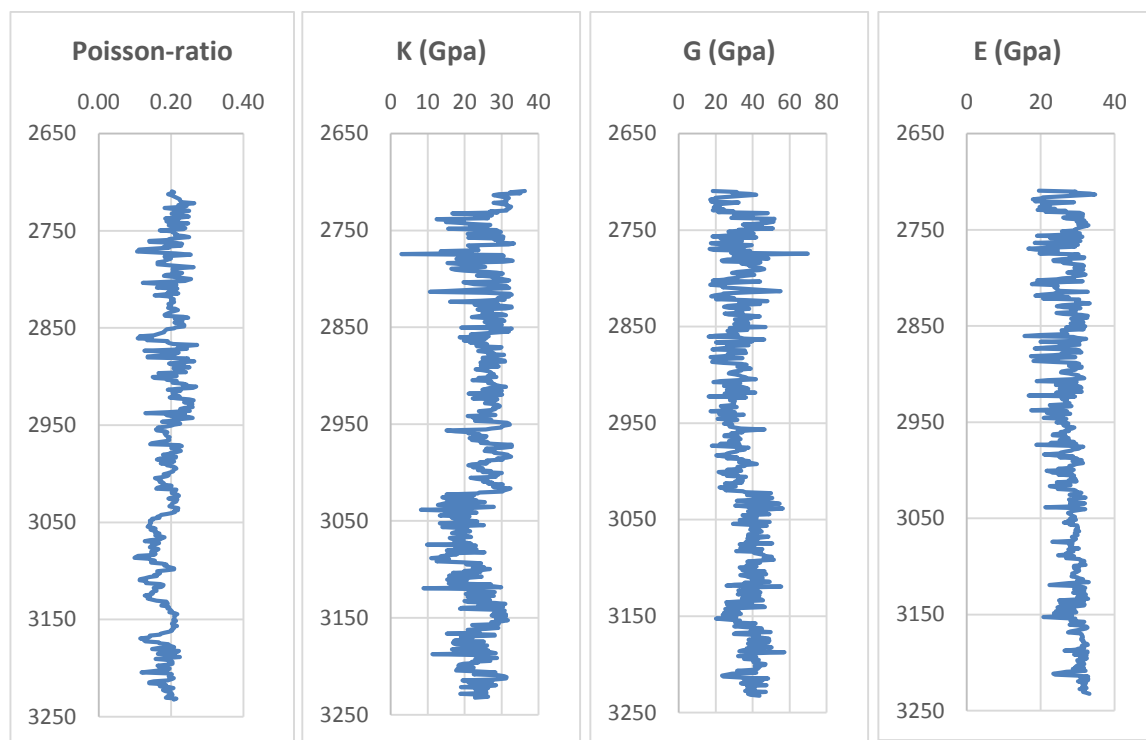
$$v_{sta} = 0.7 v_{dyn} \quad \text{رابطه (۱۲-۳)}$$

<sup>۱</sup> -Fjaer  
<sup>۲</sup> -Afsari

نتایج مدلسازی ژئومکانیکی در قالب نگاره‌های مختلف با استفاده از نرم افزار (IP) ارائه شده است. شکل (۱-۳) و (۲-۳) نمودار تغییرات مدول الاستیک چاه‌های شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۳): تغییرات الاستیک چاه شماره (۱).



شکل (۳-۲): تغییرات الاستیک چاه شماره (۲).

– مقاومت سنگ

در تخمین مقاومت فشاری تک محوره از داده‌های نگارها، عموماً از سه نوع داده‌های بدست آمده از نگارهای صوتی، نوترون و چگالی استفاده می‌شود. در همین رابطه مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده به سه دسته کلی تقسیم می‌شود (Chandong Chang et al, 2006):

الف) مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده از داده‌های صوتی

ب) مقاومت فشاری بدست آمده از داده‌های تخلخل

ج) مقاومت فشاری به دست آمده از داده‌های مدول الاستیسیته

با توجه به تقسیم‌بندی فوق، چاه‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای مقاومت فشاری تک محوره آنها ترسیم گردید.

### – مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده از داده‌های صوتی

زمان سیر و یا موج فشاری در سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که با استفاده از آن می‌توان مقاومت فشاری را تخمین زد. دلیل این امر آن است که هرچه ماده یا سنگ مورد نظر دارای شکستگی بیشتری باشد و یا مواد تشکیل دهنده آن دارای تراکم کمتری باشند سرعت امواج صوتی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب سرعت امواج صوتی می‌تواند بیان‌گر خصوصیات فیزیکی یک سنگ باشد. در این بررسی با توجه به این که سازندهای مورد مطالعه از نوع کربناته می‌باشند از روابط حاکم بر این نوع از سنگ‌ها استفاده شده است. روابط تجربی موجود با توجه به مشابهت نزدیک با منطقه مورد مطالعه در جدول (۳-۵) برآورده شده است. در این روابط سرعت موج فشاری برحسب  $\text{km/s}$ ، تغییرات زمان موج فشاری برحسب  $\text{US/Ft}$  و مقاومت فشاری تک محوره سنگ برحسب  $\text{MPa}$  می‌باشند (Gholami et al, 2014).

جدول (۳-۵): روابط تجربی جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوره سنگ بر اساس داده‌های صوتی.

| شماره رابطه | رابطه مقاومت فشاری تک محوره                                   | حوضه کاربرد                                                               | مرجع                            |
|-------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| (۱۳-۳)      | $USC = \frac{(\frac{7682}{\Delta t})^{1.82}}{145}$            | سنگ آهک<br>و دولومیت                                                      | (Chandong Chang<br>et al, 2006) |
| (۱۴-۳)      | $USC = \frac{(10^{(2.44 + (\frac{109.14}{\Delta t}))})}{145}$ | سنگ‌های<br>کربناته                                                        | (Chandong Chang<br>et al, 2006) |
| (۱۵-۳)      | $USC = 9.95 V_p^{1.21}$                                       | سنگ آهک، مارن،<br>دولومیت، ماسه سنگ،<br>دیاباز، سرپانتین، هماتیت و<br>توف | (Christars<br>et al, 1997)      |
| (۱۶-۳)      | $USC = 31.54 V_p - 63.7$                                      | سنگ‌های<br>کربناته                                                        | (Yasar and<br>Erdogan, 2004)    |
| (۱۷-۳)      | $USC = 570.808 e^{-0.031\Delta t}$                            | سنگ‌های<br>کربناته                                                        | (Amani and<br>Shahbazi, 2013)   |

ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر رابطه (۱۷-۳) روابط (۱۴-۳) و (۱۵-۳) نیز در میادین نفتی

کربناته حوضه جنوب غربی کشور کارایی مناسبی داشته‌اند (Gholami et al, 2014; Amani and

Shahbazi, 2013).

## - تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر مبنای تخلخل

یکی دیگر از خواص مهم سنگ برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ، تخلخل می‌باشد. افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت سنگ می‌گردد. البته این رابطه خطی نیست و با توجه به نوع سنگ تغییر می‌کند. سرعت انتشار امواج با افزایش روزنه‌داری کاهش می‌یابد و این پدیده هم در سنگ‌های خشک و هم در سنگ‌های اشباع صادق است. لذا ارتباط قوی بین سرعت امواج و تخلخل وجود دارد. از این رو یکی از بهترین پارامترهایی که می‌توان با استفاده از آن مقاومت فشاری تک محوره را تخمین زد، تخلخل می‌باشد (Waller et al, 2013).

روابط مختلفی جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر مبنای تخلخل ارائه شده است. در جدول (۳-۶) روابطی که در حوضه سازندهای کربناته کارایی دارند آورده شده است. در روابط زیر تغییرات زمان موج فشاری برحسب  $Us/Ft$  و مقاومت فشاری تک محوره سنگ برحسب  $MPa$  می‌باشد.

جدول (۳-۶): روابط تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوره براساس تخلخل سنگ

| رابطه  | رابطه مقاومت فشاری تک محوره سنگ                                                         | حوضه کاربرد                                                                    | مرجع                         |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| (۱۸-۳) | $USC = 143 e^{(-6.95 \phi)}$                                                            | سازند کربناته در خاورمیانه<br>$0.05 < \phi < 0.2$<br>$30 < USC < 150$<br>$MPa$ | (Chandong Chang et al, 2006) |
| (۱۹-۳) | $USC = 135 e^{(-4.8 \phi)}$                                                             | سازند کربناته<br>$0 < \phi < 0.2$<br>$10 < USC < 300$<br>$MPa$                 | (Chandong Chang et al, 2006) |
| (۲۰-۳) | $USC = 194.4 - 0.6072 \Delta t - 646.1\phi - 0.01644 \Delta t^2 + 8.792(\phi.\Delta t)$ | سازند کربناته                                                                  | (Amani and Shahbazi, 2013)   |

## – تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر مبنای مدول الاستیسیته

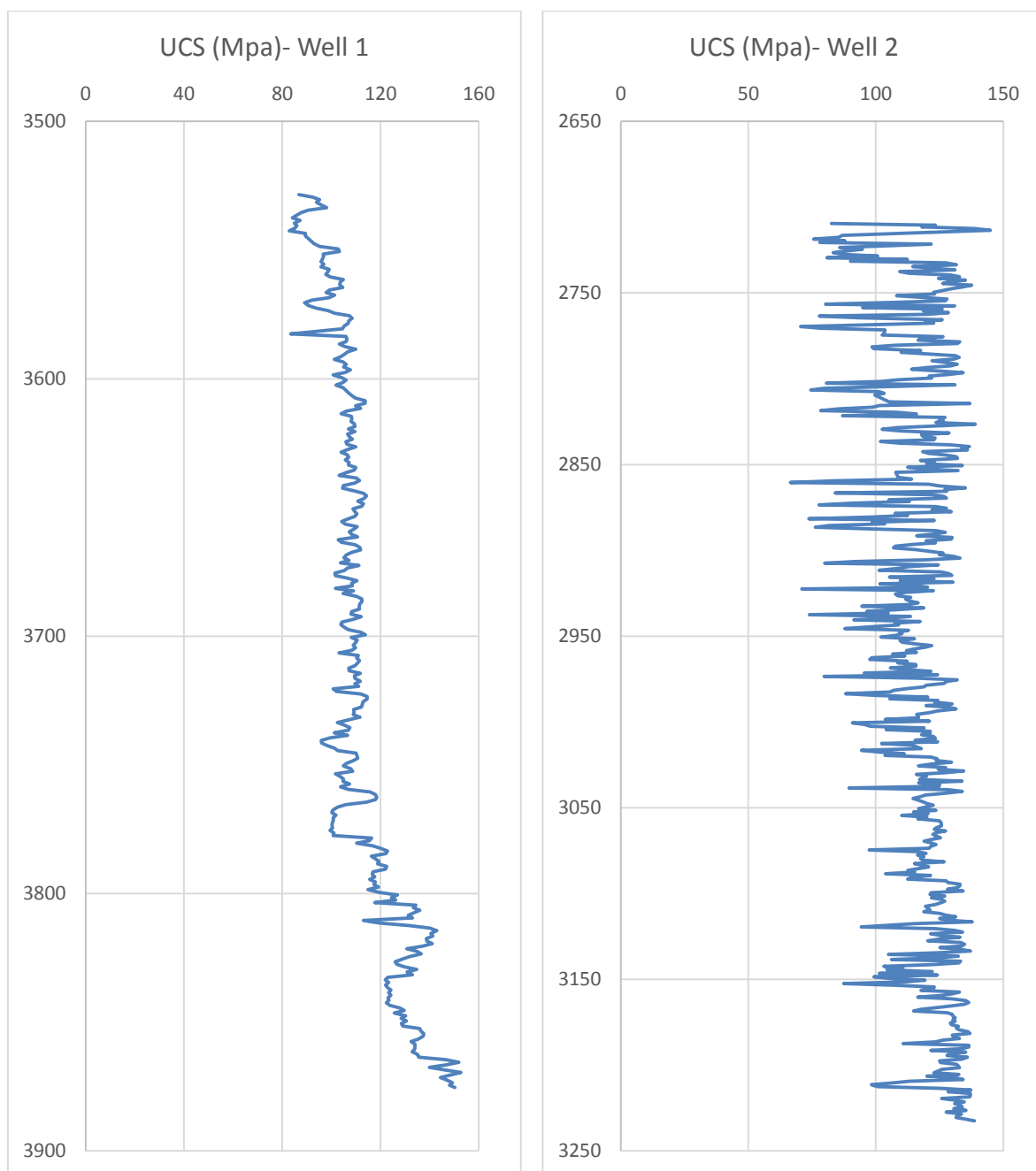
مدول الاستیسیته نیز یکی دیگر از پارامترهای شاخص خصوصیات سنگ می باشد که با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد و می توان آن را برای تخمین پارامترهایی همچون مقاومت سنگ استفاده نمود. البته این نکته قابل ذکر است که این پارامتر هم به صورت استاتیکی و هم به صورت دینامیکی قابل اندازه گیری می باشد. مدول استاتیکی که کمتر از مدول دینامیکی می باشد در روابط تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ کارایی دارد. روابط مناسب در سنگ های کربناته در جدول (۷-۳) آورده شده است. در این روابط واحد مدول الاستیک (GPa) و واحد مقاومت فشاری تک محوره سنگ (MPa) می باشد.

جدول (۷-۳): روابط تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوره براساس مدول الاستیک.

| شماره معادله | رابطه مقاومت فشاری تک محوره سنگ | حوزه کاربرد                                                  | مرجع                         |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|
| (۲۱-۳)       | $USC = 13.8 E_{dyn}^{0.51}$     | سنگ آهک<br>$10 < USC < 300$                                  | (Chandong Chang et al, 2006) |
| (۲۲-۳)       | $USC = 25.1 E_{dyn}^{0.34}$     | دولومیت<br>$60 < USC < 100$                                  | (Chandong Chang et al, 2006) |
| (۲۳-۳)       | $USC = 2.28 + 4.1089 E_{sta}$   | سنگ های کربناته ایران که گاه شامل ورقه هایی از شیل می باشند. | (Afsari, 2010)               |

همان طور که در جدول ذکر شد، رابطه (۲۳-۳) در حوزه سازندهای کربناته در جنوب غربی ایران نسبت به بقیه روابط کارایی خوبی داشته است. به همین دلیل در این پژوهش از رابطه (۲۳-۳) برای

محاسبه مقاومت فشاری تک محوری استفاده شده است، زیرا تخمین بهتری نسبت به روابط موجود ارائه داده است. در شکل زیر نمودار مقاومت فشاری تک محوره در چاه شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): مقاومت فشاری تک محوری چاه‌های شماره (۱) و (۲).

مقاومت کششی مطابق رابطه‌ی (۲۴-۳) و چقرمگی ترک که نشان‌دهنده‌ی مقاومت سنگ در برابر گسترش ترک می‌باشد با استفاده از رابطه (۲۵-۳) می‌تواند حاصل گردد (Sarmadivaleh, et al., 2010). در رابطه (۲۴-۳) و (۲۵-۳)،  $K_K$  چقرمگی ترک برحسب  $\text{MPa}\sqrt{m}$ ،  $T$  مقاومت کششی برحسب  $\text{MPa}$  و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ برحسب  $\text{MPa}$  می‌باشد.

$$T = 0.1 \times UCS \quad \text{رابطه (۲۴-۳)}$$

$$K_{Ic} = 0.271 + (0.107 \times T) \quad \text{رابطه (۲۵-۳)}$$

### – زاویه اصطکاک داخلی

زاویه اصطکاک داخلی سنگ ارتباط تنگاتنگی با پارامترهای فیزیکی سنگ دارد. این پارامتر از ساختارهای مکانیکی سنگ در ابعاد کوچک همانند صلبیت سنگ که به میزان زیادی به تخلخل و نوع سیمان سنگ بستگی دارد، تاثیر می‌پذیرد.

برخی تحقیقات نیز نشان داده‌اند که با توجه به افزایش مدول یانگ در شیل، زاویه اصطکاک داخلی آن نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب برآورد این پارامتر نسبتاً پیچیده در کاربردهای ژئومکانیکی همانند پایداری چاه مفید خواهد بود. روابط تجربی محدودی در راستای تخمین این پارامتر ارائه گردیدند که عموماً در شیل‌ها کاربرد دارند (Gholami et al, 2014; Khaksar et al, 2009). غلامی و همکاران از رابطه زیر جهت تخمین این پارامتر در سازندهای کربناته ایران استفاده کردند.

$$\phi = 26.5 - 37.4 (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 (1 - NPHI - V_{shale}) \quad \text{رابطه (۲۵-۳)}$$

در این رابطه  $V_{shale}$  کسری از حجم شیل موجود در سنگ مخزن است که در اعماق بیشتر از ۸۰۰۰ فوت طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad \text{رابطه (۲۷-۳)}$$

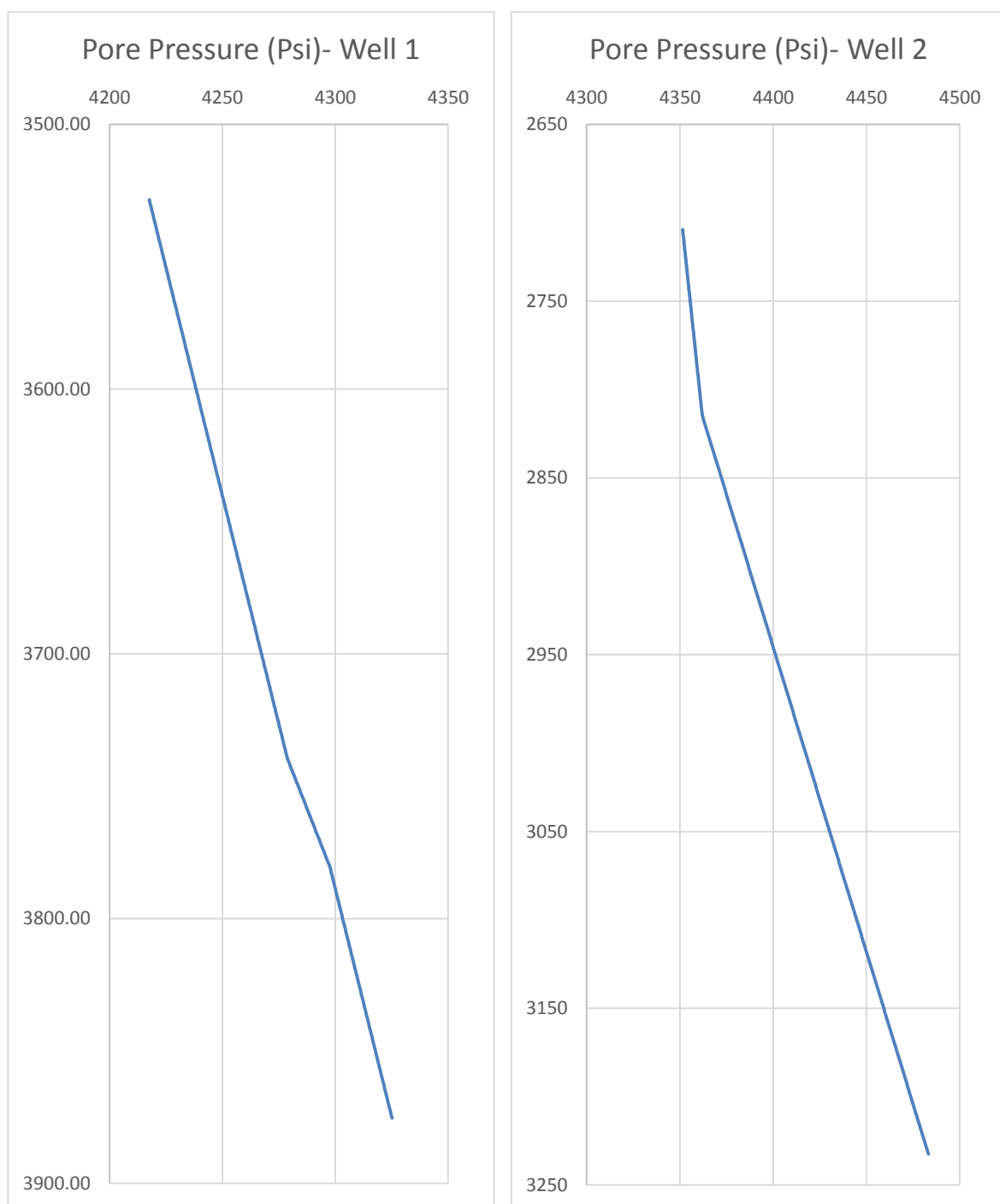
در این رابطه  $GR_{min}$  قرائت نگار پرتو گاما در ناحیه ماسه تمیز (بدون شیل) و  $GR_{max}$  قرائت نگار پرتوزا در ناحیه شیل است (رحمانی ۱۳۸۹).

## – تخمین فشار منفذی

فشار منفذی، به فشار سیال موجود در تخلخل سنگ اطلاق می‌گردد (طاحونی، ۱۳۸۰). لغت نامه نفتی شلومبرژر از فشار منفذی با نام‌های فشار مخزن و یا فشار همه جانبه نیز یاد کرده است. بسته به میزان نفوذپذیری و تخلخل سنگ، فشار منفذی تغییر می‌کند. در سازندهای شیلی به دلیل مؤثر نبودن نوع تخلخل، سیال منفذی درون فضای داخلی سنگ محبوس گشته و لذا نمی‌تواند در اثر فشار ستون سنگی بالادست خود به حرکت درآید. در نتیجه فشار منفذی به طور غیرطبیعی در این نقاط افزایش پیدا می‌کند. فشار منفذی طبیعی یا همه جانبه، به فشار معادل ستون آب بالادست تا سطح ایستابی گفته می‌شود (صائمی و کریمی، ۱۳۹۲).

تعیین مناسب فشار منفذی برای طراحی، کنترل و ایمنی چاه، حذف مشکلات عملیات حفاری و کاهش ریسک فنی و اقتصادی برنامه و توسعه مخازن ضروری است. در مناطقی که پیشینه اکتشافی و تولیدی دارند، مجموعه‌ای از اطلاعات که شامل اطلاعات لرزه‌ای، اطلاعات نگارهای متداول (صوتی، مقاومت ویژه، نوترون و چگالی سازند) و اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری‌های مستقیم (DST, MDT و ...) می‌باشند، می‌توانند برای تعیین فشار در چاه‌هایی که قرار است حفاری شوند استفاده گردد (Zhang, 2011).

در این پژوهش با داشتن فشار سر چاه با استفاده از روش گرادیان، فشار منفذی برای تمام طول چاه محاسبه شده است. گرادیان نفت  $0.29 \text{ psi/ft}$ ، گرادیان آب  $0.46 \text{ psi/ft}$  و گرادیان گاز  $0.1 \text{ psi/ft}$  در نظر گرفته شده است. فشار منفذی مبنا در چاه شماره (۱) در عمق  $3350$  از سطح دریا  $4150$  پوند بر اینچ مربع، و فشار منفذی مبنا در چاه شماره (۲) در عمق  $3350$  از سطح دریا  $4500$  پوند بر اینچ مربع اندازه‌گیری شده است. شکل (۳-۴) تغییرات فشار منفذی بر حسب عمق را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): تغییرات فشار منفذی بر حسب عمق در چاه شماره (۱) و (۲)

### ۳-۶- جمع‌بندی

میدان نفتی مارون یکی از بزرگ‌ترین مخازن کربناته در جهان است. اغلب مطالعات ژئومکانیکی بر پایه آزمایشات مکانیکی سنگ و نگارهای چاه پیمایی استوار است. با توجه به محدودیت‌های موجود در صنعت نفت در امر دسترسی به مغزه، در این تحقیق از نگارهای چاه پیمایی جهت برآورد پارامترهای ژئومکانیکی از جمله پارامترهای مکانیکی سنگ و فشار منفذی و همچنین تخمین تنش‌های منطقه استفاده شده است. سپس با قرار دادن نگارهای صوتی در کنار نگارهای تخلخل، چگالی و گاما پارامترهای الاستیک، مقاومت و زاویه اصطکاک داخلی سنگ براساس روابط تجربی مناسب منطقه میدان مورد نظر برآورد شد. صحت سنجی برای مدول‌های الاستیسیته استاتیکی و مقاومت فشاری تک محوره سنگ با استفاده از نتایج سایر تحقیقات انجام شده در این میدان انجام گردید. با داشتن فشار منفذی مخزن نفت، با استفاده از روش گرادیان فشار منفذی برای کل مخزن چاه محاسبه شده است. نتایج حاصل از مدلسازی ژئومکانیکی در فصل‌های بعد برای تشکیل پایگاه داده، انجام تحلیل آماری و در نهایت یافتن روابط بین انرژی ویژه حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی استفاده می‌شود.

## فصل چهارم

توسعه مدل‌های تجربی با استفاده

از تحلیل آماری پایگاه داده‌ها

## ۴-۱- مقدمه

در صورتی که بین متغیرها رابطه‌ای وجود داشته باشد، می‌توان آن را با الگوهای ریاضی بیان کرد. معمولاً چنین الگویی ممکن است از نوع خطی یا غیرخطی باشد. روش برازش یکی از عمومی‌ترین روش‌های حل مسایل خطی و غیرخطی است که تا به حال استفاده‌های زیادی از آن در مدل‌سازی‌های مسایل گوناگون شده است. همچنین از روش‌های هوش مصنوعی همانند شبکه‌های عصبی، شبکه‌های فازی عصبی می‌توان برای حل مسایل غیر خطی پیچیده و دشوار استفاده کرد. در این فصل نتایج کاربردهای روش‌های آماری جهت تحلیل کیفی ارتباط یک به یک بین پارامترهای مستقل (قابل کنترل و غیر قابل کنترل) با پارامتر هدف (انرژی ویژه حفاری) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از روش برازش غیرخطی به منظور تعیین ارتباط میان پارامترهای مستقل با انرژی ویژه استفاده شده است. در این فصل ابتدا ضمن بیان نحوه تشکیل پایگاه داده‌های حفاری و ژئومکانیکی چاه‌های شماره (۱) و (۲)، نتایج بررسی‌های انجام شده و تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه شده و در نهایت مدل‌های تجربی بر اساس اطلاعات موجود به صورت اولیه توسعه داده شده‌اند.

## ۴-۲- تشکیل پایگاه داده‌ها

ابتدا ضروری است داده‌های حفاری و ژئومکانیکی چاه‌های شماره (۱) و (۲) هم مقایس شوند. تغییرات داده‌های عملیاتی با مقیاس یک متر ثبت شده‌اند. از سوی دیگر داده‌های پتروفیزیکی (که مبنای تخمین داده‌های ژئومکانیکی هستند) با مقیاس ۰/۱۵۲۴ متر ثبت گردیده‌اند. تغییرات داده‌های ژئومکانیکی از روش میانگین‌گیری با داده‌های حفاری هم مقیاس شدند.

بر مبنای داده‌های به دست آمده از چاه‌های شماره (۱) و (۲)، می‌توان بانک اطلاعاتی تشکیل شود. این بانک به منظور بررسی و ارتباط پارامترها جهت پیش‌بینی انرژی ویژه حفاری در شرایط مختلف

حفاری و زمین‌شناسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات مورد نیاز جهت تشکیل این بانک اطلاعاتی به شرح ذیل است:

– نگاره‌های پتروفیزیکی صوتی

– گزارش‌های روزانه حفاری، نگاره‌های گل حفاری

داده‌های نگاره‌های پتروفیزیکی و داده‌های عملیات حفاری در چاه شماره (۱) در بازه مخزنی ۳۵۲۸ تا ۳۸۷۵ و در چاه شماره (۲) در بازه مخزنی ۲۷۰۰ تا ۳۲۳۰ دارای هم پوشانی هستند بنابراین بررسی‌های این تحقیق صرفاً در این اعماق خاص انجام خواهد شد.

بدین ترتیب تعداد داده‌های قابل استفاده جهت مطالعات مورد نظر در چاه شماره (۱) و (۲) به ترتیب ۳۴۷ و ۵۳۳ ردیف داده می‌باشد که هر دو مربوط به سازند مخزنی آسماری است. این مجموعه اطلاعات شامل دو دسته پارامترهای حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی سازند می‌باشند. بدین ترتیب پارامترهای عملیاتی و قابل کنترل شامل پارامترهای عمق، وزن روی مته، سرعت دوران مته، نرخ نفوذ، نیروی گشتاور، نرخ جریان سیال و وزن گل و پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره، ضریب پواسون و زاویه داخلی سنگ می‌باشند. در شکل زیر نمونه‌ای از داده‌های حفاری و ژئومکانیکی نشان داده شده است.

جدول (۴-۱): نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده برای تحلیل چاه شماره (۱).

| عمق<br>(متر) | وزن روی مته<br>(کیلو پوند) | سرعت دوران<br>(دور بر دقیقه) | نرخ نفوذ<br>(دقیقه بر متر) | نیروی گشتاور<br>(پوند-اینچ) | نرخ جریان سیال<br>(گالن بر دقیقه) | وزن گل<br>(کیلو گرم بر لیتر) |
|--------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| ۳۵۳۰         | ۱/۴۱۸                      | ۱۶۷                          | ۸/۰۳۶                      | ۲۲۴۰۰                       | ۴۰۲/۷۵                            | ۰/۹۲                         |
| ۳۵۳۱         | ۵/۸۶۶                      | ۱۶۳                          | ۵/۷۰                       | ۲۴۴۰۶                       | ۴۰۲/۶۰                            | ۰/۹۲                         |
| ۳۵۳۲         | ۴/۷۸۴                      | ۱۵۸                          | ۱۲/۱۵                      | ۲۲۲۳۱                       | ۴۰۸/۰۸                            | ۰/۹۲                         |
| ۳۵۳۳         | ۱۰/۲۳۸                     | ۱۶۸                          | ۳/۸۶                       | ۲۷۰۹۰                       | ۴۰۹/۶۳                            | ۰/۹۲                         |

جدول (۲-۴): نمونه‌ای از داده‌های مرتب شده برای تحلیل چاه شماره (۲).

| عمق<br>(متر) | وزن روی مته<br>(کیلو پوند) | سرعت دوران<br>(دور بر دقیقه) | نرخ نفوذ<br>(دقیقه بر متر) | نیروی گشتاور<br>(پوند-اینچ) | نرخ جریان سیال<br>(گالن بر دقیقه) | وزن گل<br>(کیلو گرم بر لیتر) |
|--------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| ۲۷۲۰         | ۹/۰۶۲                      | ۵۳                           | ۱۱/۸۶                      | ۲۶۲۵۷                       | ۴۵۵                               | ۱/۱                          |
| ۲۷۲۱         | ۹/۵۲۵                      | ۵۴                           | ۱۸/۵۲                      | ۲۶۳۴۵                       | ۴۶۰                               | ۱/۱                          |
| ۲۷۲۲         | ۹/۴۵۶                      | ۵۳                           | ۱۶/۵۸                      | ۲۶۳۶۴                       | ۴۶۲                               | ۱/۱                          |
| ۲۷۲۳         | ۹/۶۴۳                      | ۵۱                           | ۱۰/۴۵                      | ۲۶۳۱۰                       | ۴۶۰                               | ۱/۱                          |

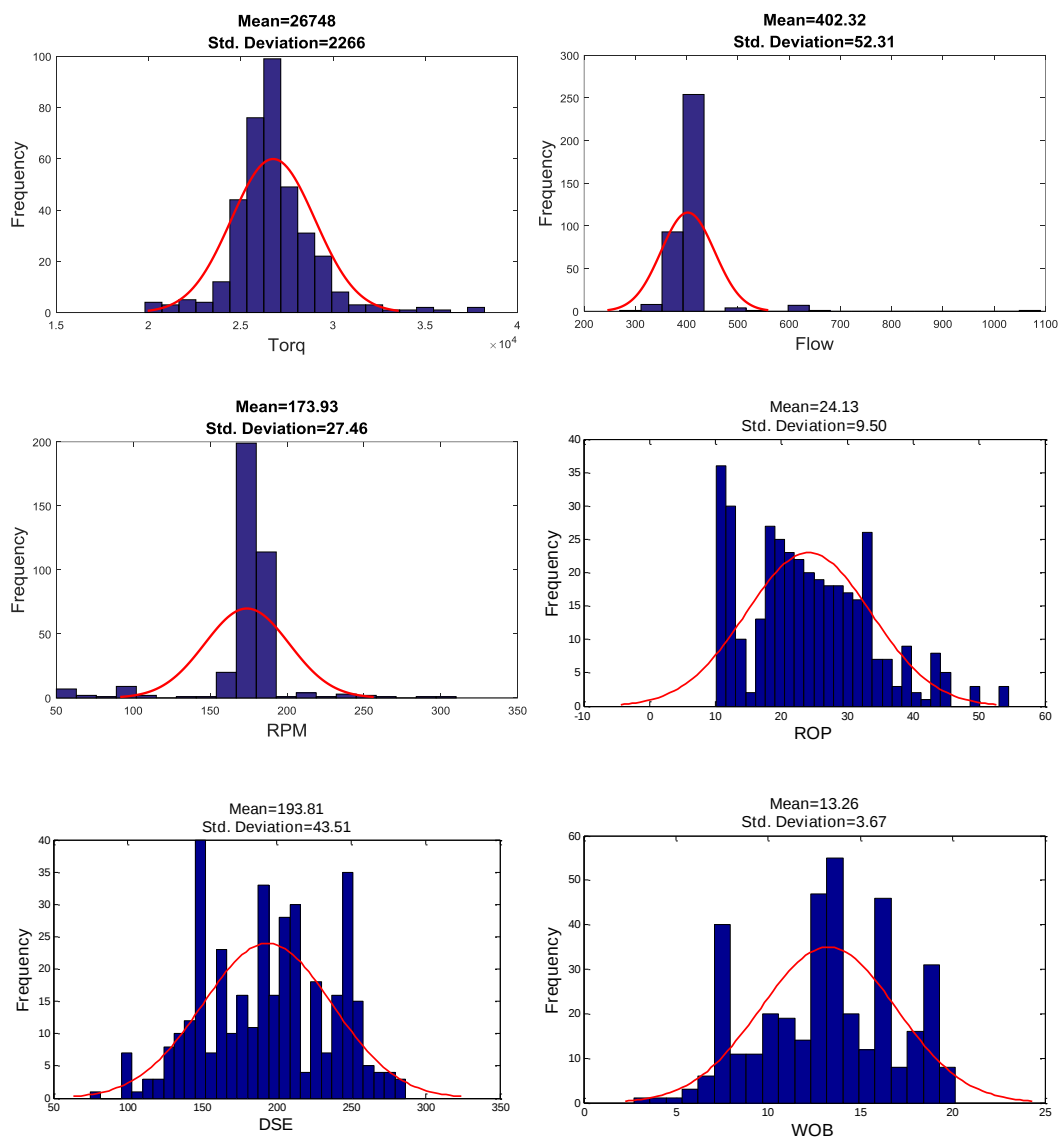
جدول (۳-۴): نمونه‌ای از داده‌های ژئومکانیکی سازند در چاه شماره (۱).

| عمق<br>(متر) | مدول یانگ<br>(گیگا پاسکال) | مقاومت فشاری تک محوری<br>(مگا پاسکال) | ضریب پواسون<br>- | فشار منفذی<br>(پوند-اینچ) | زوایه اصطکاک داخلی سنگ<br>(درجه) |
|--------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|
| ۳۵۳۰         | ۲۹/۷۸                      | ۱۲۴/۶۷                                | ۰/۱۷             | ۴۲۱۸                      | ۲۳/۵۴                            |
| ۳۵۳۱         | ۲۹/۶۳                      | ۱۲۴/۰۶                                | ۰/۱۸             | ۴۲۱۸                      | ۲۳/۵۰                            |
| ۳۵۳۲         | ۲۹/۶۰                      | ۱۲۳/۹۱                                | ۰/۱۷             | ۴۲۱۸                      | ۲۲/۹                             |
| ۳۵۳۳         | ۳۱/۱۶                      | ۱۳۰/۳۴                                | ۰/۱۸             | ۴۲۱۸                      | ۲۸/۲۵                            |

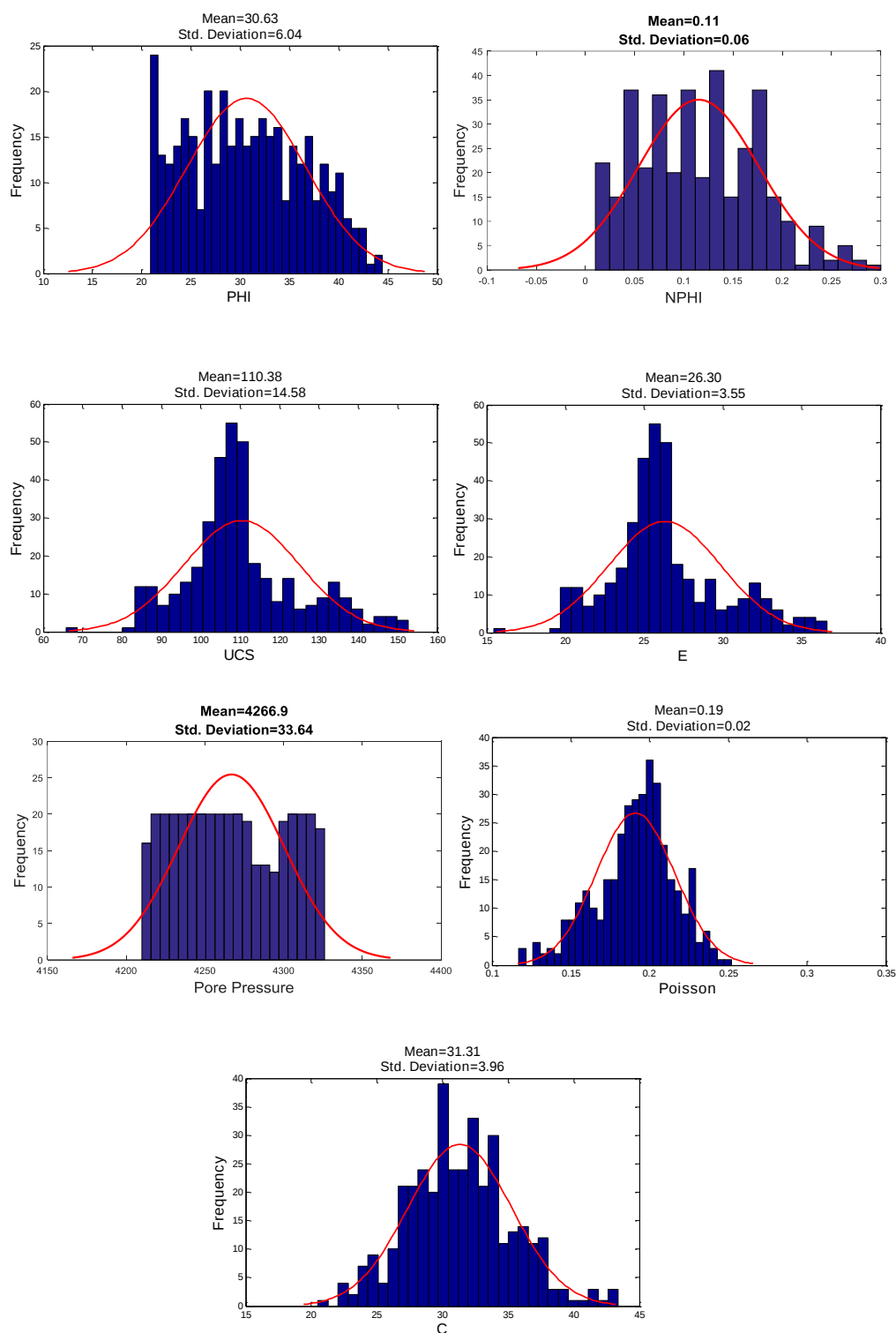
جدول (۴-۴): نمونه‌ای از داده‌های ژئومکانیکی سازند در چاه شماره (۲).

| عمق<br>(متر) | مدول یانگ<br>(گیگا پاسکال) | مقاومت فشاری تک محوری<br>(مگا پاسکال) | ضریب پواسون<br>- | فشار منفذی<br>(پوند-اینچ) | زوایه اصطکاک داخلی سنگ<br>(درجه) |
|--------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|
| ۲۷۲۰         | ۱۳/۸۲                      | ۵۹                                    | ۰/۲۳             | ۴۳۵۲/۵۶                   | ۲۶/۳۹                            |
| ۲۷۲۱         | ۱۵/۴۵                      | ۶۵/۷۶                                 | ۰/۲۶             | ۴۳۵۲/۶۶                   | ۲۶/۱                             |
| ۲۷۲۲         | ۱۷/۸۲                      | ۷۵/۴۸                                 | ۰/۲۳             | ۴۳۵۲/۷۶                   | ۲۶/۱۴                            |
| ۲۷۲۳         | ۱۶/۱۶                      | ۶۸/۶۸                                 | ۰/۲۲             | ۴۳۵۲/۸۶                   | ۲۳/۹۶                            |

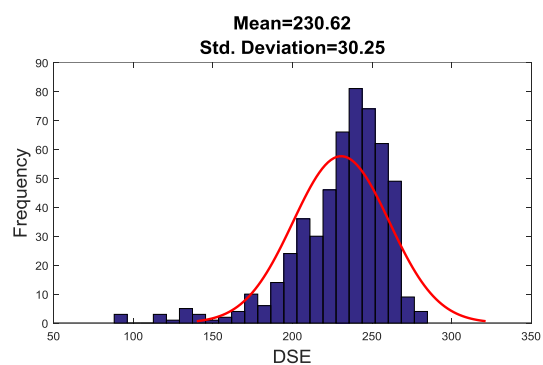
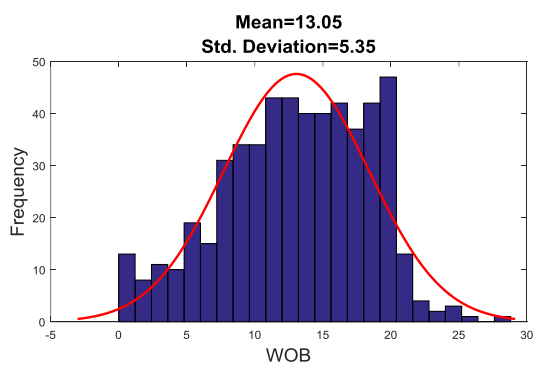
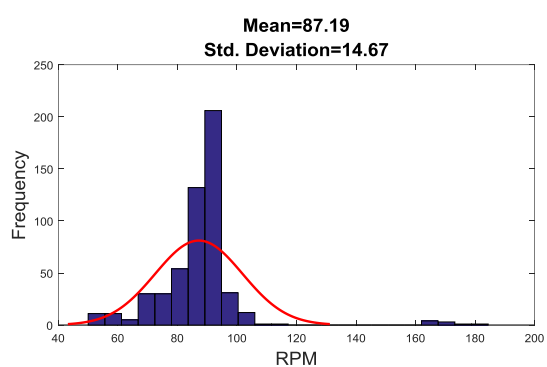
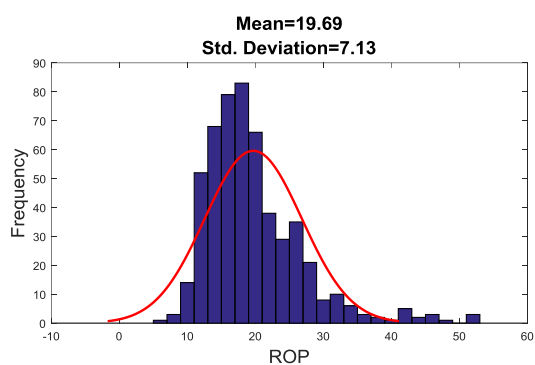
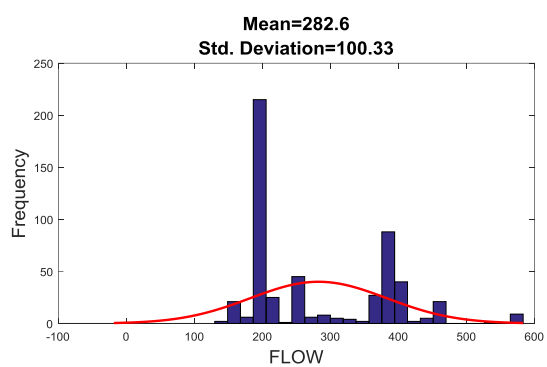
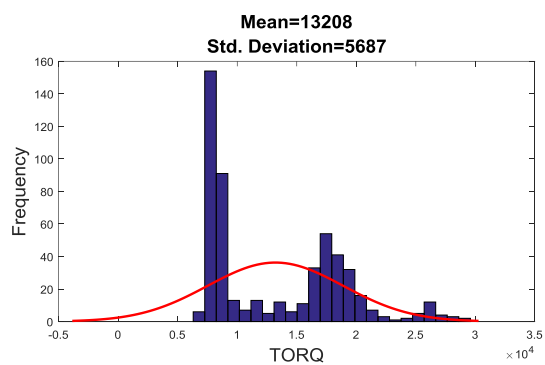
سایر پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مقاومت کششی و دیگر مدول‌های الاستیک به دلیل شباهت در روابط تخمین و نیز هم خطی بالای آن‌ها با مدول الاستیک و مقاومت فشاری تک محوری، در ساخت پایگاه داده استفاده نشده‌اند. نمودار فراوانی هر یک از داده‌های چاه‌ها در شکل (۴-۱)، (۴-۲)، (۴-۳) و (۴-۴) نمایش داده شده است.



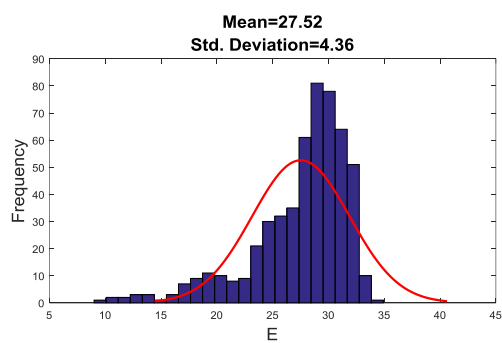
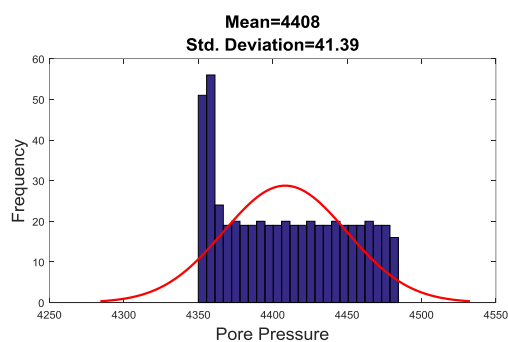
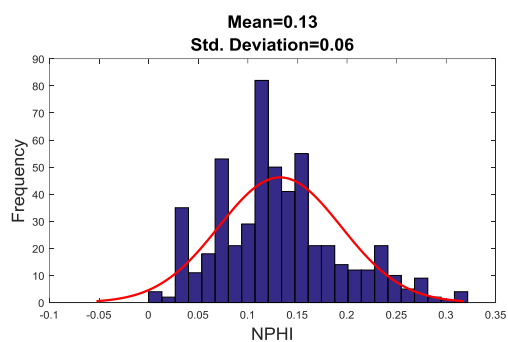
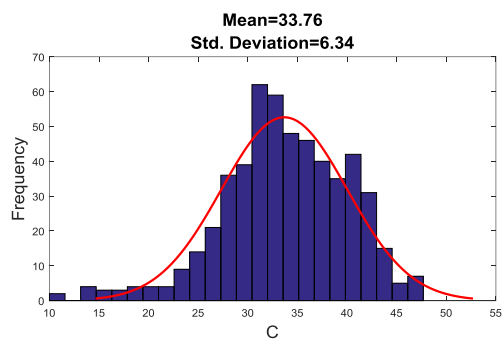
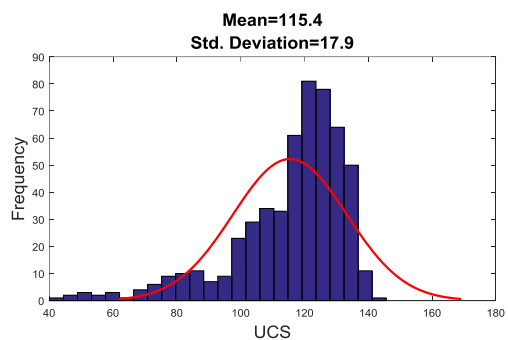
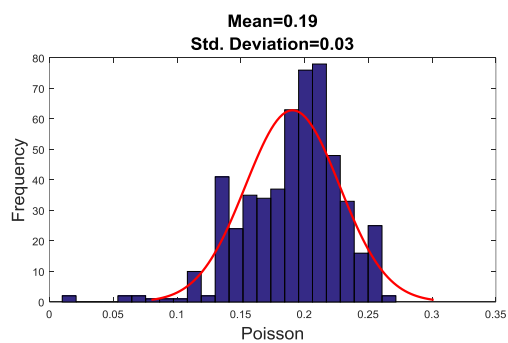
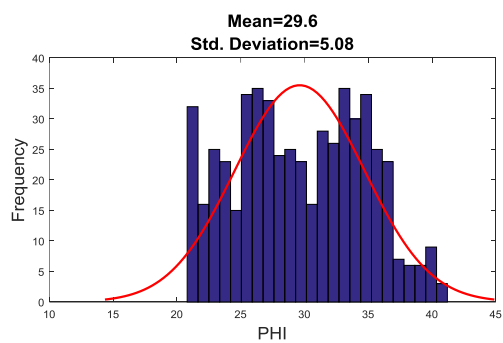
شکل (۴-۱): نمودار فراوانی داده‌های عملیاتی چاه شماره (۱).



شکل (۴-۲): نمودار فراوانی داده‌های ژئومکانیکی چاه شماره (۱).



شکل (۴-۳): نمودار فراوانی داده‌های عملیاتی چاه شماره (۲).



شکل (۴-۴): نمودار فراوانی داده‌های ژئومکانیکی چاه شماره (۲).

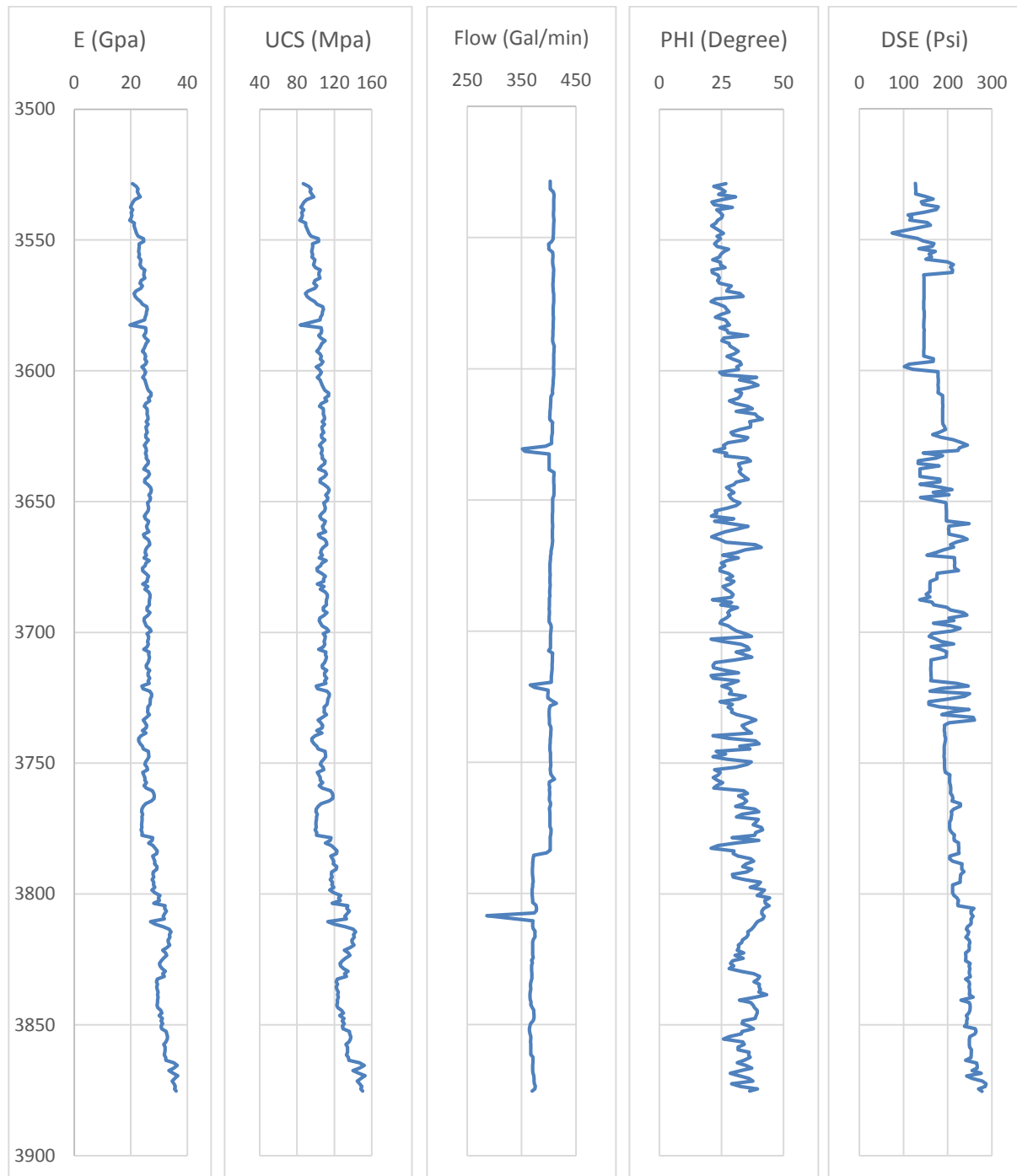
در نمودارهای اخیر، توزیع مقادیر داده‌ها در بازه‌های مختلف نشان داده شده است. نمودارهای سرعت چرخش مته، نرخ نفوذ، جریان سیال، مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری مربوط به چاه شماره (۱) در خارج از انحراف معیار استاندارد تجمع داده دارند که برای تحلیل نهایی، داده‌های خارج از انحراف معیار استاندارد در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین نمودارهای سرعت چرخش مته، نرخ نفوذ، انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوری مربوط به چاه شماره (۲) در خارج از انحراف معیار استاندارد تجمع داده دارند که برای تحلیل نهایی، داده‌های خارج از انحراف معیار استاندارد در نظر گرفته نمی‌شود.

همانگونه که قبلاً ذکر شده انرژی ویژه حفاری و نرخ نفوذ مته پارامترهای مناسبی جهت ارزیابی عملکرد عملیات حفاری مورد می‌باشند. که در این تحقیق تنها انرژی ویژه حفاری مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به تحلیل و بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی بر مقادیر انرژی ویژه حفاری پرداخته می‌شود.

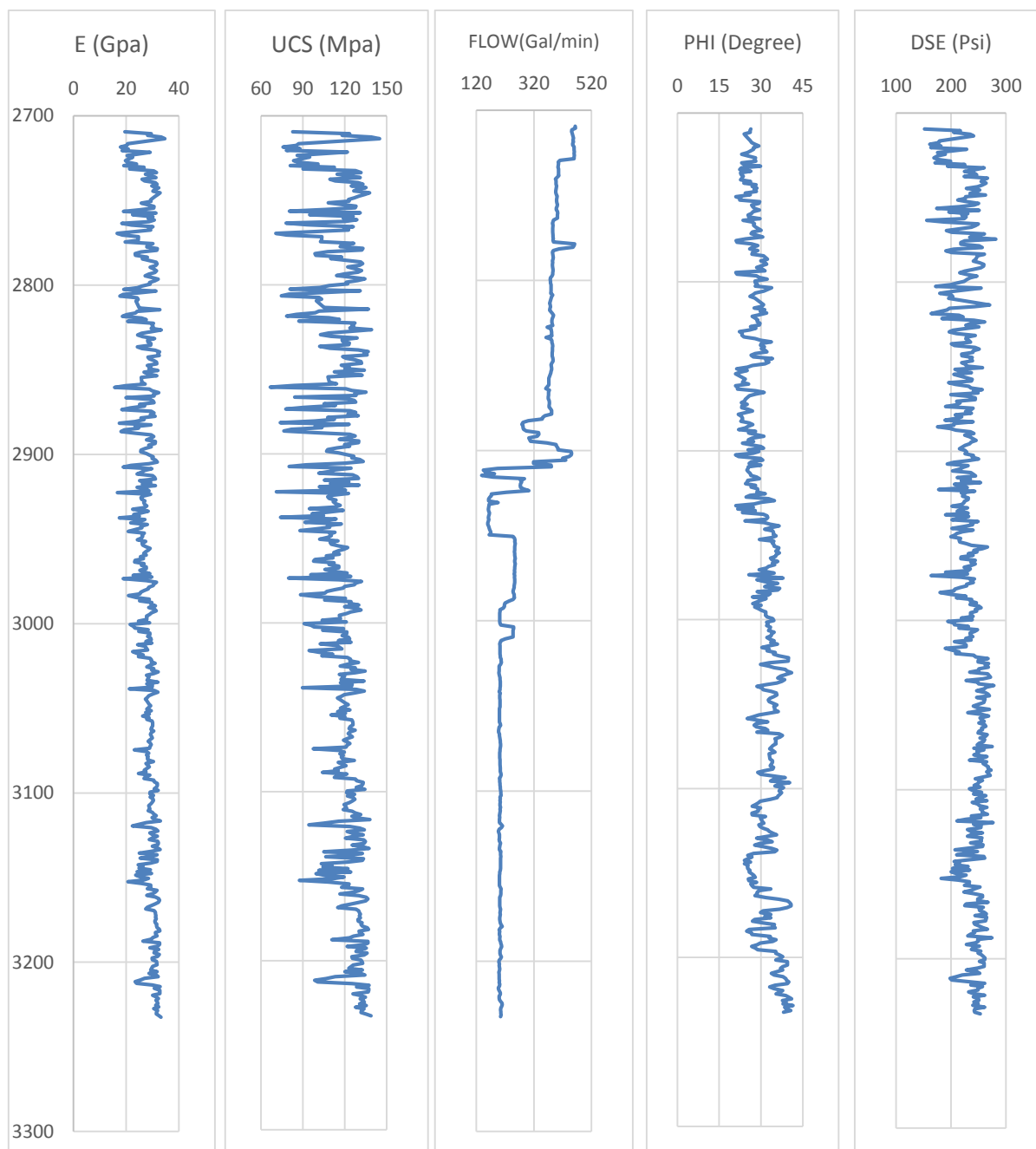
#### ۳-۴- بررسی کیفی عوامل موثر بر کارایی انرژی ویژه حفاری

پس از مشخص شدن پارامترهای موثر بر انرژی ویژه حفاری و انتخاب آن‌ها به عنوان پارامترهای مستقل جهت تحلیل آماری، در مرحله بعد بررسی ارتباط آن‌ها به لحاظ کیفی صورت می‌گیرد. در شکل (۴-۵) و (۴-۶) نمودار تغییرات انرژی ویژه حفاری و عوامل موثر بر آن در هر دو چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت سنگ و نیز افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقادیر انرژی ویژه حفاری در چاه شماره (۱) افزایش یافته است. همچنین در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت سنگ و زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقادیر انرژی ویژه حفاری در چاه شماره (۲) نیز افزایش یافته است. از سوی دیگر کاهش جریان سیال، باعث باقی ماندن خرده‌های حفاری در ته چاه شده در نتیجه خردایش مجدد خرده‌های حفاری، انرژی بیشتری جهت خردایش سنگ مصرف می‌کند. با توجه به شکل (۴-۶) و (۴-۷) تغییرات سایر پارامترها

در مقایسه با انرژی ویژه حفاری بر اساس عمق قابل مشاهده می‌باشد. البته باید توجه داشت که بعضی از پارامترها در ارتباط متقابل با یکدیگر قرار دارند.



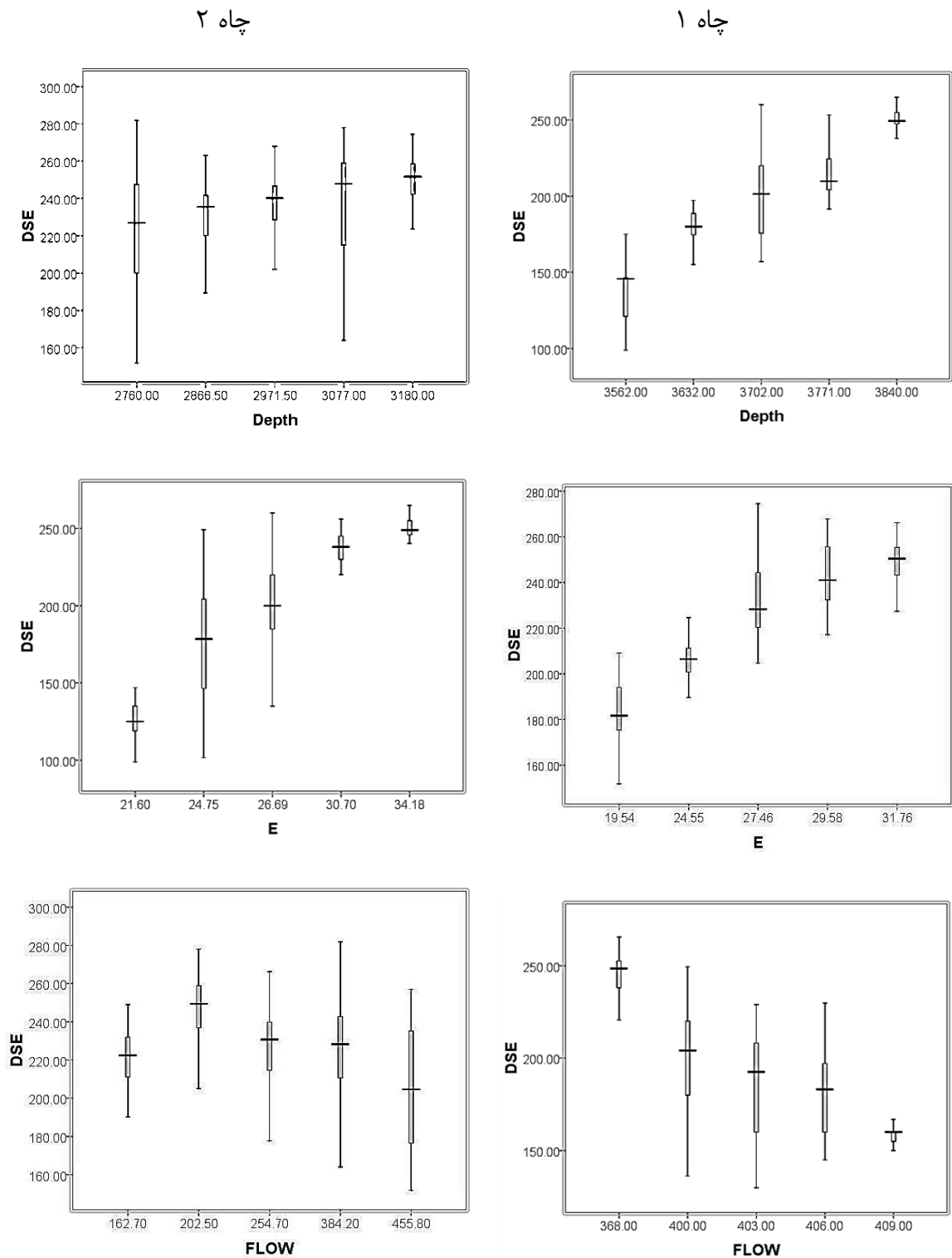
شکل (۴-۵): نمودار تغییرات انرژی ویژه حفاری و عوامل موثر بر آن بر حسب عمق در چاه شماره (۱).



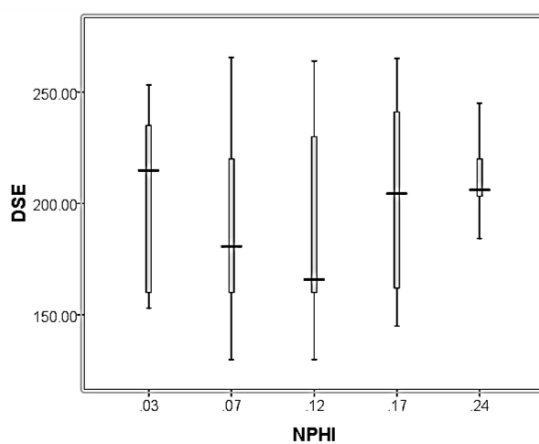
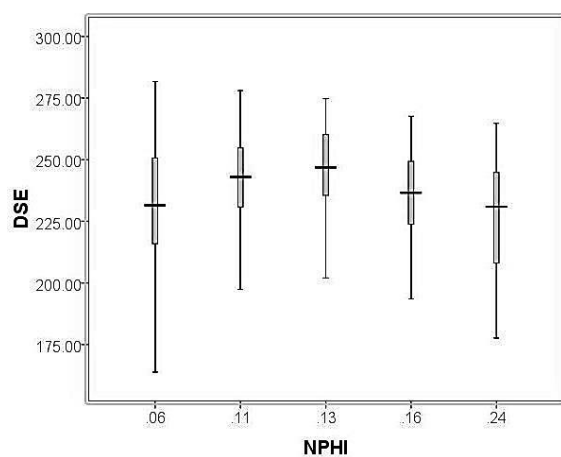
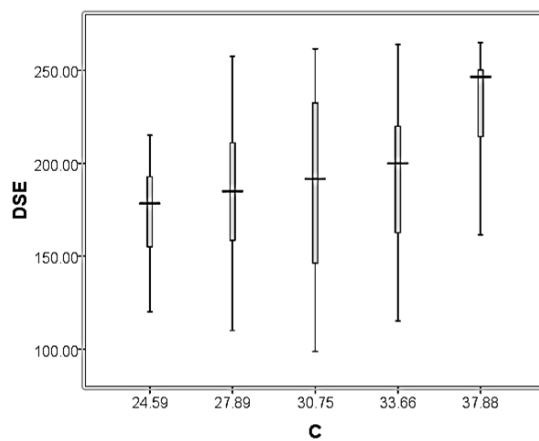
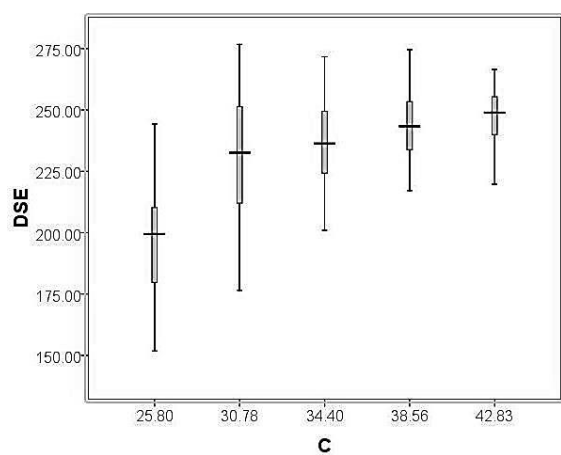
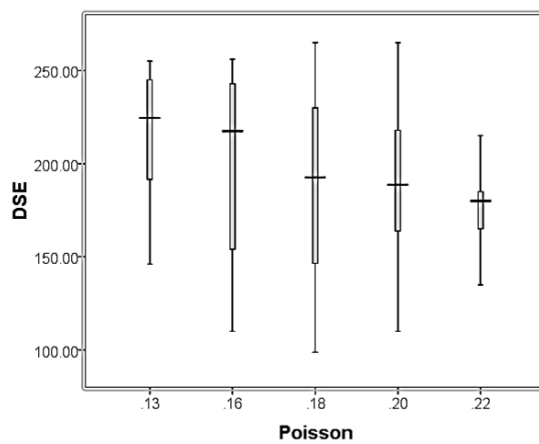
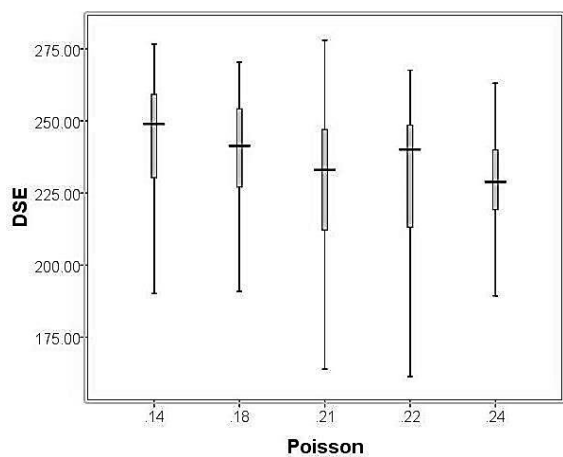
شکل (۴-۶): نمودار تغییرات انرژی ویژه حفاری و عوامل موثر بر آن بر حسب عمق در چاه شماره (۲).

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر انرژی ویژه حفاری به صورت کیفی، از نمودارهای جعبه‌ای استفاده شده است. نمودار جعبه‌ای نموداری است که به کمک معیارهای مرکزی و پراکندگی، موقعیت مجموعه داده‌ها را به شکلی بسیار گویا و مفید ارائه می‌دهد. این نمودار با ایجاد بازه برای هریک از

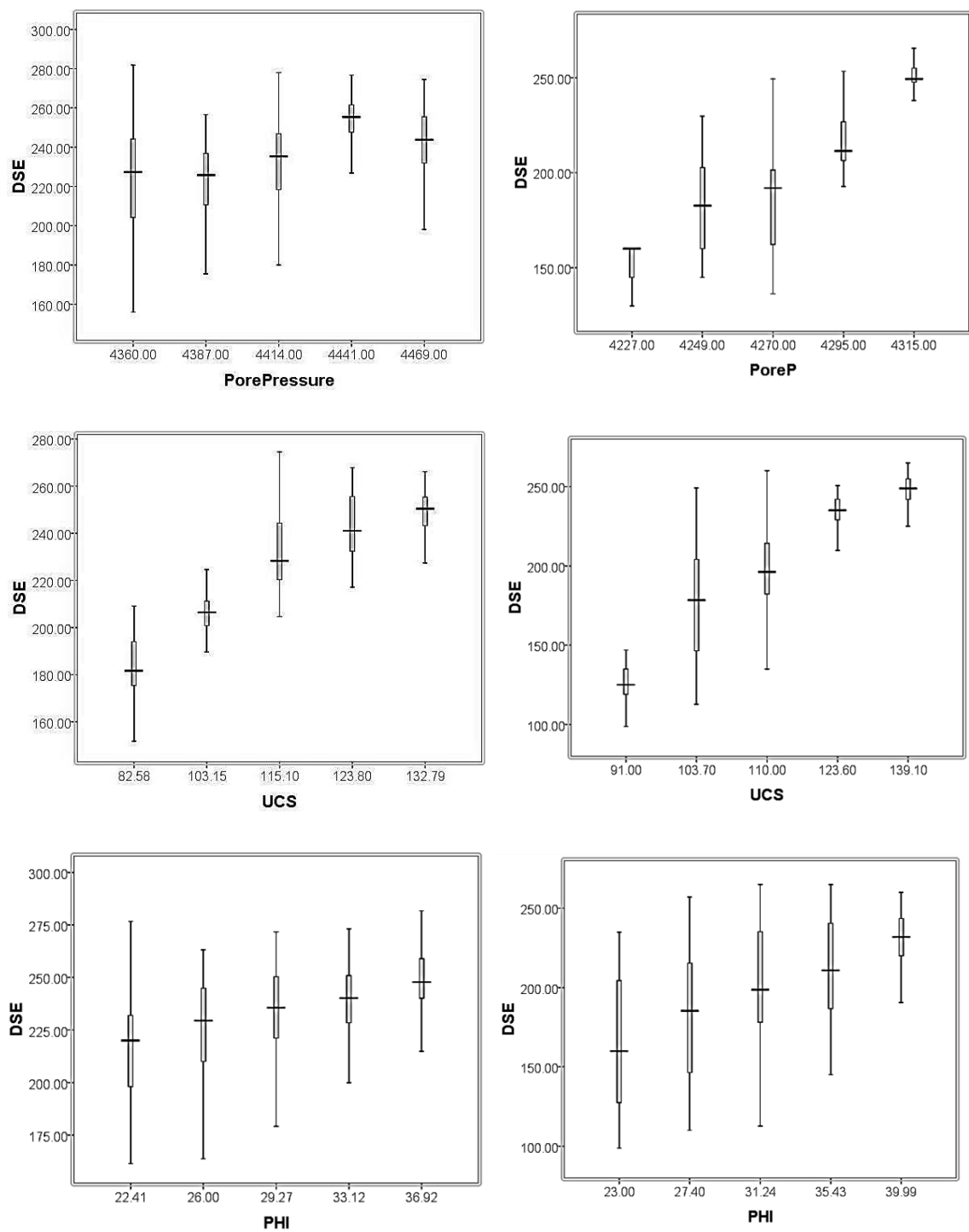
پارامترها رفتار کلی آن‌ها را نسبت به پارامتر هدف نشان می‌دهد. در شکل (۴-۷) نمودار جعبه‌ای تغییرات انرژی ویژه بر اساس تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی در چاه شماره (۱) و (۲) ارائه شده است.



شکل (۴-۷): نمودار جعبه‌ای انرژی ویژه بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه شماره (۱) و (۲).



شکل (۴-۷): نمودار جعبه‌ای انرژی ویژه بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه شماره (۱) و (۲) - (ادامه).



شکل (۴-۷): نمودار جعبه‌ای انرژی ویژه بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در چاه شماره (۱) و (۲)-(ادامه).

ارتباط انرژی ویژه حفاری در چاه شماره (۱) و (۲) با پارامتر مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی سنگ به صورت مستقیم می‌باشد. با افزایش مقادیر مدول یانگ، چسبندگی ذاتی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ، مستحکم و مقاوم‌تر شده و برای شکسته شدن، انرژی بیشتری نیاز خواهد داشت. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، سنگ سخت‌تر شکسته می‌شود در نتیجه انرژی بیشتری برای خردایش نیاز دارد. در چاه شماره (۱) و (۲)، با افزایش مقادیر عمق انرژی ویژه حفاری به دلیل افزایش چسبندگی ذاتی، مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری افزایش یافته است.

در چاه شماره (۱) و (۲) با افزایش ضریب پواسون انرژی ویژه حفاری کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در چاه شماره (۲) نمودار جعبه‌ای در بازه ۰/۲۲ به دلیل کم بودن تعداد داده در این بازه در نظر گرفته نشده است.

در هر دو چاه مورد مطالعه، با افزایش جریان سیال انرژی ویژه حفاری کاهش یافته است. هرچه جریان سیال در چاه بیشتر شود خرده‌های حفاری کمتری در ته چاه مانده و چاه تمیزتر می‌باشد، در نتیجه ارتباط بین سنگ و مته بهتر صورت می‌گیرد و انرژی بهتر به سنگ منتقل شده و با انرژی کمتری می‌توان سنگ را خرد کرد. لازم به ذکر است که در چاه شماره (۲) نمودار جعبه‌ای در بازه ۱۶۲/۷ به دلیل کم بودن مقدار داده در این بازه، مد نظر قرار نگرفته است. از سوی دیگر با افزایش فشار منفذی انرژی ویژه حفاری کاهش پیدا می‌کند، زیرا تنش موثر و مقاومت ویژه سنگ کاهش می‌یابد. اما به دلیل اینکه با افزایش عمق، عموماً مقاومت سنگ افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عمق و احتمالاً افزایش فشار منفذی، انرژی ویژه حفاری افزایش پیدا می‌کند. همچنین رابطه انرژی ویژه با تخلخل ذاتی سنگ غیر خطی است.

## ۴-۴- تحلیل کمی ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه

پردازش داده‌ها و تبدیل آنها به اطلاعات مورد نیاز، زمینه اخذ تصمیم را فراهم می‌آورد. هنر مدیران و کارشناسان در نحوه استفاده از روش‌های آماری و تحلیل اطلاعات به دست آمده تجلی پیدا می‌کند. امروزه بندرت می‌توان بدون استفاده از روش‌های آماری اقدام به تفسیر، تبیین و تحلیل نتایج به دست آمده از تحقیق‌ها و پژوهش‌های علمی کرد. به کمک این روش می‌توان با داشتن اطلاعات گذشته و مدل‌های ریاضی و احتمالی موجود، نحوه رفتار یک مجموعه را در آینده پیش‌بینی کرد (نوروزی، ۱۳۹۳). تحلیل برازش به طور گسترده جهت تشخیص روابط بین متغیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش شامل تکنیک‌های متعددی برای مدل‌سازی و تحلیل ارتباط متغیرهای مستقل با متغیر وابسته است.

در این تحقیق از برازش خطی و غیرخطی چند متغیره جهت بررسی ارتباط بین پارامترهای مستقل شامل: مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چسبندگی، تخلخل، عمق، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و فشار منفذی با پارامتر وابسته (انرژی ویژه حفاری) استفاده گردید. در ابتدا تاثیر هر یک از ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ بر انرژی ویژه حفاری به صورت برازش تک متغیره مورد بررسی قرار گرفت. سپس با ترکیب متغیرهای ژئومکانیکی، یک مدل چند متغیره جهت تخمین انرژی ویژه حفاری ارائه شده است.

## ۴-۴-۱- بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه حفاری

در این قسمت، قبل از ارائه مدل به بررسی نوع ارتباط هر یک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته پرداخته خواهد شد. سپس بهترین ترکیب‌های خطی و غیر خطی موجود بعد از حذف هم‌خطی بین متغیرها جهت پیش‌بینی مدل ارائه گردید. نمودار پراکنش هریک از پارامترهای مستقل با پارامتر وابسته و جدول‌های مربوط به آنها که شامل مدل و ضرایب همبستگی می‌باشد، در هر قسمت آورده شده است.

برازش مدل‌های مختلف روی داده‌های متغیر وابسته و متغیرهای مستقل صورت گرفت و با توجه به نمودار پراکنش و بررسی مقادیر ضریب همبستگی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده مدل مناسب (با حداقل خطا نسبت به سایر مدل‌ها) انتخاب گردید. در جدول زیر روابط مربوط به تخمین انرژی ویژه حفاری بر اساس یکی از پارامترهای مستقل به همراه میزان ضرایب همبستگی آن‌ها ذکر شده است.

جدول (۴-۵): نحوه ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه در چاه شماره (۱).

| رابطه | پارامتر               | معادله ارتباط پارامترها با انرژی ویژه حفاری | ضریب همبستگی |
|-------|-----------------------|---------------------------------------------|--------------|
| (۱-۴) | مدول یانگ (Gpa)       | $DSE=55.896 \times e^{0.0464 E}$            | ۰/۷۰         |
| (۲-۴) | مقاومت فشاری (Mpa)    | $DSE=54.474 \times e^{0.0113 UCS}$          | ۰/۷۱         |
| (۳-۴) | عمق (m)               | $DSE=0.2937 \times e^{0.0018 D}$            | ۰/۷۵         |
| (۴-۴) | جریان سیال (Gal/min)  | $DSE=4898.5 \times e^{-0.008 FLOW}$         | ۰/۶۴         |
| (۵-۴) | فشار منفذی (psi)      | $DSE=4515 \times \ln(PoreP) - 37546$        | ۰/۷۴         |
| (۶-۴) | چسبندگی (Mpa)         | $DSE=122.44 \times e^{0.0144 C}$            | ۰/۲۶         |
| (۷-۴) | زاویه اصطکاک (Degree) | $DSE=114.84 \times e^{0.0167 PHI}$          | ۰/۴۴         |
| (۸-۴) | ضریب پواسون           | $DSE=162.65 \times (Poisson)^{-0.103}$      | ۰/۱۰         |

جدول (۴-۶): نحوه ارتباط میان نگارهای پتروفیزیک با انرژی ویژه در چاه شماره (۱).

| رابطه  | پارامتر                  | معادله ارتباط پارامترها با انرژی ویژه حفاری | ضریب همبستگی |
|--------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| (۹-۴)  | نگاره صوتی فشاری (US/ft) | $DSE=5470.7 \times e^{-0.064 DT}$           | ۰/۷۲         |
| (۱۰-۴) | نگاره صوتی برشی (US/ft)  | $DSE=100.5 \times e^{-0.0003 DTs}$          | ۰/۵۵         |
| (۱۱-۴) | نگاره تخلخل (Dec)        | $DSE=0.1193 \times (NPHI)^{-0.034}$         | ۰/۰۸         |

جدول (۷-۴): نحوه ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه در چاه شماره (۲).

| رابطه  | پارامتر               | معادله ارتباط پارامترها با انرژی ویژه حفاری | ضریب همبستگی |
|--------|-----------------------|---------------------------------------------|--------------|
| (۱۲-۴) | مدول یانگ (Gpa)       | $DSE=120.24 \times e^{0.0235 E}$            | ۰/۷۸         |
| (۱۳-۴) | مقاومت فشاری (Mpa)    | $DSE=117.50 \times e^{0.0058 UCS}$          | ۰/۷۹         |
| (۱۴-۴) | عمق (m)               | $DSE=0.1963 \times e^{0.8849 D}$            | ۰/۴۱         |
| (۱۵-۴) | جریان سیال (Gal/min)  | $DSE=448.96 \times FLOW^{-0.118}$           | ۰/۳۵         |
| (۱۶-۴) | فشار منفذی (psi)      | $DSE=1.9313 \times e^{0.0011 PoreP}$        | ۰/۴۰         |
| (۱۷-۴) | چسبندگی (Mpa)         | $DSE=62.38 \times C^{0.3735}$               | ۰/۵۷         |
| (۱۸-۴) | زاویه اصطکاک (Degree) | $DSE=186.08 \times e^{0.0073 PHI}$          | ۰/۳۲         |
| (۱۹-۴) | ضریب پواسون           | $DSE=179.55 \times (Poisson)^{-0.155}$      | ۰/۲۶         |

جدول (۸-۴): نحوه ارتباط میان نگارهای پتروفیزیک با انرژی ویژه در چاه شماره (۲)

| رابطه  | پارامتر                  | معادله ارتباط پارامترها با انرژی ویژه حفاری | ضریب همبستگی |
|--------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| (۲۰-۴) | نگاره صوتی فشاری (US/ft) | $DSE=537.52 \times e^{-0.015 DT}$           | ۰/۴۱         |
| (۲۱-۴) | نگاره صوتی برشی (US/ft)  | $DSE=145.9 \times e^{-0.002 DTs}$           | ۰/۴۱         |
| (۲۲-۴) | نگاره تخلخل (Dec)        | $DSE=238.62 \times e^{-0.203 NPHI}$         | ۰/۱۱         |

بررسی‌ها نشان داد که در چاه شماره (۱) و (۲) چسبندگی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، فشار منفذی، مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری با انرژی ویژه حفاری رابطه مستقیم دارند. افزایش این پارامترها سبب افزایش انرژی ویژه حفاری خواهد شد. همچنین پارامتر عمق، جریان سیال و ضریب پواسون رابطه‌ی معکوس با انرژی ویژه حفاری دارند.

همچنین با توجه به جدول (۴-۶) و (۴-۸) که ارتباط نگاره‌های چاه پیمایی با انرژی ویژه را نشان می‌دهد، نگاره‌های صوتی فشاری، صوتی برشی و تخلخل با انرژی ویژه حفاری رابطه غیر مسقیم دارد که افزایش این نگاره‌ها باعث کاهش انرژی ویژه حفاری می‌شود. لازم به ذکر است که ارتباط سایر نگاره‌های چاه پیمایی با انرژی ویژه حفاری بررسی شده و به دلیل ضریب همبستگی خیلی پایین از ذکر آن‌ها خودداری شده است.

بررسی کلی جهت ارائه یک مدل از متغیرهای ژئومکانیکی سازند بر انرژی ویژه نشان داد بهترین ترکیب خطی و غیر خطی موجود که می‌توانند در مدل نهایی ظاهر شوند شامل اثر متقابل پارامترها با هم می‌باشند.

#### ۴-۴-۲- بررسی مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی بر روی انرژی ویژه چاه شماره (۱)

بررسی کلی جهت ارائه یک مدل از متغیرهای ویژگی سنگ بر انرژی ویژه حفاری نشان داد بین برخی از متغیرها هم‌خطی بالایی وجود داشته است. یکی از دلایل اصلی این هم‌خطی، روش برآورد پارامترهای ژئومکانیکی از نگاره‌های تخلخل، چگالی، سرعت موج صوتی فشاری و سرعت موج صوتی برشی است. برای حذف هم‌خطی به شناسایی متغیرهای تأثیرگذار پرداخته شد و متغیرهایی که هم‌خطی بالایی داشته‌اند از مدل به صورت گام به گام حذف گردیدند.

در نهایت مدل به یک انسجام کلی دست یافت که نتیجه نهایی مربوط به تحلیل‌های برازشی بین متغیر وابسته (انرژی ویژه حفاری) و متغیرهای مستقل (خصوصیات مکانیکی سنگ و عملیاتی) در جدول (۴-۹) ارائه شده است.

جدول (۹-۴): معادله پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه در چاه شماره (۱)

| رابطه  | معادله ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی با انرژی ویژه حفاری         | ضریب همبستگی |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|--------------|
| (۲۲-۴) | $DSE=213 \times \frac{e^{0.007 UCS+0.004 PHI}}{e^{0.003 FLOW}}$           | ۰/۷۷         |
| (۲۳-۴) | $DSE=1255 \times \frac{e^{0.004 UCS+0.002 PHI}}{e^{0.002 FLOW+0.032 DT}}$ | ۰/۸۰         |

از میان روابط ارائه شده در جدول (۹-۴) رابطه (۲۳-۴) با توجه به ضریب همبستگی بالا به عنوان بهترین رابطه برای انرژی ویژه می باشد اما در تحلیل آزمون F و آزمون T به بی معنی بودن رابطه از آن صرف نظر می شود. بنابراین رابطه (۲۲-۴) به عنوان مناسب ترین مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی جهت پیش بینی انرژی ویژه حفاری بر اساس داده های چاه شماره (۱) می باشد. ضریب همبستگی مدل ترکیبی معادل ۰/۷۷ است. آزمون F و آزمون T نظیر ضرایب مدل معادله (۲۲-۴) معنی دار شده است. جدول های بررسی الگوی مدل، آنالیز واریانس و ضرایب معادله برازش در جدول (۱۰-۴)، (۱۱-۴) و (۱۲-۴) ارائه شده است.

جدول (۱۰-۴): ضریب همبستگی و ضریب تعیین مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۱)

| R    | R.square | Adjusted R.Square | Std. error of the Estimation |
|------|----------|-------------------|------------------------------|
| ۰/۷۷ | ۰/۶۰     | ۰/۶۰              | ۲۵/۸۰                        |

جدول (۱۱-۴): آنالیز واریانس مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۱)

| model      | Sum of square | df  | Mean square | F   | Sig.  |
|------------|---------------|-----|-------------|-----|-------|
| Regression | ۳۴۷۴۱۷        | ۳   | ۱۱۵۸۰۵      | ۱۷۳ | ۰/۰۰۰ |
| Residual   | ۲۲۷۶۶۱        | ۳۴۱ | ۶۶۷/۷       |     |       |
| Total      | ۵۷۵۰۷۹        | ۳۴۴ |             |     |       |

جدول (۴-۱۲): تحلیل ضرایب برازش مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۱)

|          | Unstandardized Coefficient |            | Standardized Coefficients | t    | Sig.  |
|----------|----------------------------|------------|---------------------------|------|-------|
|          | B                          | Std. Error | Beta                      |      |       |
| Constant | ۲۶۹/۷۸                     | ۶۴/۷۸      |                           | ۴/۱۶ | ۰/۰۰۰ |
| UCS      | ۱/۴۵                       | ۰/۱۵۶      | ۰/۴۸۸                     | ۹/۳۳ | ۰/۰۰  |
| PHI      | ۰/۷۲                       | ۰/۲۷۴      | -۰/۴۴۳                    | ۲/۸۹ | ۰/۰۰۸ |
| FLOW     | -۰/۶۵                      | ۰/۱۲۵      | ۰/۳۱۸                     | ۷/۰۹ | ۰/۰۰  |

همانگونه که در جدول (۴-۱۲) ملاحظه می‌شود از میان کلیه پارامترهای مورد نظر عوامل مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی سنگ و جریان سیال در معادله باقی ماندند و بقیه پارامترها به دلیل هم‌خطی و همچنین سطح احتمال بالای ۰/۰۵ از معادله حذف شدند. در این معادله ارتباط انرژی ویژه حفاری با پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی سنگ به صورت مستقیم و با پارامتر جریان سیال به صورت معکوس می‌باشد که بر اساس مطالعات پیشین قابل توجیه است. عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم پارامترها باعث به وجود آمدن هم خطی بین پارامترها شده است. از آنجا که تخمین همه پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از موج برشی و موج فشاری صورت می‌گیرد بنابراین می‌بایست مناسب‌ترین پارامتر انتخاب و سایر پارامترها به دلیل هم خطی بالا از مراحل بررسی حذف شدند. پارامتر ضریب پواسون در معادله استفاده شد اما به علت ناچیز بودن سطح معنی‌داری آن در نهایت از معادله حذف شد.

#### ۴-۳-۴- بررسی مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه چاه شماره (۲)

نتیجه نهایی مربوط به تحلیل‌های برازشی بین متغیر وابسته انرژی ویژه حفاری و متغیرهای مستقل خصوصیات سنگ در چاه شماره (۲) در جدول (۴-۱۳) ارائه شده است. رابطه (۴-۲۵) به عنوان مناسب‌ترین مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی جهت پیش‌بینی انرژی ویژه حفاری می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب همبستگی مدل ترکیبی معادل ۰/۸۰ شده است.

جدول (۴-۱۳): معادله پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه در چاه شماره (۲)

| رابطه  | معادله ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه حفاری                                            | ضریب همبستگی |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| (۴-۲۴) | $DSE=139 \times \frac{e^{0.005 UCS} \times C^{0.0003}}{e^{0.005 DT} \times Poisson^{0.103}}$       | ۰/۷۸         |
| (۴-۲۵) | $DSE=127.47 \times \frac{e^{0.005 UCS} \times e^{0.001 PHI}}{e^{0.0001 FLOW}}$                     | ۰/۸۰         |
| (۴-۲۶) | $DSE=110 \times \frac{e^{0.005 UCS} \times e^{0.001 PHI}}{e^{0.0001 FLOW} \times Poisson^{0.102}}$ | ۰/۸۲         |

از میان روابط ارائه شده در جدول (۴-۱۳) رابطه (۴-۲۶) با توجه به ضریب همبستگی بالا به عنوان بهترین رابطه برای انرژی ویژه می‌باشد اما در تحلیل آزمون F و آزمون T با توجه به بی معنی بودن رابطه از آن صرف نظر می‌شود. آزمون F و آزمون T نظیر ضرایب مدل معادله (۴-۲۵) معنی‌دار شده است. جدول‌های بررسی الگوی مدل، آنالیز واریانس و ضرایب معادله برازش در جدول (۴-۱۴)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶) ارائه شده است.

جدول (۴-۱۴): ضریب همبستگی و ضریب تعیین مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۲).

| R    | R.square | Adjusted R.Square | Std. error of the Estimation |
|------|----------|-------------------|------------------------------|
| ۰/۸۰ | ۰/۶۴     | ۰/۶۴              | ۱۴/۳۴                        |

جدول (۴-۱۵): آنالیز واریانس مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۲).

| model      | Sum of square | df  | Mean square | F   | Sig.  |
|------------|---------------|-----|-------------|-----|-------|
| Regression | ۱۸۷۴۹۲        | ۳   | ۶۲۴۹۷       | ۳۰۳ | ۰/۰۰۰ |
| Residual   | ۱۰۳۷۷۵        | ۵۰۴ | ۲۰۵/۹۰      |     |       |
| Total      | ۲۹۱۲۶۷        | ۵۰۷ |             |     |       |

جدول (۴-۱۶): تحلیل ضرایب برازش مدل ترکیبی پارامترهای ژئومکانیکی چاه شماره (۲).

|          | Unstandardized Coefficient |            | Standardized Coefficients | t     | Sig.  |
|----------|----------------------------|------------|---------------------------|-------|-------|
|          | B                          | Std. Error | Beta                      |       |       |
| Constant | ۹۸                         | ۷/۹۷       |                           | ۱۲/۲۸ | ۰/۰۰۰ |
| UCS      | ۱/۱۷                       | ۰/۰۴۵      | ۰/۷۲۰                     | ۲۶/۳۰ | ۰/۰۰  |
| PHI      | ۰/۳۶                       | ۰/۱۶۱      | ۰/۰۷۱                     | ۲/۲۳  | ۰/۰۲۰ |
| FLOW     | -۰/۰۴۷                     | ۰/۰۰۸      | -۰/۱۷۹                    | -۵/۶۶ | ۰/۰۰  |

از میان کلیه پارامترهای مورد نظر در چاه شماره (۲) مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی سنگ و جریان سیال در معادله باقی ماندند و بقیه پارامترها به دلیل هم خطی و همچنین سطح احتمال بالای ۰/۰۵ از معادله حذف شدند. در این معادله ارتباط انرژی ویژه حفاری با پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی به صورت مستقیم و با پارامتر جریان سیال به صورت معکوس می باشد که بر اساس مطالعات پیشین قابل توجیه است. ضریب بتا در جدول تحلیل ضرایب برازش مدل، نشان دهنده شدت تاثیر پارامتر در رابطه ارائه شده است. عامل مقاومت فشاری با توجه به ضریب بتای بالا، مهم ترین پارامتر ژئومکانیکی موثر بر انرژی ویژه حفاری می باشد.

با توجه به مشابه بودن روابط (۴-۲۲) و (۴-۲۵) در چاه شماره (۱) و (۲) می‌توان با در تلفیق کلیه اطلاعات دو چاه به رابطه (۴-۲۷) می‌تواند به عنوان شاخص انرژی ویژه حفاری پیشنهاد شود. ضریب همبستگی این رابطه معادل ۰/۷۸ می‌باشد.

$$DSE=109 \times \frac{e^{0.007 UCS + 0.003 PHI}}{e^{0.0006 FLOW}} \quad \text{رابطه (۴-۲۷)}$$

که در این رابطه انرژی ویژه حفاری بر حسب (Psi)، مقاومت فشاری بر حسب (Mpa)، زاویه اصطکاک داخلی بر حسب (Degree) و جریان سیال بر حسب (gal/min) است.

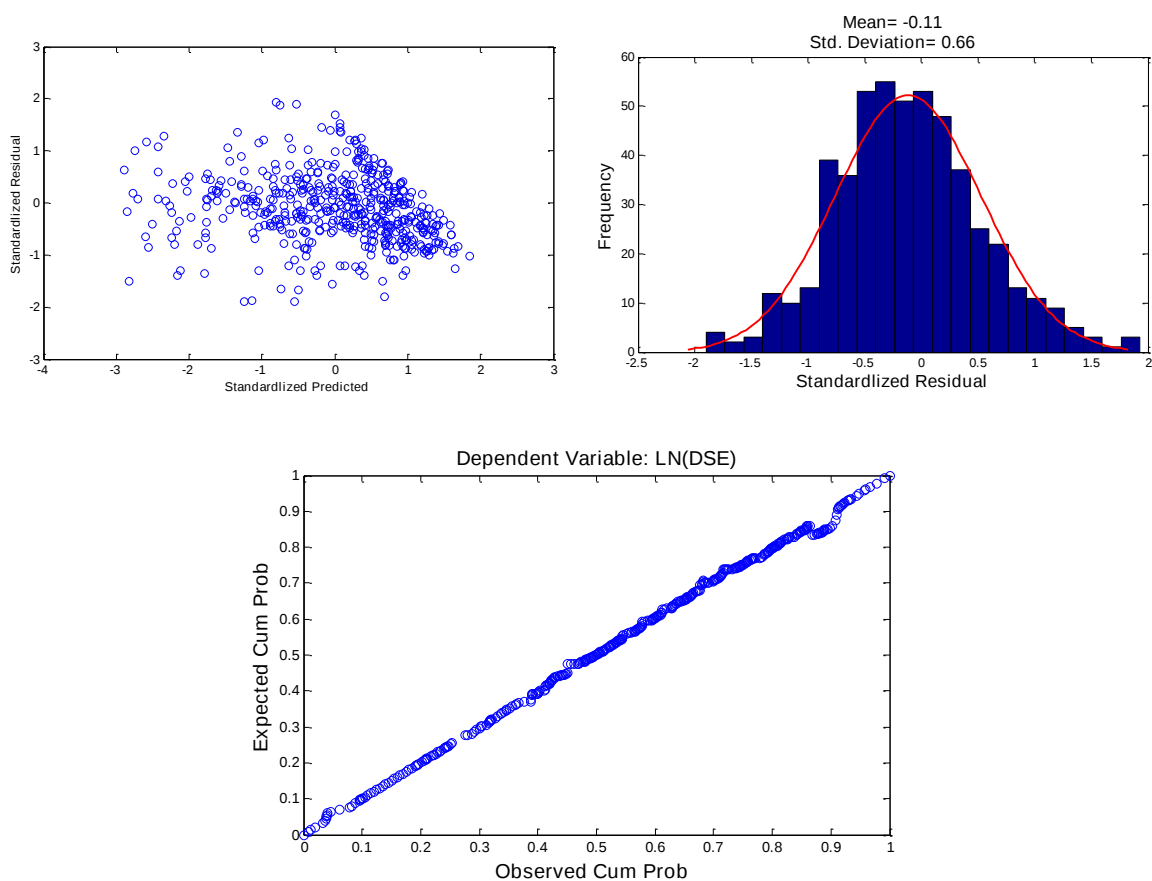
#### ۴-۴-۴- تعیین اعتبار نتایج مدل‌های آماری برازشی

پس از تحلیل برازش باید به بررسی فرض نرمال بودن توزیع داده‌های ورودی پرداخت. با بررسی توزیع باقی‌مانده‌ها می‌توان صادق بودن یا نبودن فرض‌ها را تعیین کرد. تفاوت بین مقدار متغیر مشاهده شده و مقداری که توسط معادله بدست آمده، مقدار باقی‌مانده<sup>۱</sup> است. برای بررسی نرمال بودن، نمودار نرمال برازش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که باقی‌مانده‌ها به صورت یک نمودار نرمال باشد، بایستی نقاط نزدیک خط مستقیم قرار گیرند. با بررسی توزیع باقی‌مانده می‌توان صحیح بودن فرض‌ها را تعیین کرد. باقی‌مانده‌های بدست آمده باید مشخصات زیر را داشته باشند:

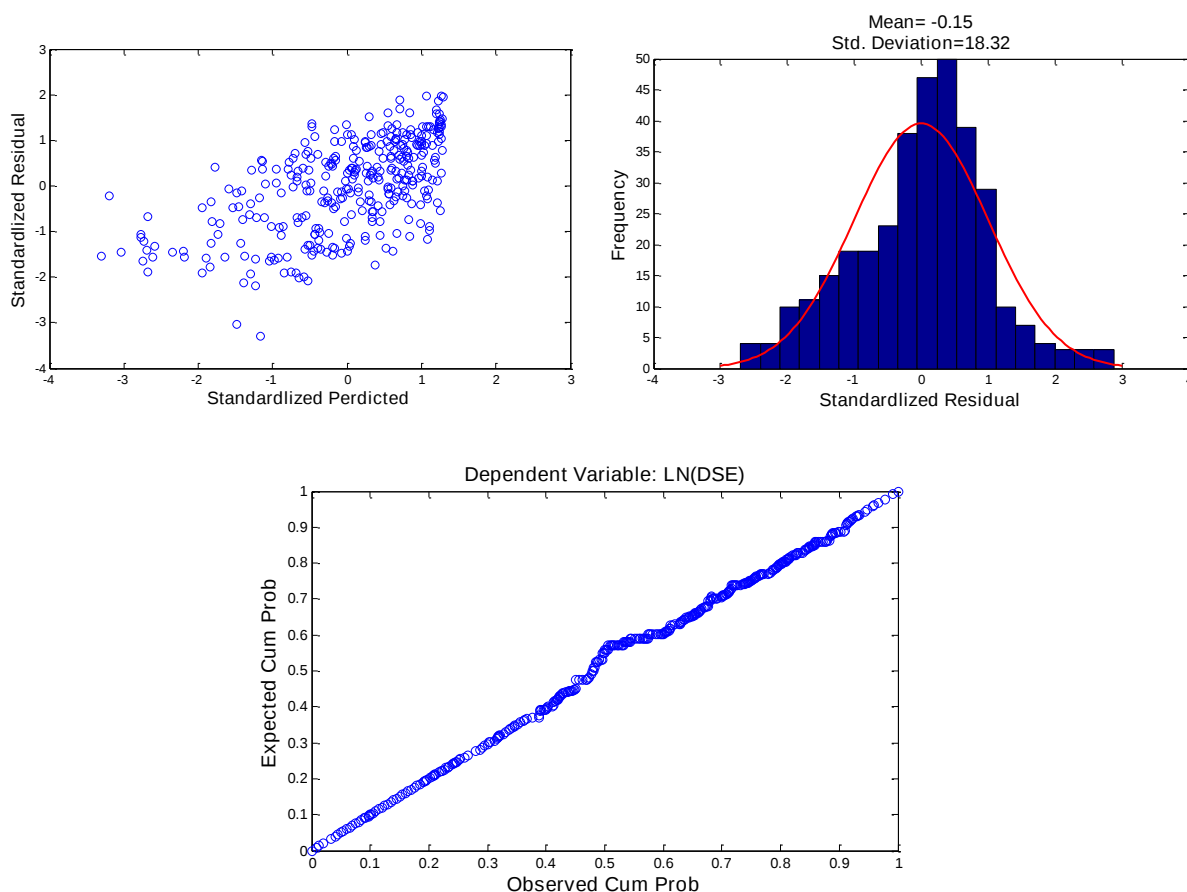
- باید توزیع باقی‌مانده‌ها نرمال و میانگین خطای آن برابر صفر باشد.
- باید واریانس آن‌ها برای تمام مقادیر متغیر مستقل ثابت باشد.
- هنگامی که باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده قرار می‌گیرند، نباید رابطه‌ی خاصی مشاهده شود.

<sup>۱</sup> -Residual

بدین ترتیب به منظور بررسی و تحلیل باقی‌مانده‌ها از نمودار ترسیم شده که در شکل (۴-۸) و (۴-۹) آورده شده است استفاده می‌شود. نتایج حاصل از این نمودارها، نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تأیید می‌نماید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روابط ارائه شده از اعتبار و صحت کافی برخوردار هستند.



شکل (۴-۸) تحلیل باقی‌مانده‌ها برای پیش‌بینی انرژی حفاری ویژه بر اساس پارامتر ژئومکانیکی در چاه شماره (۱).



شکل (۴-۹) تحلیل باقی مانده‌ها برای پیش‌بینی انرژی حفاری ویژه بر اساس پارامتر ژئومکانیکی در چاه شماره (۲).

#### ۴-۵- جمع‌بندی

جهت پیش‌بینی انرژی ویژه حفاری، شناسایی عوامل موثر در حفاری ضروری است. در مطالعه پیش‌رو عوامل موثر ژئومکانیکی تقسیم‌بندی شدند که از این میان، عوامل مهم‌تر بر اساس مطالعات پیشین جهت پیش‌بینی انتخاب شدند. پس از تشکیل بانک اطلاعاتی، داده‌ها جهت تحلیل آماری آماده‌سازی شدند. در ابتدا به بررسی کیفی نوع ارتباط هر پارامتر با انرژی ویژه حفاری توسط نمودار جعبه‌ای پرداخته شد. سپس تحلیل برآزشی بر روی هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی انجام گرفت که در نهایت با استفاده ترکیب پارامترهای ژئومکانیکی باهم، ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه حفاری محاسبه شد. در معادله بدست آمده انرژی ویژه، عوامل مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک

داخلی سنگ و جریان سیال مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی در معادله هستند. به منظور یافتن رابطه بین انرژی ویژه حفاری و پارامترهای موثر بر آن از مدل برازش چند متغیره غیر خطی استفاده گردید. مدل‌سازی انرژی ویژه حفاری توسط برازش چند متغیره که شامل پارامترهای خصوصیات ژئومکانیکی سنگ، نگاره‌های چاه پیمایی بوده ساخته شده است. پس از تحلیل و بررسی مدل، ضریب همبستگی‌های به دست آمده برای چاه شماره (۱) و (۲) به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۰ و برای مجموع دو چاه ۰/۷۸ گزارش گردید. از تحلیل باقی‌مانده‌ها برای اعتبار سنجی و صحت معادله بدست آمده برای انرژی ویژه حفاری استفاده شده و مورد تایید قرار گرفت.



## فصل پنجم

# طبقه بندی ژئومکانیکی سازندهای مورد مطالعه بر اساس مقادیر انرژی ویژه حفاری

## ۵-۱- مقدمه

پیش‌بینی رفتار سنگ با توجه به پیچیدگی ویژگی‌های ژئومکانیکی آن، به عوامل متعددی وابسته است. مدلسازی با ابزارهای ریاضی برای سیستم‌های پیچیده علاوه بر زمان بر بودن، دارای عدم قطعیت مناسب و کارا نیست. لذا درچنین مواردی به کارگیری روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی جایگزین خوبی تشخیص داده و نتایج مطلوبی نیز داشته‌اند. از سوی دیگر سیستم‌های هوش مصنوعی با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از قوانین، می‌توانند جنبه‌های کیفی دانش انسان و فرآیندهای استدلالی را بدون کاربرد آنالیز کمی دقیق مدل کنند. امروزه خوشه بندی<sup>۱</sup> و طبقه بندی<sup>۲</sup> یکی از پر کاربردترین مسائل در زمینه هوش مصنوعی به شمار می‌آید. خوشه بندی به علت رشد روز افزون حجم داده‌ها و پیچیدگی روابط بین داده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. خوشه بندی می‌تواند در بهبود نتایج بدست آمده از مدلسازی و دسته بندی اطلاعات، موثر واقع شود. برای پیش بینی بهتر رفتار سنگ می‌توان ابتدا داده‌های ژئومکانیکی و عملیاتی را طبقه‌بندی و یا خوشه بندی کرد، سپس از روش‌های هوش مصنوعی برای انجام مدلسازی استفاده کرد.

در این پژوهش، انرژی ویژه حفاری ابتدا بر اساس الگوریتم خودسازمانده<sup>۳</sup> خوشه‌بندی می‌شود، سپس پارامترهای ژئومکانیکی بر اساس مقادیر انرژی ویژه حفاری به طبقه‌های مختلف دسته‌بندی می‌شود. با توجه به اینکه انرژی ویژه حفاری سنگ نماینده پارامترهای عملیاتی می‌باشد و همچنین وابسته به پارامترهای ژئومکانیکی سنگ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت انتخاب انرژی ویژه حفاری سنگ به عنوان پارامتری برای برقراری ارتباط بین پارامترهای عملیات حفاری و خواص مکانیکی سنگ، انتخاب قابل قبولی می‌باشد. برای این منظور از رابطه‌ی انرژی ویژه حفاری که تاثیر کلیه پارامترهای حفاری در آن اعمال شده، استفاده گردیده است.

---

<sup>1</sup> - Clustering

<sup>2</sup> - Classification

<sup>3</sup> -Self-Organizing Map

## ۵-۲- خوشه بندی

خوشه بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت بوده و فرآیند خودکاری است که در طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که اعضای آن مشابه یکدیگر می‌باشند تقسیم می‌شوند. به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. بنابراین خوشه مجموعه‌ای از اعداد (ویژگی‌ها) می‌باشد که در آن اعداد (ویژگی‌ها) با یکدیگر مشابه بوده و با اعداد (ویژگی‌ها) موجود در خوشه‌های دیگر غیر مشابه می‌باشند. روش‌های متفاوتی برای خوشه‌بندی داده‌ها توسط متخصصین ارائه شده است. الگوریتم‌های خوشه بندی متفاوتی هم چون الگوریتم خودسازمانده (SOM)، Fuzzy C-means، K-means، Hierarchical Clustering (خوشه بندی سلسه مراتبی) و Mixture of Gaussians وجود دارد (Hecht-Nielsen, 1991). به علت کارایی بالا الگوریتم SOM در خوشه بندی نسبت به سایر الگوریتم‌ها، از این الگوریتم استفاده شده است. بنابراین در این پژوهش ابتدا داده‌ها بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری با استفاده الگوریتم SOM خوشه بندی شده است. سپس پارامترهای ژئومکانیکی سازند بر اساس این شاخص طبقه بندی گردیده است. در ادامه الگوریتم SOM و الگوریتم K-means تشریح می‌شود.

### ۵-۲-۱- الگوریتم خود سازمانده

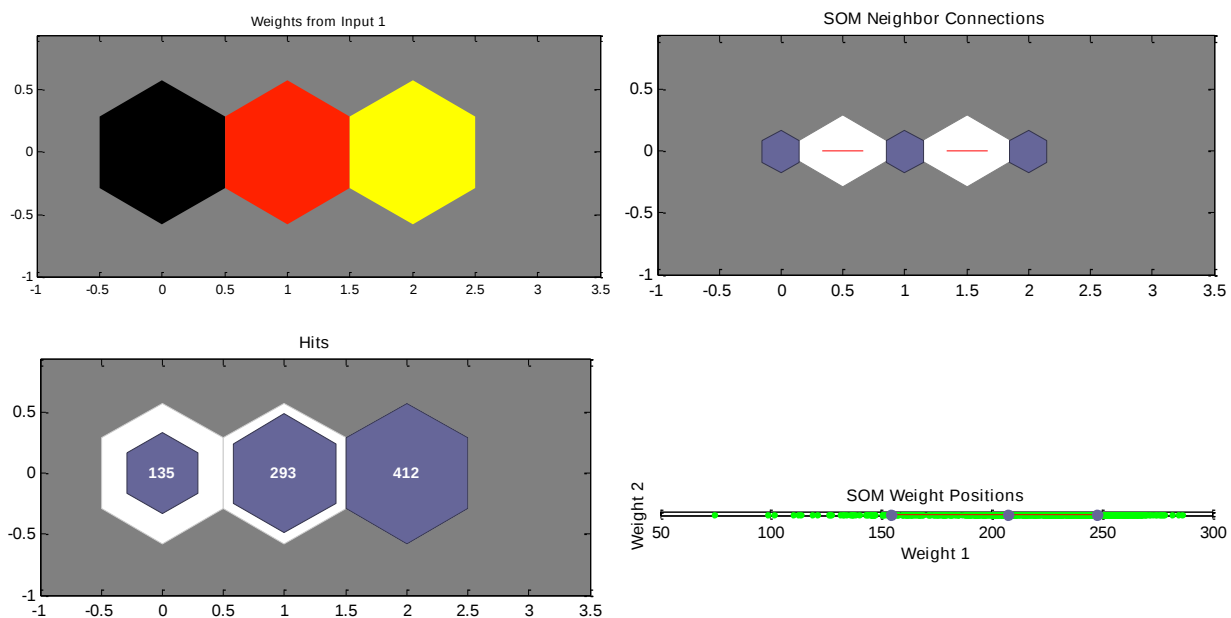
الگوریتم خودسازمانده نوعی شبکه عصبی با قابلیت خوشه بندی است که در سال‌های اخیر کاربردهای فراوانی را در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی، پزشکی، زیست شناسی و اقتصاد پیدا کرده است. الگوریتم خودسازمانده یا شبکه عصبی (SOM)، از روش یادگیری رقابتی برای آموزش استفاده کرده و بر مبنای ویژگی‌های خاصی از مغز انسان توسعه یافته است (Alpaydin, 2004).

نقشه خودسازمانده، ابزار بسیار خوبی برای خوشه بندی داده‌هاست و می‌تواند روابط آماری غیرخطی بین داده‌های ورودی را به روابط هندسی ساده تبدیل کند. محاسبات این روش یک فرایند برازشی بازگشتی نامتغیری (ناپارامتری) است که برازش یک مجموعه مشخص از بردارهای مدل را به فضای بردارهای قابل مشاهده در قالب الگوریتمی تبدیل می‌کند. خوشه‌ها در یک فرایند یادگیری رقابتی

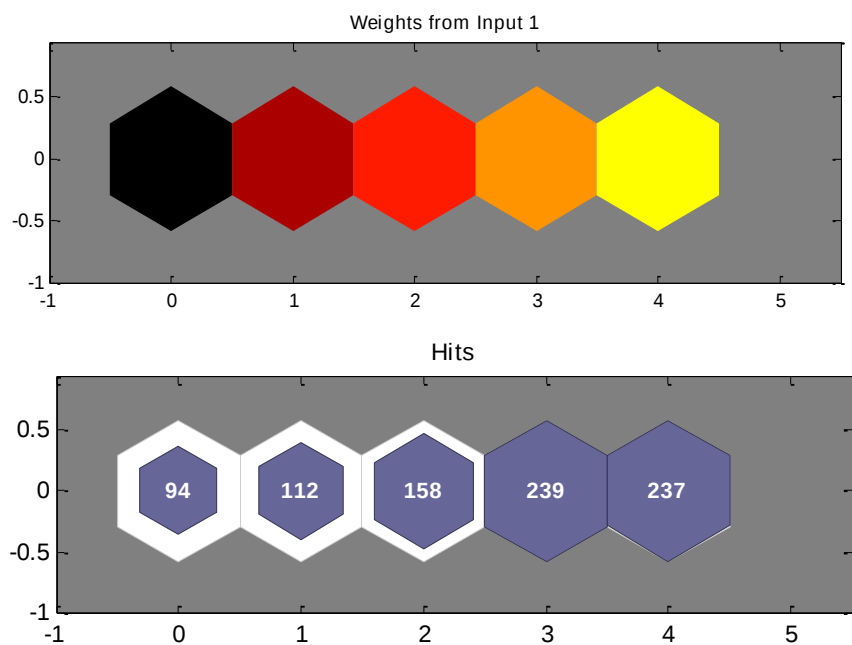
نسبت به متغیرهای ورودی منظم می شوند، محل خوشه‌های تنظیم شده در شبکه، به گونه‌ای نظم می‌یابد که برای متغیرهای ورودی، یک دستگاه مختصات معنی دار روی شبکه ایجاد شود. بنابراین، یک نقشه خود سازمانده، یک نقشه توپوگرافی از متغیرهای ورودی را تشکیل می‌دهد که در آن، محل قرار گرفتن خوشه‌ها، متناظر با ویژگی‌های ذاتی متغیرهای ورودی است. در مطالعات علوم زمین، منطقه مورد مطالعه معمولاً به صورت پیوسته و یکپارچه بررسی می‌شود. این در حالی است که ممکن است عواملی مانند ناپیوستگی، گسل و تغییر سازند باعث تقسیم منطقه به پهنه‌های مختلف، با ویژگی‌های متفاوت شده باشد (Hecht-Nielsen, 1991).

برای دستیابی به نتایج معتبر، ابتدا باید منطقه مورد مطالعه را به چند خوشه تقسیم کرد. بر اساس تعریف خوشه، متغیرهای در یک دسته باید بیشترین شباهت را با هم داشته و با متغیرهای دسته‌های دیگر، بیشترین تفاوت را داشته باشد. یکی از دلایل انتخاب الگوریتم SOM برای خوشه بندی کارایی بالا است. به دلیل عدم اطلاع از بهترین خوشه بندی برای انرژی ویژه حفاری و این که چه تعداد خوشه، بهترین عملکرد و نتیجه را خواهد داشت از این الگوریتم شده است (Alpaydin, 2004).

برای انجام این خوشه بندی انرژی ویژه از مجموع اطلاعات دو چاه مورد مطالعه استفاده شده است. برای انجام خوشه بندی انرژی ویژه حفاری به عنوان ورودی به الگوریتم SOM در نظر گرفته شده است. تعداد خوشه برای انجام این پژوهش سه خوشه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است ابتدا داده‌ها به خوشه‌های متفاوت و بیشتری تقسیم بندی شد ولی هم پوشانی و نزدیکی زیاد خوشه‌ها به هم باعث شد که انرژی ویژه حفاری به بیشتر از سه خوشه تقسیم بندی نشود. شکل (۵-۱) و (۵-۲) خوشه بندی انرژی ویژه حفاری به سه و پنج خوشه نمایش داده شده است.

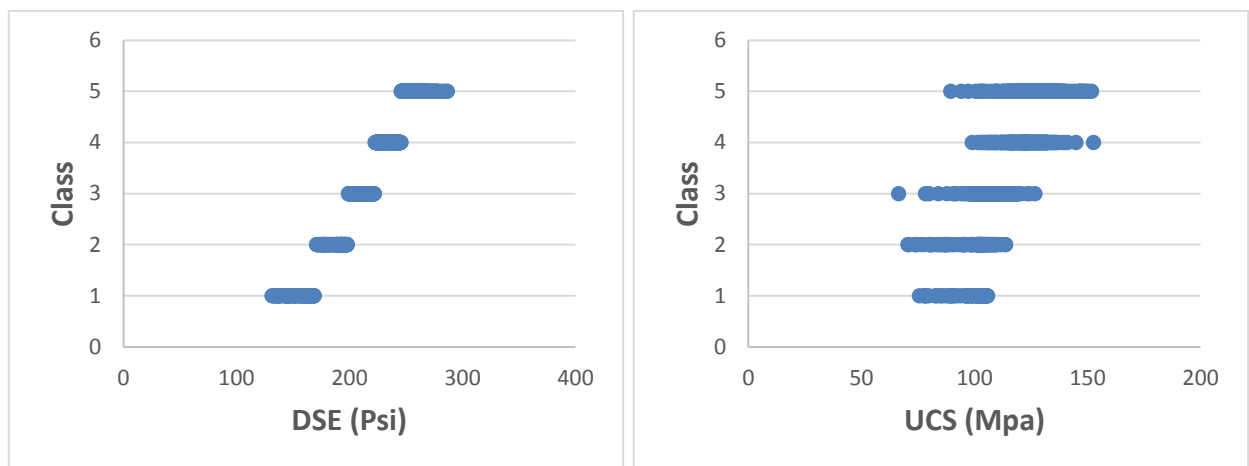


شکل (۵-۱): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری بر اساس الگوریتم SOM - تقسیم بندی به سه خوشه.



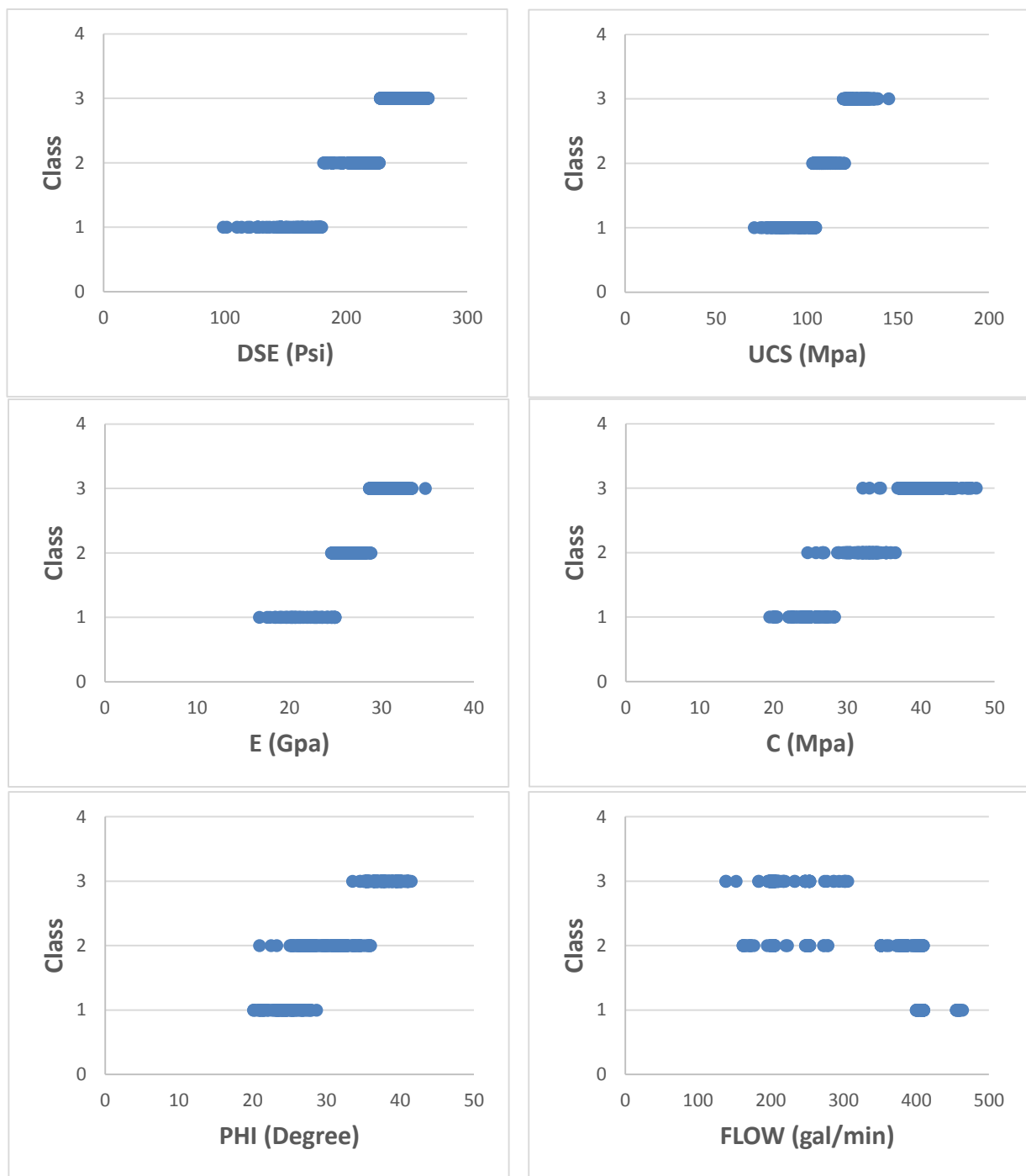
شکل (۵-۲): خوشه بندی انرژی ویژه حفاری بر اساس الگوریتم SOM - تقسیم بندی به پنج خوشه.

هنگامی که انرژی ویژه حفاری به چهار خوشه یا بالاتر از آن تقسیم بندی می‌شود، پارامترهای ژئومکانیکی در این تقسیم بندی دارای هم پوشانی بوده و نمی‌توان برای این پارامترها، طبقه بندی مناسبی ارائه داد. در شکل (۳-۵) نمونه‌ای از تقسیم بندی انرژی ویژه حفاری و خصوصیات مکانیکی سنگ (به عنوان نمونه مقاومت فشاری تک محوری) به پنج خوشه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این طبقه بندی مقاومت فشاری تک محوری دارای هم پوشانی است.



شکل (۳-۵): تقسیم بندی انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوری به ۵ خوشه.

همانطور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود، هنگامی که انرژی ویژه حفاری به سه خوشه تقسیم بندی می‌شود، پارامترهای ژئومکانیکی مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چسبندگی سنگ به سه خوشه منظم تقسیم بندی شده و پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و جریان سیال در خوشه دوم هم پوشانی دارند. لازم به ذکر است که داده‌های پراکنده در هر خوشه در نظر گرفته نشده است و از محاسبات حذف شده‌اند.



شکل (۴-۵): تقسیم بندی انرژی ویژه حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی به سه خوشه.

در جدول زیر تغییرات انرژی ویژه حفاری و پارامترهایی ژئومکانیکی در خوشه‌های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول (۵-۱): خوشه بندی پارامترهای ژئومکانیکی و عملیات حفاری (من جمله DSE).

| پارامتر        | خوشه ۱ | خوشه ۲  | خوشه ۳  |
|----------------|--------|---------|---------|
| DSE (Psi)      | <۱۸۰   | ۱۸۰-۲۲۸ | >۲۲۸    |
| UCS (Mpa)      | <۱۰۴   | ۱۰۴-۱۲۰ | >۱۲۰    |
| E (Gpa)        | <۲۵    | ۲۵-۲۹   | >۲۹     |
| C (Mpa)        | <۲۸    | ۲۸-۳۶   | >۳۶     |
| Phi (degree)   | <۲۸    | ۲۵-۳۷   | >۳۵     |
| Flow (gal/min) | >۴۰۰   | ۱۶۰-۴۰۰ | ۱۳۰-۳۰۰ |

بر اساس جدول و نتایج بالا می‌توان نتیجه گرفت که خوشه (۱) در طبقه سنگ متوسط، خوشه (۲) و (۳) در طبقه سنگ سخت و بسیار سخت قرار گرفته است. به دلیل شباهت ویژگی‌های خوشه (۲) و (۳) این دو خوشه، یک خوشه واحد در نظر گرفته شده است. هر چه سنگ سخت‌تر باشد مقدار انرژی مصرفی برای حفاری سنگ بیشتر خواهد بود در نتیجه مقدار DSE بیشتر می‌شود. همچنین پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ در میزان مصرف انرژی بی‌تاثیر نبوده است فلذا هر چقدر میزان این دو پارامتر بیشتر باشد میزان مصرف انرژی برای حفاری سنگ نیز بیشتر می‌شود. افزایش جریان سیال می‌تواند سبب کاهش انرژی ویژه حفاری شود، هر چقدر جریان سیال بیشتر شود خرده‌های حفاری کمتری در چاه مانده و انتقال انرژی بین مته و سنگ بهتر صورت می‌گیرد. باید به این نکته توجه داشت که جریان سیال بیش از حد باعث مغشوش شدن جریان و شستن لایه‌ها می‌شود. برای اعتبار سنجی خوشه‌بندی انجام شده، از الگوریتم K-Means استفاده شده است.

## ۵-۲-۲- الگوریتم K-Means

روش K-Means یکی از روش‌های خوشه‌بندی داده‌ها در داده کاوی است. این روش علی‌رغم سادگی آن یک روش پایه برای بسیاری از روش‌های خوشه‌بندی دیگر (مانند خوشه‌بندی فازی) محسوب می‌شود. برای انجام این الگوریتم حالت‌های مختلفی بیان شده است. ولی همه آنها دارای روالی تکراری هستند که برای تعدادی ثابت از خوشه‌ها، سعی در تخمین موارد ذیل دارند (Alpaydin, 2004):

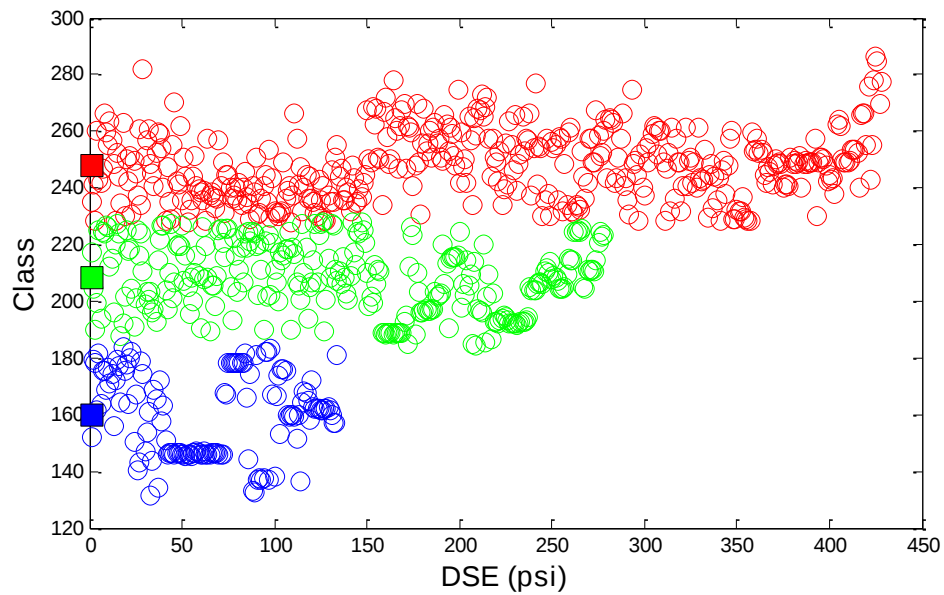
(۱) بدست آوردن نقاطی به عنوان مراکز خوشه‌ها: این نقاط در واقع همان میانگین نقاط متعلق به هر خوشه هستند.

(۲) نسبت دادن هر نمونه داده به یک خوشه، به نحوی که داده‌های مورد نظر کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را باشد.

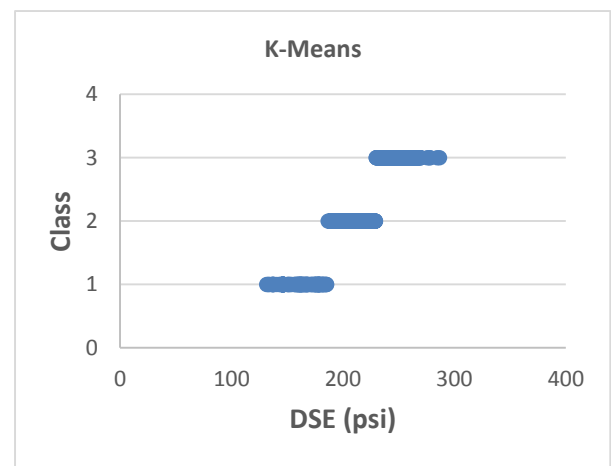
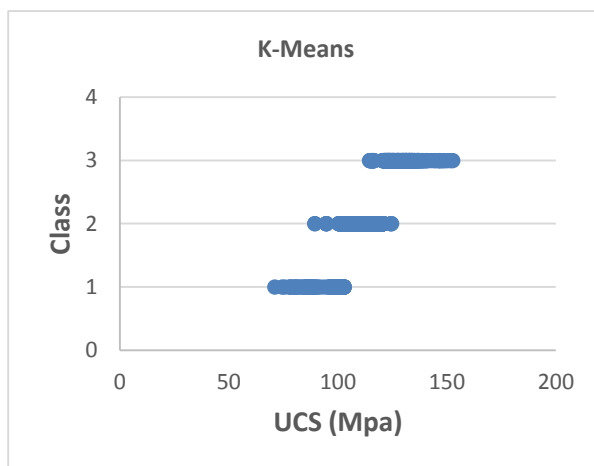
در نوع ساده‌ای از این روش ابتدا به تعداد خوشه‌های مورد نیاز نقاطی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس در داده‌ها با توجه با میزان نزدیکی (شباهت) به یکی از این خوشه‌ها نسبت داده می‌شوند. بدین ترتیب خوشه‌های جدیدی حاصل می‌شود. با انجام همین روال می‌توان در هر تکرار با میانگین‌گیری از داده‌ها مراکز جدیدی برای آنها محاسبه کرد و مجدداً داده‌ها را به خوشه‌های جدید نسبت داد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر تغییری در داده‌ها حاصل نشود (Sander, 2003).

در شکل (۵-۵) انرژی ویژه حفاری به سه خوشه تقسیم بندی شده است. که با رنگ‌های متفاوت قابل تشخیص می‌باشند. همچنین در شکل (۵-۶) طبقه بندی انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوری بر اساس الگوریتم K-Means نمایش داده شده است.

در خوشه‌بندی انرژی ویژه حفاری با الگوریتم K-Means، پارامترهای ژئومکانیکی به طبقه‌های منظم تقسیم‌بندی شده و همانند الگوریتم SOM پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چسبندگی سنگ به سه دسته تقسیم بندی شده است.



شکل (۵-۵): خوشه بندی بر اساس الگوریتم K-Means.



شکل (۵-۶): تقسیم بندی انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوری به سه خوشه بر اساس الگوریتم K-Means

Means

نتایج بدست آمده از الگوریتم K-Means با نتایج بدست آمده از الگوریتم SOM از همخوانی کافی برخوردار است فلذا می توان نتیجه گرفت که نتایج بدست آمده از خوشه بندی بر اساس الگوریتم SOM، از صحت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است.

### ۵-۳- تخمین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ از روی داده‌های انرژی ویژه

در این پژوهش از انرژی ویژه حفاری برای تعیین خواص مکانیکی سنگ با استفاده از شبکه عصبی-فازی با ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. با توجه به اینکه انرژی ویژه حفاری سنگ، خود وابسته به خصوصیات مکانیکی سنگ می‌باشد، می‌توان انتخاب انرژی ویژه حفاری سنگ به عنوان پارامتری برای برقراری ارتباط بین پارامترهای حفاری و خواص مکانیکی سنگ را انتخاب قابل قبولی بوده دانست. برای این منظور از رابطه‌ی انرژی ویژه حفاری که تاثیر کلیه پارامترهای حفاری در آن اعمال شده، استفاده شده است.

برای تخمین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ ابتدا انرژی ویژه حفاری برای سازند محاسبه شد. سپس با استفاده از تبدیل موجک ایستا، استخراج ویژگی از انرژی ویژه حفاری صورت گرفت. بدین منظور سیگنال انرژی ویژه با تابع موجک db1 تا سطح چهارم تجزیه شد. مقادیر تقریب و جزئیات هر سطح آن به عنوان ورودی شبکه ANFIS-PSO و ANFIS-GA در نظر گرفته شد. خصوصیات مکانیکی سنگ شامل مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که تخمین زاویه اصطکاک داخلی نسبت به سه پارامتر دیگر در هر دو مدل از دقت کمتری برخوردار است. به علت دسترسی راحت به پارامترهای عملیاتی در فرآیند حفاری، روش ارائه شده می‌تواند در غیاب نگارهای پتروفیزیکی، اطلاعات خوبی از خصوصیات ژئومکانیکی سنگ ارائه نماید. در ادامه ساختار شبکه انفیس و تابع موجک و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی تشریح می‌شود.

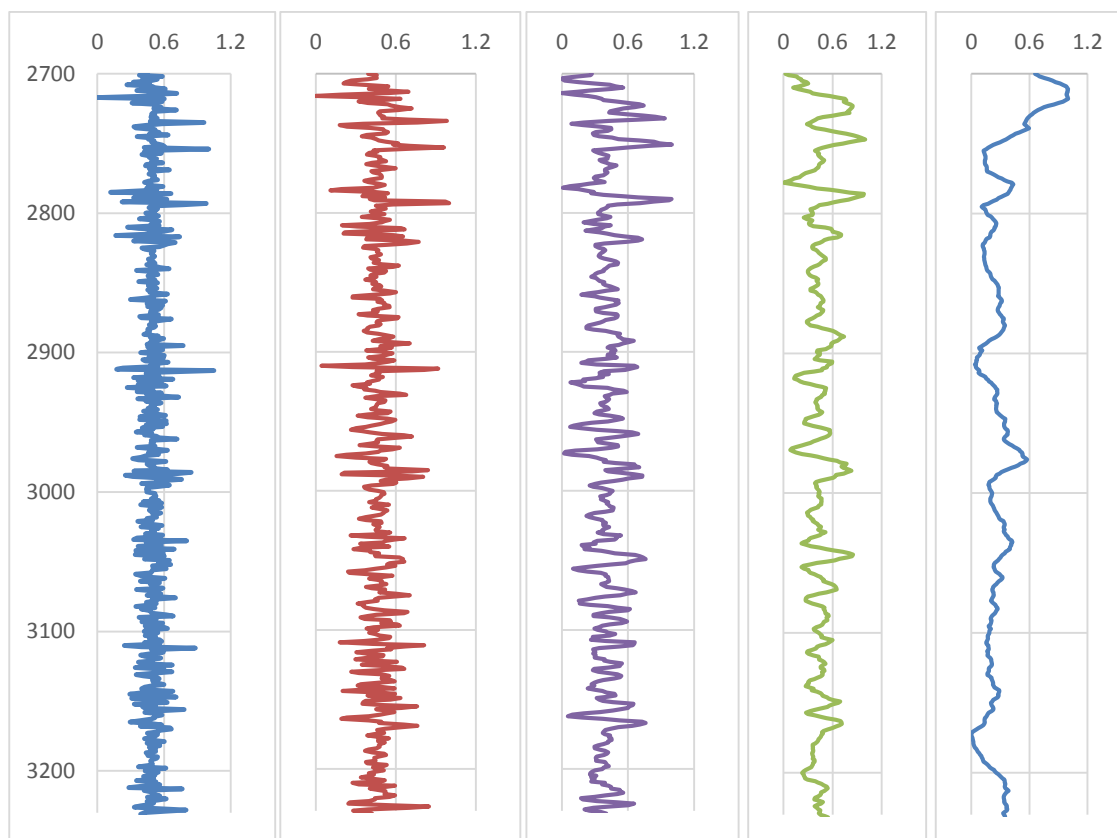
### ۵-۳-۱- ساختار شبکه انفیس و تابع موجک

ساختار ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) که در سال ۱۹۹۳ ارائه شد، حاصل تلفیق شبکه‌های عصبی تطبیقی و منطق فازی است که با به کارگیری فرآیند یادگیری ترکیبی، می‌توان پارامترهای آن را برای مدل‌سازی سیستم‌ها براساس داده‌های ورودی-خروجی موجود تنظیم نمود.

استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات یکی دیگر از تکنیک‌های بهبود نتایج در این تحقیق است. در مدل‌های انفیس نیز در رابطه با تنظیم پارامترها، الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و حداقل مربعات که الگوریتم ترکیبی ANFIS-PSO نام دارد به کار رفته است (Jyh-Shing & Jang, 1993). موجک یا ویولت (Wavelet) دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌رود که وضوح هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجک‌ها نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. تعداد زیادی تبدیل موجک وجود دارد که در این پژوهش از تبدیل موجک ساکن استفاده شده است که مهم‌ترین خاصیت آن ناوردا\* بودن زمانی آن است. این روش مشابه تبدیل موجک گسسته است، با این تفاوت که عمل زیرنمونه‌گیری از سیگنال، در این روش انجام نمی‌شود و در عوض فیلترهای بالا نمونه‌گیری می‌شوند (Pesquef et al, 1996).

در این بخش با استفاده از مقادیر انرژی ویژه حفاری برای محدوده مورد بررسی و به عنوان ورودی، تبدیل موجک با تابع موجک (db1) در نظر گرفته شد. بدین منظور سیگنال انرژی ویژه تا سطح چهارم تجزیه شد. شکل (۵-۷) جزئیات و تقریب مربوط به تجزیه انرژی ویژه حفاری به وسیله تابع موجک (db1) را نشان می‌دهد.

\*- در فیزیک و ریاضیات، هر پارامتر از سیستم را که تحت یک تبدیل تغییر نکند را ناوردا گویند.

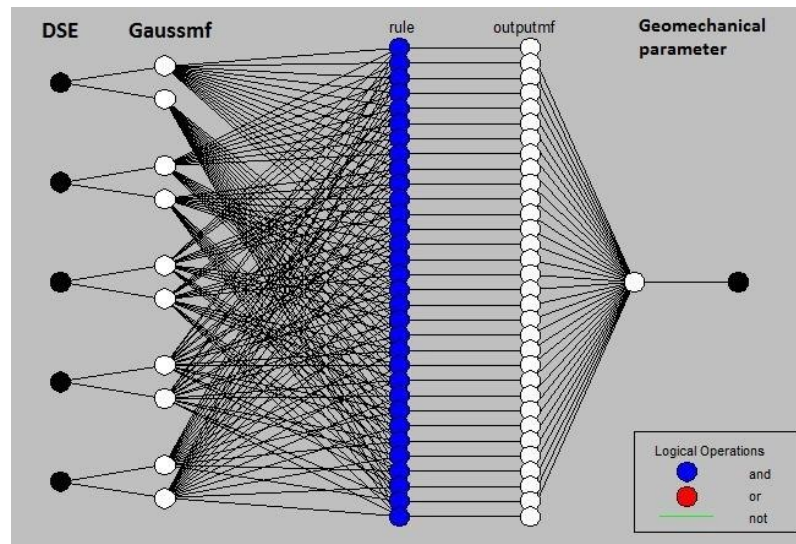


(تجزیه سطح چهارم) (تجزیه سطح چهارم) (تجزیه سطح سوم) (تجزیه سطح دوم) (تجزیه سطح یکم)

شکل (۵-۷): تجزیه انرژی ویژه حفاری به وسیله موجک db۱ تا سطح چهارم- چاه شماره (۱).

در مرحله بعد خروجی تبدیل موجک به عنوان ورودی شبکه ANFIS-PSO و ANFIS-GA در نظر گرفته شد. بیشترین تعداد تکرار حلقه اصلی الگوریتم PSO برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شد. چندین بار الگوریتم اجرا شد و در نهایت مشاهده گردید در تعداد تکرار حلقه‌های بیشتر از ۵۰۰ مقدار تغییرات خطا ناچیز بوده است. همچنین تعداد ذرات اولیه، ۷۰ ذره در نظر گرفته شده است. بیشترین تعداد تکرار حلقه اصلی الگوریتم GA برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین تعداد جمعیت اولیه، نرخ تقاطع و جهش در این الگوریتم به ترتیب برابر ۱۰۰، ۰/۷ و ۰/۵ لحاظ شده است. در این سیستم، تنها پارامتر ورودی انرژی ویژه سنگ می‌باشد که خود شامل وزن روی مته، نرخ نفوذ مته، گشتاور، سرعت چرخشی رشته حفاری، وزن گل، سرعت جریان سیال و سطح مقطع مته است.

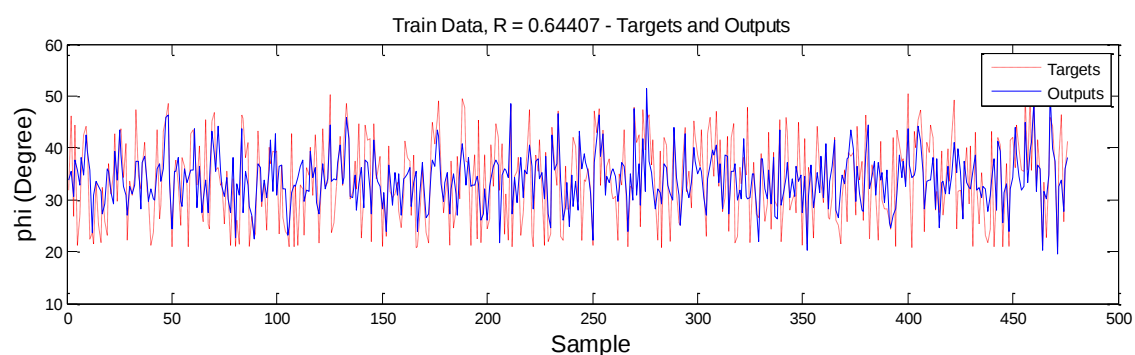
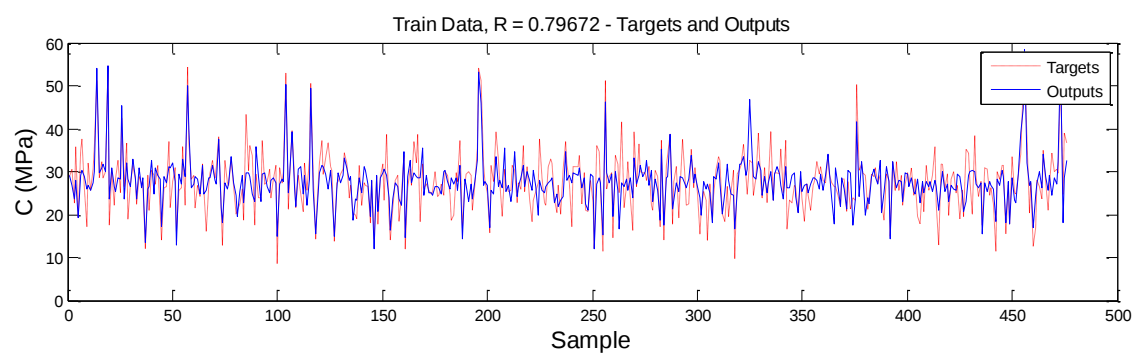
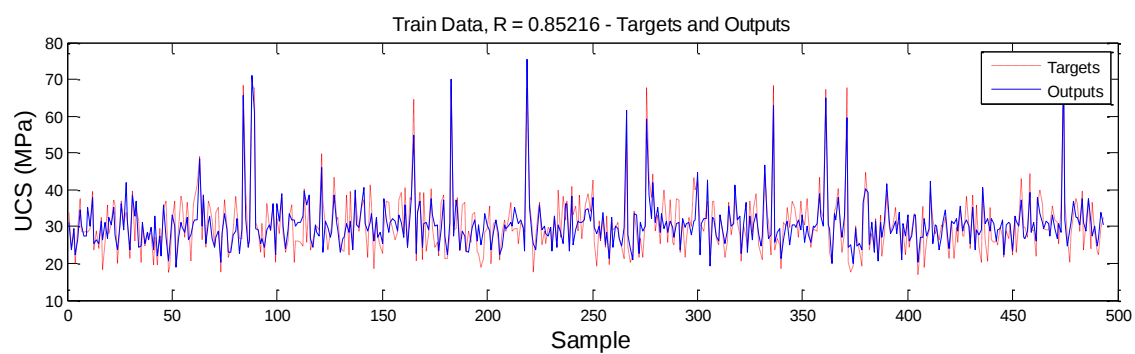
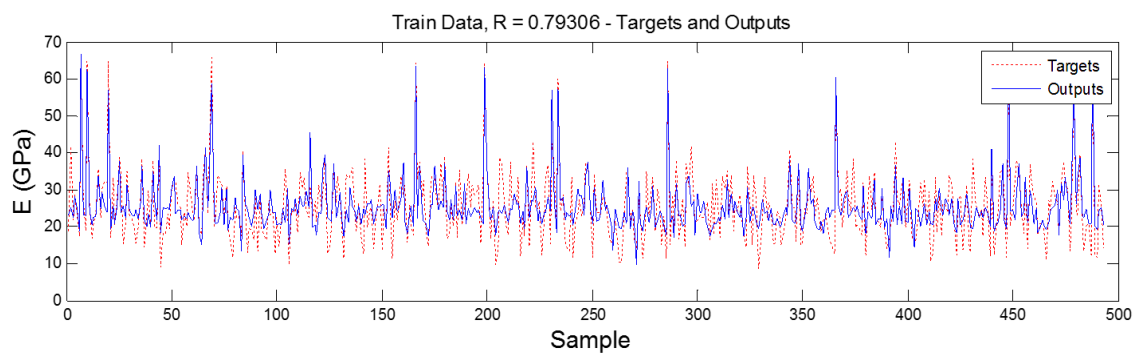
شبکه عصبی- فازی ساخته شده پس از ۵۰۰ حلقه (Epoch) تکرار، با تابع عضویت ۲ و عملگر عضویت نوع Gaussmf و ترکیب با الگوریتم بهینه سازی PSO به بهترین پیش‌بینی و تخمین خود با کمترین خطا رسیده است. شکل (۸-۵) ساختار شبکه انفیس استفاده شده برای تخمین را نشان می‌دهد.



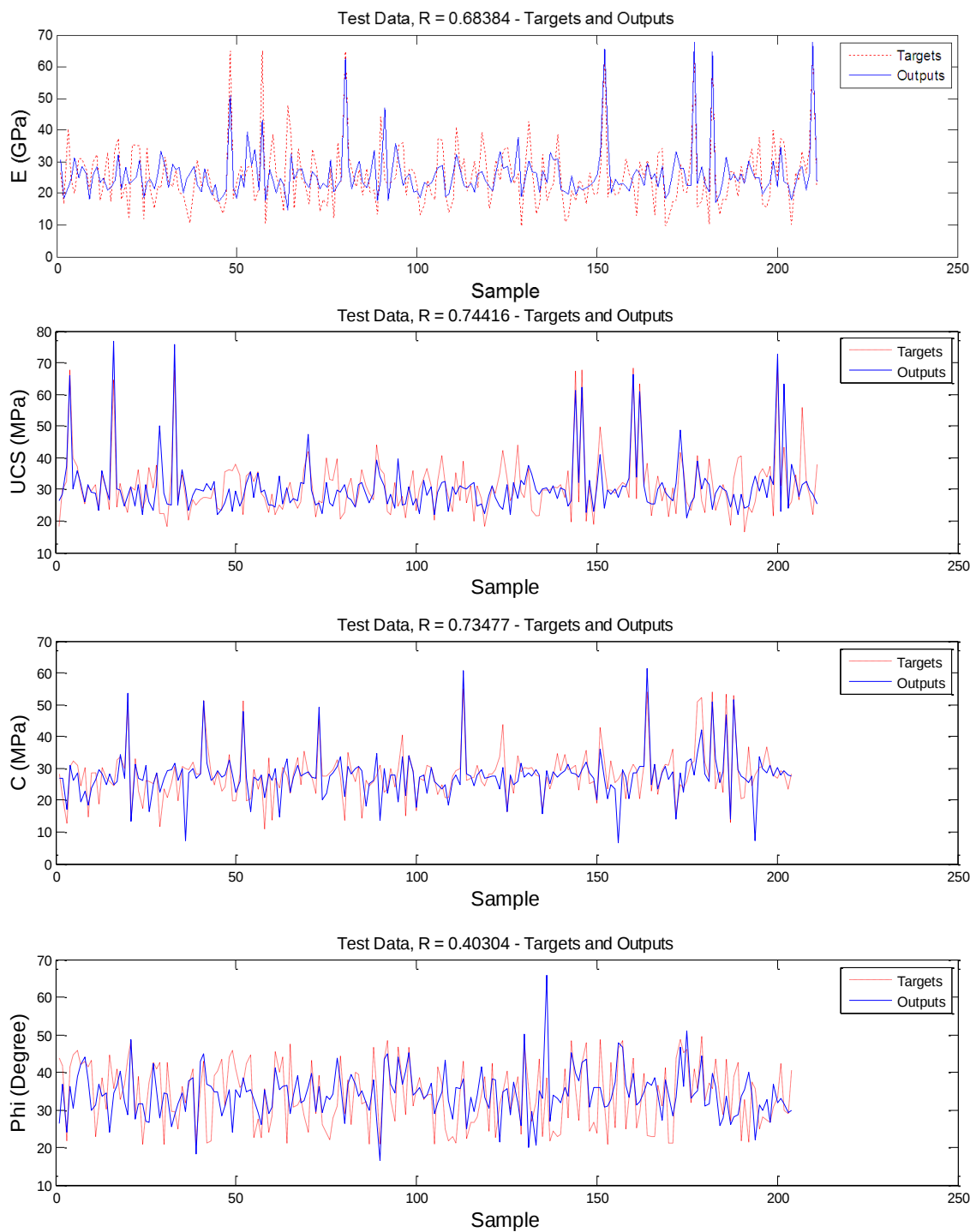
شکل (۸-۵): ساختار شبکه انفیس مورد استفاده برای تخمین خصوصیات ژئومکانیکی.

### ۵-۳-۲- مدل سازی و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی

نتایج مدل پیش‌بینی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ برای مقادیر انرژی ویژه حفاری، در مراحل آموزش و تست به ترتیب در شکل (۵-۹) و (۵-۱۰) مقایسه شده است. همچنین نتایج دو مدل ANFIS- PSO و ANFIS-GA در جدول شماره (۲) و (۳) ارائه شده است. مقایسه نتایج و ضریب همبستگی بدست آمده از دو مدل (که در جدول شماره ۲ و ۳ ارائه شده) مذکور حاکی از عملکرد خوب مدل ANFIS- PSO است. شبکه انفیس با دارا بودن مزایای قدرت زبانی سیستم‌های فازی و قابلیت آموزش شبکه‌های عصبی، در پیش‌بینی خواص مکانیکی سنگ عملکرد خوب و قابل قبولی دارد. از آنجا که حساسیت کمتری در میزان دسته داده‌های ورودی دارد، در علوم مهندسی نفت کارایی بهتری خواهد داشت.



شکل (۵-۹): نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر آموزش داده شده توسط ANFIS-PSO به رنگ قرمز و واقعی حاصل از انرژی ویژه حفاری به رنگ آبی، برای پارامترهای مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی، ضریب اصطکاک داخلی.



شکل (۵-۱۰): نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر پیش‌بینی شده (تست) توسط ANFIS-PSO به رنگ قرمز و واقعی حاصل از انرژی ویژه حفاری به رنگ آبی، برای پارامترهای مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی، ضریب اصطکاک.

نمودارهای اشکال (۵-۹) و (۵-۱۰) نشان دهنده‌ی نتایج تخمین پارامترهای مکانیکی سنگ بر استفاده از مقادیر انرژی ویژه حفاری در مراحل آموزش و تست می‌باشد. خلاصه نتایج کاربرد دو مدل ANFIS-PSO و ANFIS-GA در جدول (۵-۲) و (۵-۳) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج پیش بینی شده برای پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و چسبندگی ذاتی دارای ضریب همبستگی قابل قبولی بوده است. اما ضریب اصطکاک داخلی نسبت به بقیه پارامترها از ضریب همبستگی پایین‌تری برخوردار می‌باشد.

جدول (۵-۲): نتایج مدل شبکه ANFIS-GA جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ.

| پارامترهای پیش بینی شده | مدول یانگ | مقاومت فشاری | ذاتی چسبندگی | ضریب اصطکاک |
|-------------------------|-----------|--------------|--------------|-------------|
| ضریب همبستگی            | ۰/۶۳      | ۰/۵۴         | ۰/۵۶         | ۰/۳۲        |
| واریانس خطا             | ۷/۵       | ۰/۱۳         | ۵/۷          | ۷/۸         |
| میانگین مربع خطا        | ۵۴        | ۰/۰۱۷        | ۳۳           | ۶۰          |

جدول (۵-۳): نتایج مدل شبکه ANFIS-PSO جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ.

| پارامترهای پیش بینی شده | مدول یانگ | مقاومت فشاری | چسبندگی ذاتی | ضریب اصطکاک |
|-------------------------|-----------|--------------|--------------|-------------|
| ضریب همبستگی            | ۰/۶۸      | ۰/۷۴         | ۰/۷۳         | ۰/۴۰        |
| واریانس خطا             | ۷/۷       | ۶/۶          | ۵/۵          | ۸/۱         |
| میانگین مربع خطا        | ۶۰        | ۴۳           | ۳۱           | ۶۶          |

نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مذکور نشان می‌دهد ضریب همبستگی برای مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی ذاتی و ضریب اصطکاک به ترتیب برابر ۰/۶۸، ۰/۷۴، ۰/۷۳ و ۰/۴۰ محاسبه شده و میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۶۰، ۴۳، ۳۱ و ۶۶ به دست آمده است. با توجه به نتایج حاصل شده و جدول (۵-۳) می‌توان نتیجه گرفت که انرژی ویژه حفاری می‌تواند به عنوان ابزاری کلیدی جهت تعیین خواص مکانیکی سنگ باشد. بنابراین می‌توان در صورت عدم حضور نگارهای پتروفیزیکی، از انرژی ویژه به عنوان ابزاری در تعیین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ استفاده نمود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت ضرورت کاربرد روش‌های تخمینی جهت ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی، از انرژی ویژه حفاری می‌توان جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چسبندگی ذاتی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۵-۴- جمع بندی

هنگامی که طبقه بندی بر روی داده‌های چاه انجام می‌شود امکان دسترسی ساده‌تر و مناسب‌تری به داده‌ها وجود دارد. همچنین مقایسه پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی را می‌توان بهتر انجام داد. از الگوریتم SOM برای خوشه‌بندی انرژی ویژه حفاری استفاده شد. بر این اساس ابتدا انرژی ویژه حفاری بر مبنای الگوریتم SOM خوشه بندی شده است. سپس پارامترهای ژئومکانیکی سازند بر پایه نتایج بدست آمده از این الگوریتم، طبقه بندی شده است. بر اساس نتایج این خوشه بندی، سازندهایی که انرژی ویژه حفاری آن بالای ۱۸۰ psi محاسبه شد در خوشه سنگ سخت و بسیار سخت قرار گرفت. همچنین سازندهایی که انرژی حفاری آن زیر ۱۸۰ psi محاسبه شده در خوشه سنگ متوسط تا نرم قرار گرفت. برای اعتبار سنجی خوشه‌بندی انرژی ویژه حفاری از الگوریتم K-Means استفاده شد که نتایج بدست آمده از این الگوریتم با نتایج بدست آمده از الگوریتم SOM مطابقت دارد. با توجه به سهولت دسترسی به مقادیر انرژی ویژه حفاری می‌توان، خصوصیات سازند را پیش بینی کرد. با استفاده از انرژی ویژه حفاری و الگوریتم ANFIS-PSO خصوصیات ژئومکانیکی چاه مانند: مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و چسبندگی می‌توان با دقت قابل قبولی پیش بینی کرد. بدیهی است در صورت عدم امکان راندن نگاره‌های چاه پیمایی و یافته نشدن اطلاعات کافی از مخزن، می‌توان از شاخص انرژی ویژه حفاری برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی استفاده کرد.

## فصل ششم

# نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت بسیار بالای انرژی ویژه حفاری در ارزیابی عملکرد فرآیند حفاری، در این تحقیق تلاش شده تاثیر پارامترهای موثر عملیاتی و ژئومکانیکی بر روی انرژی ویژه حفاری مورد بررسی قرار گیرد. پس از معرفی میدان و توضیح مراحل و نحوه تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی، پایگاه داده های حفاری و ژئومکانیکی تشکیل شد. سپس تحلیل برازشی بر روی هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی انجام گرفت که در نهایت با استفاده ترکیب پارامترهای ژئومکانیکی باهم، ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با انرژی ویژه حفاری محاسبه شد. در نهایت از الگوریتم SOM برای خوشه بندی انرژی ویژه حفاری استفاده شد. بر این اساس ابتدا انرژی ویژه حفاری خوشه بندی شده است. سپس پارامترهای ژئومکانیکی سازند بر پایه نتایج بدست آمده از این الگوریتم، طبقه بندی شده است. مهم ترین یافته های تحقیق را می توان به شرح ذیل بیان کرد:

– به منظور یافتن رابطه بین انرژی ویژه حفاری و پارامترهای موثر بر آن از مدل برازش چند متغیره استفاده گردید. مدل سازی انرژی ویژه حفاری توسط برازش چند متغیره که شامل پارامترهای خصوصیات سنگ، نگاره های چاه پیمایی و تلفیقی از این دو ویژگی بوده ساخته شده است. پس از تحلیل و بررسی مدل، ضریب همبستگی های به دست آمده برای چاه شماره (۱) و (۲) به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۰ و برای مجموع دو چاه ۰/۷۸ گزارش گردید.

– پارامتر مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی و جریان سیال از جمله مهم ترین پارامترهای موثر بر انرژی ویژه حفاری شناخته شدند. افزایش جریان سیال می تواند موجب بهبود عملکرد انتقال خرده های حفاری می شود در نتیجه انتقال انرژی بین مته و سنگ بهتر صورت می گیرد و انرژی کمتری برای حفاری نیاز دارد.

– چون اغلب پارامترهای ژئومکانیکی از موج صوتی تخمین زده می شود تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی با یکدیگر دارای هم خطی می باشند. پارامترهایی که دارای هم خطی بالا می باشند از

مدل حذف شدند. به نظر می‌رسد با توجه به انجام آزمایشات مکانیکی سنگ و به دست آوردن مستقیم این پارامترها می‌توان از پارامترهای بیشتری برای ارائه مدل استفاده کرد.

– خوشه بندی به علت رشد روز افزون حجم داده‌ها و پیچیدگی روابط بین داده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. خوشه بندی می‌تواند در بهبود نتایج بدست آمده از مدلسازی و دسته بندی اطلاعات، موثر واقع شود. برای پیش بینی بهتر رفتار سنگ می‌توان ابتدا داده‌های ژئومکانیکی و عملیاتی را خوشه بندی کرد، سپس از روش‌های هوش مصنوعی برای انجام مدلسازی استفاده کرد.

– از انرژی ویژه حفاری برای خوشه بندی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ استفاده شد که پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چسبندگی ذاتی سنگ هم‌خوانی بسیاری خوبی در خوشه بندی با انرژی ویژه حفاری داشت.

– با توجه با محاسبه انرژی ویژه حفاری و خوشه بندی آن‌ها، می‌توان خصوصیات سازند را پیش بینی کرد. سازندهایی که انرژی ویژه حفاری آن بالای ۱۸۰ psi محاسبه شد در خوشه سنگ سخت و بسار سخت قرار گرفت و سازندهایی که انرژی حفاری آن زیر ۱۸۰ psi محاسبه شده در خوشه سنگ متوسط تا نرم قرار گرفت. با توجه با محاسبه انرژی حفاری می‌توان خصوصیات سازند را پیش بینی کرد.

– با استفاده از انرژی ویژه حفاری و الگوریتم ANFIS-PSO خصوصیات ژئومکانیکی چاه می‌توان با دقت بالایی پیش بینی کرد. می‌توان از انرژی ویژه حفاری برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی در نبود نگاره‌های چاه پیمایی و اطلاعات کافی از مخزن استفاده کرد.

## ۶-۲- پیشنهادات

- جهت ارائه یک مدل قابل اعتماد و ارزشمند نیازمند داده‌های گسترده‌ای از چاه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه است. توصیه می‌شود بر اساس حجم گسترده‌تری از داده‌ها بررسی‌های تکمیلی صورت پذیرد.
- استفاده از سایر ویژگی‌های مرتبط با سنگ مانند درزه داری و ساینده‌گی که از لاگ‌های تصویری و مطالعات مغزه‌گیری تعیین می‌شود، می‌تواند در بهتر شدن مدل‌سازی انرژی ویژه حفاری کمک قابل توجهی کند.
- طبیعتاً تکیه بر نتایج به دست آمده از روابط تجربی نمی‌تواند به تنهایی گواه صحت عملکرد مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه باشد. صحت سنجی برای مدل‌سازی با استفاده از نتایج سایر تحقیقات انجام شده در این میدان صورت گرفته است. اگرچه، توصیه می‌شود در صورت در دسترس بودن نتایج آزمایش، اعتبارسنجی به طور دقیق صورت گیرد.
- برای خوشه بندی انرژی ویژه از الگوریتم‌های دیگر مانند الگوریتم سلسله مراتبی و الگوریتم گازی-عصبی استفاده شود و نتایج آن با الگوریتم استفاده شده در این پژوهش مقایسه شود.
- ارزیابی شرایط شکستگی چاه جهت ارزیابی بهتر تاثیر شکستگی بر انرژی ویژه حفاری انجام گیرد.
- با توجه به اینکه تنها دو چاه در این تحقیق مدنظر قرار گرفت و یافته‌های این تحقیق باید در چاه‌های دیگر مورد ارزیابی قرار بگیرد.

## منابع

حیدری، عبدالمجید. "مهندسی مته‌های حفاری"، اداره مهندسی حفاری- شرکت ملی مناطق نفت-خیز جنوب، ۱۳۸۵.

رحمانی، علی اکبر. فیزیک سنگ. تهران. شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۹.

رحیمی لرکی. ا، عادل زاده. م. ر، شهتا. ش. "بررسی نتایج اسید کاری چاه‌های نفتی آسماری میدان مارون با استفاده از آنالیز داده‌های چاه آزمایی"، مجله تولید و اکتشاف ۱۳۸۸: ۵۹-۶۲.

شانا ( شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی- <http://www.shana.ir> )، ۱۳۹۳.

صائمی. م، کریمی. غ. "تعیینی گرادیان فشار منفذی، فشار شکست و فشار روباره در یکی از میادین جنوب غرب ایران"، اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، ۱۳۹۲.

طاحونی. ش، مکانیک خاک، موسسه انتشارات پارس آیین، ۱۳۸۰.

عادل زاده. م. ر، اصول مهندسی حفاری، انتشارات ستایش، ۱۳۸۵.

مراد زاده. ع، قوامی ریایی. ر. چاه پیمایی برای مهندسیین. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۶.

نوروزی بزم آبادی. س. " بررسی تاثیر پارامترهای مکانیک سنگ مخزن بر روی نرخ نفوذ حفاری در یکی از میادین نفتی شرکت مهندسی توسعه نفت"، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳.

Afsari.M, Amani.M, Karimi.H, and Yousefi.S. 2010. "using drilling and logging data for developing ID mechanical earth model for a mature oil field to predict and mitigate wellbore stability challenges." presentation at the CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition. Beijing, China.

- Akbari.B, Miska.S, Yu.M, and Ozbayoglu.M. , 2014. "Experimental Investigations of the Effect of the Pore Pressure on the MSE and Drilling Strength of a PDC Bit." SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Regional Meeting. Denver, Colorado, USA.
- Alpaydin. E. 2004. "Introduction to Machine Learning", The MIT Press.
- Amadi, W.K., Iyalla, I., 2012. Application of Mechanical Specific Energy Techniques in Reducing Drilling Cost in Deepwater Development. In: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Archer, S., Rasouli, V., 2012. A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin. *Pet. Miner. Resour.* 81, 163.
- Armenta, M., 2008. Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Amani.A, Shahbazi.KH. "Prediction of Rock Strength using Drilling Data and Sonic Logs." *International Journal of Computer Applications*, 2013.
- Bourgoyne Jr .A.T., Millheim. K.K., Chenevert .M.E., and Young Jr. F.S. 1986. *Applied Drilling Engineering*. 502 pp.; Softcover, SPE Textbook Series Vol. 2.
- Caicedo, H., Calhoun, W. 2005, "Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding Friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling Performance", AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, American Association of Drilling Engineers.
- Chandong Chang. Zoback. M. D, Khaksar. A. 2006." Empirical relations between rock strength and physical properties in Sedimentary rocks." *Journal*
- Chen. Xu, Honghai. F, Boyun.G, Gao. D, Wei. Ho, Zhi .Ye. 2014. "Real-Time Prediction and Optimization of Drilling Performance Based on a New Mechanical Specific Energy Model". *Arab J Sci Eng* 39:8221–8231.
- Christaras. B, Mariolakos. I, Fountoulis. J, Athanasias. S, Dimitriou. A. 1997." Geotechnical input for the protection of some Macedonian tombs in northern Greece." In: The 4<sup>th</sup> international symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin. 125-32.

- Combes. J. D . 1964. member AIME, California Co. Venice, la. "New life for the fishtail: the diamod drag bit." fall meeting of the society of petroleum engineers of AIME. Houston, Texas.
- Crain, E.R. 2013, " Carin`s petrophysical handbook." siriuslot.
- Detournay. E and Chee P. T, 2002. "Dependence of Drilling Specific Energy on Bottom-Hole Pressure in Shales" Society of Petroleum Engineers.
- Dupriest, F.E., Koederitz, W.L., 2005. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Eissa. A, Kazi. A. 1988." Relation between statics and dynamic Young`s moduli of Rocks." Internatonal Journal of rock mechanics and mining Science and geomechanics abstracts: 479-482.
- Ersoy, A., Atıcı, U., 2004. Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. *Diam. Relat. Mater.* 13, 22–37.
- Ersoy, A., Waller, M. (1997), "Drilling Detritus and the Operating Parameters of Thermally Stable PDC Core Bits", *International Journal of Rock Mechanics.* 34.7: 1109-1123. Print.
- Farrelly, M., Rabia, H., 1987. Bit performance and selection: a novel approach. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, a M., Risnes, R., 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics, Marine Environmental Research.* Elsevier.
- Gholami. R, Moradzadeha. A, Rasouli.V, Hanachi.J. 2014. practical applicationof failure criteria in detemining safe mud weight windows in drilling operations.*Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*6;13-25.
- Hamrick, T.R., 2011. Optimization of Operating Parameters for Minimum Mechanical Specific Energy in Drilling. West Virginia University.
- Hartman. Howard. L, Albama, 1992. Senior Editor Professor emeritus of Mining engineering the University of ."SME Mining Engineering handbook", Vol2. Litueton, Colorado:Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc.
- Hecht-Nielsen. R. 1991 . *NeuroComputing* , Addison-Wesley Publishing Company.
- Hoseinie. S.H., Aghababaei. H., Pourrahimian. Y. 2008. " Development of a new cassification system for assessing of rock mass drillability index (Rdi)." *International journal of rock mechanics and mining science*:1-10.

- Huang, S.L., Wang, Z.W., 1997. The mechanics of diamond core drilling of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 134–e1.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P., 2000. *Engineering rock mechanics-an introduction to the principles*. Elsevier.
- Jang, J.-S.R., 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Syst. Man Cybern. IEEE Trans.* 23, 665–685.
- Khaksar. A, Geoffrey Taylor. P, Fang. Zh, Kayes.T, Salazar. A, Rhaman.Kh. 2009."Rock strength from core and logs, where we stand and ways to go". EUROPEC/EAGE Conferece and exhibition. Amsterdam, Netherlands.
- Koederitz, W.L., Weis, J., 2005. A real-time implementation of MSE. In: *Proc. AADE Natl Technical Conf. and Exhibition*.
- Lambert, S.W., Rogers, J.D., Williamson, J.R., Boyer, C.M., and Frantz, J.H. (2005), "Benchmarking Deep Drilling Technologies", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE Editorial Committee: Dallas, TX, Society of Petroleum Engineers.
- Laosripaiboon, L., Saiwan, C., Prurapark, R., 2015. Reservoir Characteristics Interpretation by Using Down-Hole Specific Energy With Down-Hole Torque and Drag. In: *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, Gh.R., Asef, M.R., 2015. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 126, 78–82.
- Nguyen, J.P. 1996. "Oil and Gas Field Development Techniques Drilling." Edition Technip.
- Osguie,R. "Rate of Penetration Estimaion Model for Directional and Horizontal Wells. "PhD Thesis, schools of natural and applied science of middle east technical university, 2007.
- Pesquet, J.-C., Krim, H., Carfantan, H., 1996. Time-invariant orthonormal wavelet representations. *Signal Process. IEEE Trans.* 44, 1964–1970.
- Pile.E, Johnson.D & Kathryne. 2002. "well logging in nontechnical language." Penn well publishing company.

- Prassl, Dipl.-Ing. Wolfgang F. "Drilling Engineering." Master of Petroleum Engineering, 2001.
- Rabia, H., Farrelly, M. and Barr, M. V. 1986, "A New Approach to Drill Bit Selection", SPE Teale, R. (1965), "The concept of specific energy in drilling", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 2, PP. 57-73.
- Rasouli, V., Archer, S. 2012. "A Log Based Analysis to Estimate Mechanical Properties and Insitu Stresses in a Shale Gas Well in North Perth Basin." 1st International Conference on Petroleum and Mineral Resources Kurdistan, Iraq: University of Koya.
- Sander, J. 2003. "Principles of Knowledge Discovery in Data: Clustering I", Department of Computing Science University of Alberta, Tutorial Slides.
- Sarmadivaleh, M. and Rasouli, V. 2010. "Simulation of hydraulic fracturing in tight formations." Australian Petroleum Production & Exploration Association, 581-591.
- Schlumberger, www.slb, 2002.
- Smith, J. R. 1998. "Diagnosis of poor PDC bit performance in deep shales." Ph.D. thesis, Louisiana State University.
- Snowdon, R. A., Ryley, M. D and Temporal, J. 1982. "A study of disc cutting in selected British rocks." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract. v 19, p 107 – 121.
- Teale, R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp. 57–73.
- Thuro, K, 1997." Drillability prediction-geological influences in hard rock drill and blast tunneling." Geologische Rundschau.
- Tuna Eren, Mehmet Erven Ozbayglu. 2010. "Real-Time-Optimiztion of drilling parameters during drilling operations." SPE Oil and gas india conference and exhibition. Mumbai india: SPE.
- Wadlaw. "Drilling performance optimization and identification of overpressure formation." conference of drilling and rock mechanics symposium. Austin, TX: SPE, 1969.
- Weller, Mohamed A. Kassab and Andreas. 2013. " Porosity esimation from compressional wave velocity A study based on egyptian carbonate sample." Journal of erath science and engineering 3, :314-321.

- Wei, M., Li, G., Shi, H., Shi, S., Li, Z., Zhang, Y., 2015. Theories and Applications of Pulsed-Jet Drilling With Mechanical Specific Energy. SPE J.
- Yale, D. P. 1994. "Static and Dynamic Rock Mechanical properties in the Hugoton and Panama fields, Kansas." Proceeding of SPE Mid-Continent Gas Symposium.
- Yasar.E, Erdogan.Y. 2004. "Correlating Sound Velocity With the Density, Compressive Strengyh and Young's Modulus of Carbonate Rocks." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41: 871-875.
- Yao, Qingyu. "An Investigation of Rock Cutting." Toward A Novel Design of Cutting Bits, 2012.
- Zeuch, D.H., Finger, J.T., 1985. Rock breakage mechanisms with a pdc cutter. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Zhang, Jincai. 2011. "Pore Pressure Prediction From WellLogs: Methods, Modifications, and New Approaches." Journal of Earth-Science Review 108: 50-63.
- Zoback, M.D., 2007. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press. 449 pages.

## **Abstract**

Since the process of drilling operations in the upstream oil industry has a special place and one of the most costly activities in the upstream industry; therefore, increasing the efficiency and speed of drilling is highly regarded. In addition, parameters such as the time associated with displacement, Interruption and lost time, Penetration rate and drilling specific energy as important factors in the efficiency of drilling rigs is concerned. In this study, the drilling specific energy of operating parameters, through daily operational reports collected, and calculated. The most important factors affecting the specific energy into two general categories controllable factors (operational) and uncontrolled (environmental) were grouped. Given the importance of geo-mechanical parameters in the drilling process, purpose of this study is the effect environmental parameters on the drilling specific energy variations based on the data available to be checked. So after collecting available data from wells studied and performed preliminary study to identify better to change the existing data bases, using multiple regression were used for modeling and pattern recognition. After analyzing the model, the correlation coefficient obtained for wells (1) and (2) respectively, 0.77, 0.80 and for the sum two wells 0.78 was observed. For categories and sorting geomechanical and drilling data from self-organizing map algorithms (SOM), were used. Accordingly, initially drilling specific energy data clustering with using SOM algorithms, the geo-mechanical formation parameters based on this clustering, were classified. According to this clustering algorithm, formations that drilling specific energy values more than 180 (psi) in of hard and very hard rock clusters and formation with drilling specific energy values less than 180 (psi) in medium to soft rock cluster it placed. Also using ANFIS-PSO algorithm so as to estimate well geomechanical properties including Young's Modulus, uniaxial compressive strength, cohesion coefficient and internal friction angle. Since the important part of the problems drilling in outside reservoir zones which is usually very limited data there are available. This algorithm could be well to estimate geomechanical properties from drilling special energy.

**Keywords: drilling specific energy, geo-mechanical properties, clustering, SOM algorithms, ANFIS-PSO algorithm**



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**  
**MSc Thesis in Mining Extraction**

# **Geomechanical Classification of Oil Formation Based on the Required Specific Energy for Deep Drilling**

**Mohammad Mohammadi Behboud**

Supervisor:  
**Dr. Ahmad Ramezanzadeh**

Advisor:  
**Dr. Behzad Tokhmchi**

**September 2016**