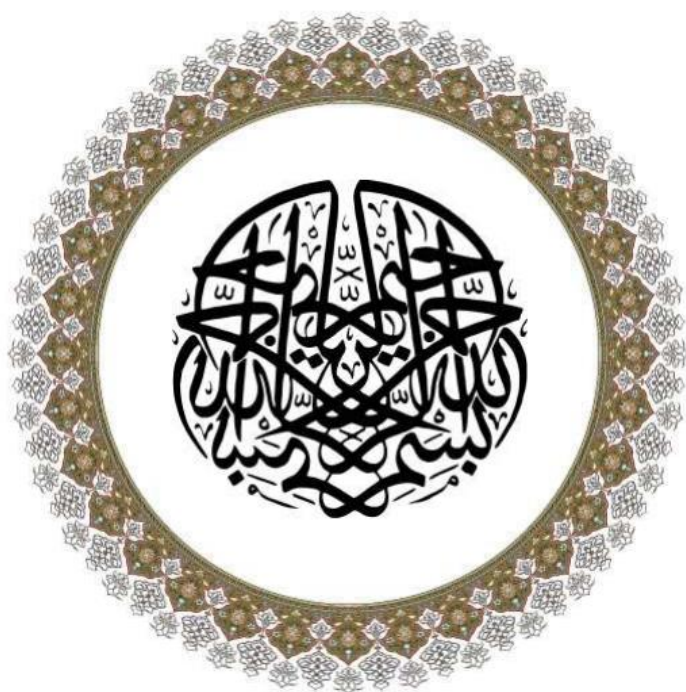






دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

**بررسی تأثیر ناپیوستگی‌های طبیعی بر روی عملیات شکست هیدرولیکی در  
مخازن شکافدار طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا و مدل‌سازی روش  
المان مجزا**

علی کاظمی کیاسری

**اساتید راهنما:**

دکتر مجید نیکخواه

دکتر احمد رمضان‌زاده

**اساتید مشاور:**

دکتر نادیا شفیع‌زاده

بهمن ۹۶

شماره: ۲۰۸۰/۹۴/۳  
تاریخ: ۹۴/۱۱/۲۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای علی کاظمی کیاسری  
با شماره دانشجویی..... ۹۳۱۳۸۹۴... رشته... مهندسی معدن.. گرایش... مکانیک سنگ....  
تحت عنوان بررسی تأثیر ناپوستگی های طبیعی بر روی عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن  
شکافدار طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی های مجزا و مدل سازی روش المان مجزا.... که در تاریخ  
..... ۹۶/۱۱/۹..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام  
می گردد:

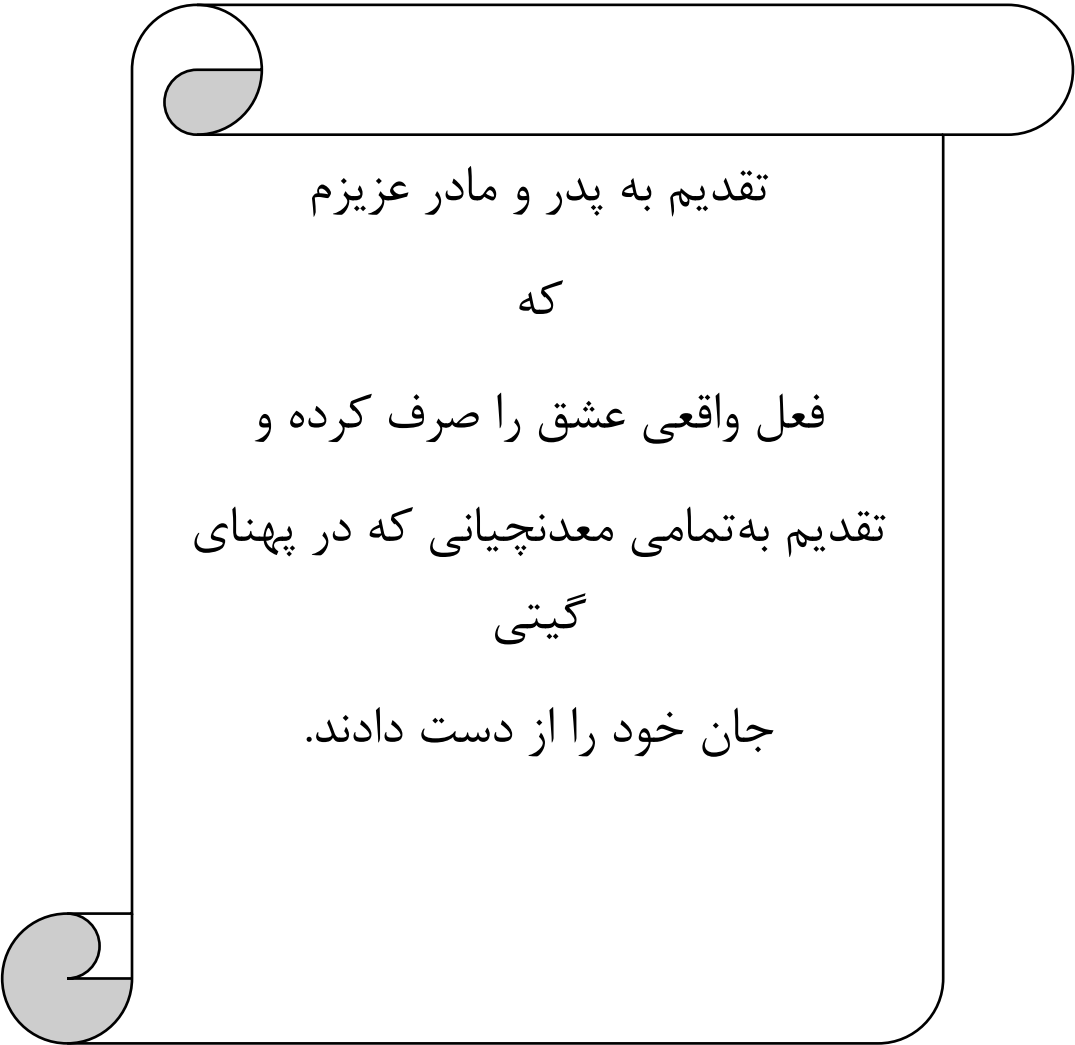
| قبول (با امتیاز ..... / ۱۸) درجه .....<br><input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> علمی |                      |            |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|-------|
| نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی                                 |                      |            |       |
| عضو هیأت داوران                                                                                                   | نام و نام خانوادگی   | مرتبه علمی | امضاء |
| ۱- استاد راهنمای اول                                                                                              | دکتر مجید نیکخواه    | استادیار   |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم                                                                                              | دکتر احمد رمضان زاده | استادیار   |       |
| ۳- استاد مشاور                                                                                                    | دکتر نادیا شفیق زاده | استادیار   |       |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی                                                                                         | دکتر مهدی نوروزی     | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول                                                                                                | دکتر مرتضی جوادی     | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم                                                                                                | دکتر بهزاد تخم چی    | دانشیار    |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

۹۴/۱۱/۲۹

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:





تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که

فعل واقعی عشق را صرف کرده و

تقدیم به تمامی معدنچسانی که در پهنای

گیتی

جان خود را از دست دادند.

## تشکر و قدردانی

اساتید راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر نیکخواه و دکتر رمضانزاده و مشاورین محترم سرکار خانم دکتر شفیعزاده و مهندس حیدری:

سپاس ایزد یکتا را که سرنوشتی چنین ساخت تا شیرینی میوهی دانش را در زیر سایه‌ی کوشش‌های بی‌دریغ شما چشیده و به یاری دستان توانمندتان، گام درراه والایش بگذارم. اینک در فرجام این همراهی خجسته، بر آنم تا بدین گونه تلاش و پایدردی سترگ شمارا ارج نهم.

دوست عزیزم، جناب آقای مهندس محمدرضا حاج سعیدی صادق، حمایت و همفکری شما در پیشبرد این مهم، شایسته سپاس است.

زبان را یارای گزاردن سپاسی درخور و شایسته‌ی شما نیست؛ امید است پذیرای آن باشید. تندرستی، شادکامی و بهروزی‌تان را از درگاه یزدان پاک خواستارم.



این پایان نامه با حمایت مالی  
اداره پژوهش و فناوری  
شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب  
به پایان رسیده است.

## تعهدنامه

اینجانب **علی کاظمی کیاسری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی تاثیر ناپیوستگی های طبیعی بر روی عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن شکافدار طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی های مجزا و مدل سازی روش المان مجزا** تحت راهنمایی جناب آقای دکتر نیکخواه و دکتر رمضانزاده متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب 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 بانام « 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 و یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

### امضای دانشجو

### تاریخ

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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 این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

با افزایش نیاز به انرژی و با توجه به وابستگی صنایع مختلف به سوخت‌های فسیلی، صنعتگران در حوزه نفت و گاز را بر آن واداشت تا در اندیشه افزایش میزان تولید از میدان‌های فعلی قرار گیرند. این شرایط ایجاب کرد تا روش‌های جدیدی بدین منظور ارائه شوند که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها شکست هیدرولیکی است. این روش شامل تزریق سیال پرفشار درون سازند به‌منظور ایجاد شکستگی و گسترش آن درون سازند است. عوامل متعددی می‌تواند در شرایط ایجاد شکستگی و هندسه آن اثرگذار باشد که می‌توان به وجود شکستگی‌های طبیعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موارد مؤثر اشاره کرد. تفاوت شکستگی‌ها در ویژگی‌های هندسی می‌تواند شرایط جدیدی را در نحوه اجرا عملیات و نوع شکستگی هیدرولیکی ایجاد نماید؛ ازین رو مطالعه رفتار آن‌ها پیش از انجام عملیات اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه شکستگی‌های طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا و فرآیند شکست هیدرولیکی با استفاده از روش عددی اجزا مجزا موردبررسی قرار گرفته است. در این بررسی ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها از قبیل چگالی، طول شکستگی و جهت‌داری و تأثیر آن بر شکستگی هیدرولیکی مورد مطالعه واقع شده است. نتایج گویای آن است که خصوصیات شبکه شکستگی مجزا و هندسه شکستگی‌ها می‌تواند عملیات شکست هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار داده و نتایج را کنترل کرده و در اغلب موارد نتایج امیدبخشی را در تخمین پاسخ مخزن نسبت به تزریق سیال فراهم کند. در ادامه دریکی از چاه‌های مخزن بنگستان اهواز، شرایط اجرای شکست هیدرولیکی تنها بر اساس هندسه شکستگی‌ها در زون‌های سازند سروک مطالعه شده است. مقایسه نتایج حاصل از آن با مطالعه پارامتری انجام‌شده نشان‌دهنده تناسب و تطابق بین نتایج آن‌هاست.

**کلمات کلیدی:** شکست هیدرولیکی، شکستگی‌های طبیعی، شبکه شکستگی‌های مجزا، روش اجزای مجزا،

## فهرست مطالب

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| فصل اول کلیات .....                      | ۱  |
| ۱-۱ پیشگفتار .....                       | ۲  |
| ۲-۱ اهداف پژوهش .....                    | ۳  |
| ۳-۱ ضرورت و اهداف پژوهش .....            | ۳  |
| ۴-۱ روش پژوهش .....                      | ۴  |
| ۵-۱ ساختار پایان نامه .....              | ۵  |
| فصل دوم شکست هیدرولیکی .....             | ۷  |
| ۱-۲ پیشگفتار .....                       | ۸  |
| ۲-۲ تاریخچه شکست هیدرولیکی .....         | ۸  |
| ۳-۲ فرآیند شکست هیدرولیکی .....          | ۱۱ |
| ۴-۲ مکانیسم شکست هیدرولیکی .....         | ۱۳ |
| ۵-۲ توصیف فیزیکی شکستگی .....            | ۱۵ |
| ۶-۲ مدل سازی شکست هیدرولیکی .....        | ۱۶ |
| ۱-۶-۲ روش های تحلیلی .....               | ۱۶ |
| ۱-۱-۶-۲ مدل سازی تحلیلی با روش PKN ..... | ۱۶ |
| ۲-۱-۶-۲ مدل سازی تحلیلی با روش KGD ..... | ۱۹ |

|    |                                                                 |
|----|-----------------------------------------------------------------|
| ۲۰ | ..... مدل شبه سه بعدی (Pseudo-3D)                               |
| ۲۱ | ..... مدل‌های سه بعدی کامل                                      |
| ۲۲ | ..... روش‌های عددی                                              |
| ۲۲ | ..... روش اجزا محدود (FEM)                                      |
| ۲۴ | ..... روش اجزا محدود توسعه یافته (XFEM)                         |
| ۲۵ | ..... روش المان مرزی                                            |
| ۲۵ | ..... روش اجزا مجزا                                             |
| ۲۶ | ..... شکستگی‌های طبیعی و برهمکنش آن با شکستگی هیدرولیکی         |
| ۲۸ | ..... اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی                 |
| ۳۲ | ..... جمع بندی                                                  |
| ۳۵ | ..... فصل سوم مدل سازی عددی و تحلیل پارامتری                    |
| ۳۶ | ..... ۱-۳ پیشگفتار                                              |
| ۳۶ | ..... ۲-۳ نرم افزار 3DEC                                        |
| ۳۷ | ..... ۳-۳ شبکه شکستگی‌های مجزا                                  |
| ۳۹ | ..... ۴-۳ خصوصیات هندسی شکستگی‌های توده سنگ                     |
| ۴۰ | ..... ۵-۳ توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی ها |
| ۴۰ | ..... ۱-۵-۳ تولید تصادفی جهت داری                               |
| ۴۰ | ..... ۲-۵-۳ تولید تصادفی اندازه شکستگی                          |
| ۴۱ | ..... ۶-۳ شبیه ساز مونت کارلو                                   |

|         |                                               |
|---------|-----------------------------------------------|
| ۴۱..... | ۷-۳ مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی              |
| ۴۲..... | ۸-۳ ابعاد مدل سازی                            |
| ۴۳..... | ۹-۳ تولید شکستگی ها                           |
| ۴۶..... | ۱۰-۳ تعیین خواص سنگ بکر و شکستگی ها           |
| ۴۹..... | ۱۱-۳ شرایط مرزی                               |
| ۵۲..... | ۱۲-۳ تزریق                                    |
| ۵۲..... | ۱۳-۳ اعتبارسنجی                               |
| ۵۶..... | ۱۴-۳ نتایج حاصل از مدل سازی                   |
| ۶۱..... | ۱۵-۳ مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت           |
| ۶۳..... | ۱۶-۳ جهت داری شکستگی های طبیعی                |
| ۶۹..... | ۱۷-۳ اندازه شکستگی                            |
| ۷۲..... | ۱۸-۳ جمع بندی                                 |
| ۷۳..... | فصل چهارم مدل سازی ژئومکانیکی چاه مورد مطالعه |
| ۷۴..... | ۴-۱ پیشگفتار                                  |
| ۷۴..... | ۴-۲ میدان اهواز                               |
| ۷۵..... | ۴-۳ گردآوری داده                              |
| ۷۷..... | ۴-۴ تخمین سرعت موج برشی                       |

- ۷۹ ..... شبکه MLP ۱-۴-۴
- ۸۲ ..... محاسبه پارامترهای مکانیکی سنگ ۵-۴
- ۸۳ ..... تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی ۶-۴
- ۸۵ ..... پارامترهای مقاومتی سنگ ۷-۴
- ۸۶ ..... فشار منفذی ۸-۴
- ۸۷ ..... تنش‌های برجا ۹-۴
- ۸۸ ..... تنش قائم ۱-۹-۴
- ۹۰ ..... تنش‌های افقی ۲-۹-۴
- ۹۱ ..... تنش مماسی و شعاعی در چاه قائم ۳-۹-۴
- ۹۲ ..... معیار شکست ۴-۱۰
- ۹۳ ..... معیار شکست موهر-کلمب ۱-۱۰-۴
- ۹۴ ..... معیار شکست موگی-کلومب ۴-۱۰-۲
- ۹۶ ..... مدل ژئومکانیکی چاه شماره ۳۶۸ ۱۱-۴
- ۱۰۲ ..... جمع‌بندی ۱۲-۴

فصل پنجم مقایسه زونهای مخزنی براساس شکستگی‌های طبیعی به هنگام شکست هیدرولیکی

- ۱۰۳ .....
- ۱۰۴ ..... پیشگفتار ۱-۵
- ۱۰۴ ..... عوامل موثر در طراحی شکست هیدرولیکی ۲-۵

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| ۳-۵   | زون بندی مخزن بنگستان اهواز            | ۱۰۶ |
| ۴-۵   | شکستگی های موجود در مخزن بنگستان اهواز | ۱۰۶ |
| ۵-۵   | چاه شماره ۳۶۸                          | ۱۰۷ |
| ۶-۵   | انتخاب اولیه لایه                      | ۱۱۰ |
| ۱-۶-۵ | $E_1$ زون                              | ۱۱۰ |
| ۲-۶-۵ | $E_2$ زون                              | ۱۱۰ |
| ۳-۶-۵ | $G_2$ زون                              | ۱۱۱ |
| ۷-۵   | انتخاب لایه براساس خواص شکستگی ها      | ۱۱۱ |
| ۸-۵   | ساخت مدل عددی لایه های انتخابی         | ۱۱۳ |
| ۹-۵   | جمع بندی                               | ۱۱۷ |
| ۶     | فصل ششم                                | ۱۱۹ |
| ۱-۶   | نتیجه گیری و پیشنهادها                 | ۱۲۰ |
| ۲-۶   | مراجع                                  | ۱۲۲ |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ اولین عملیات شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹ توسط هالیبرتون ..... ۱۰
- شکل ۲-۲ تعداد عملیات شکست هیدرولیکی در ایالات متحده آمریکا از سال ۱۹۴۵-۲۰۱۵ ..... ۱۱
- شکل ۳-۲ تصویری شماتیک از نحوه انسداد بخش انتخابی چاه ..... ۱۲
- شکل ۴-۲ شکافت عمودی در اطراف یک چاه قائم ..... ۱۳
- شکل ۵-۲ تغییرات فشار به هنگام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه قائم ..... ۱۴
- شکل ۶-۲ شکستگی و رژیم تنشهای حاکم ..... ۱۵
- شکل ۷-۲ طرحی شماتیک از مدل PKN ..... ۱۷
- شکل ۸-۲ طرحی شماتیک از مدل KGD ..... ۱۹
- شکل ۹-۲ مدلسازی عددی شکست هیدرولیکی با استفاده از FEM ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲ راه کارهای رفع مشکل مدلسازی با اجزای محدود ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲ مقایسه شبیه سازی ترک در دو روش FEM و XFEM ..... ۲۴
- شکل ۱۲-۲ تفکیک فرآیند اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی ..... ۲۷
- شکل ۱-۳ تولید شبکه شکستگیهای مجزا با شبیه ساز مونت کارلو ..... ۴۱
- شکل ۲-۳ هندسه اولیه مدل ..... ۴۲
- شکل ۳-۳ تولید الگوی شکستگیهای مدل با استفاده از شبکه شکستگی مجزا ..... ۴۵
- شکل ۴-۳ شکستگی تولید شده در بلوک ..... ۴۵
- شکل ۵-۳ نمایش وضعیت تنشهای برجا ..... ۵۰
- شکل ۶-۳ توزیع فشار منفذی در مدل ..... ۵۱

- شکل ۷-۳ هندسه مدل PKN ..... ۵۳
- شکل ۸-۳ نمایش تغییرات فشار (پاسکال) در داخل شکستگی هیدرولیکی ..... ۵۵
- شکل ۹-۳ مقایسه فشار حاصله در فرآیند شکست در دو روش PKN و عددی ..... ۵۵
- شکل ۱۰-۳ مقایسه تغییرات بازشدگی در دو روش PKN و عددی ..... ۵۵
- شکل ۱۱-۳ نمایش شکستگیهای طبیعی بر صفحه قائم عبوری از محل تزریق ..... ۵۷
- شکل ۱۲-۳ نمایش شکستگیهای طبیعی بر صفحه افقی گذرنده از محل تزریق ..... ۵۷
- شکل ۱۳-۳ نمایش خطوط جریان سیال تزریق شده ..... ۵۸
- شکل ۱۴-۳ تغییرات فشار در اثر تزریق در صفحه احتمالی شکست هیدرولیکی ..... ۵۹
- شکل ۱۵-۳ تغییرات فشار در برش افقی از بلوک مرکزی در محل تزریق ..... ۶۰
- شکل ۱۶-۳ تغییرات بازشدگی صفحه شکست هیدرولیکی ..... ۶۱
- شکل ۱۷-۳ شکستگیهای موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم پایین ( $P_{32}=0.01$ ) ..... ۶۲
- شکل ۱۸-۳ شکستگیهای موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم متوسط ( $P_{32}=0.03$ ) ..... ۶۲
- شکل ۱۹-۳ شکستگیهای موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم بالا ( $P_{32}=0.05$ ) ..... ۶۳
- شکل ۲۰-۳ توزیع شکستگیها در صفحه افقی عبوری از محل تزریق در حالت  $k=5$  ..... ۶۴
- شکل ۲۱-۳ توزیع شکستگیها در صفحه افقی عبوری از محل تزریق در حالت  $k=60$  ..... ۶۴
- شکل ۲۲-۳ فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۶۶

- شکل ۳-۲۳ بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر... ۶۷
- شکل ۳-۲۴ فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۶۸
- شکل ۳-۲۵ بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین..... ۶۸
- شکل ۳-۲۶ فشار بیشینه در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر  $\alpha$  در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۷ بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر  $\alpha$  در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۸ فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینه در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۹ بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینه در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین ..... ۷۲
- شکل ۴-۱ نقشه موقعیت میدان اهواز و میادین هم‌جوار ..... ۷۴
- شکل ۴-۲ نمای شماتیک شبکه MLP ..... ۷۹
- شکل ۴-۳ همگرایی شبکه با انجام ۱۸ آموزش و کاهش میزان مربع خطا ..... ۸۱
- شکل ۴-۴ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و پیشبینی شده ..... ۸۱
- شکل ۴-۵ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و پیشبینی شده به همراه مقدار خطا ..... ۸۲
- شکل ۴-۶ طبقه‌بندی رژیم تنش اندرسون ..... ۸۸
- شکل ۴-۷ برون یابی چگالی ..... ۸۹

- شکل ۴-۸ مکانیسم شکستهای برشی و کششی در چاه ..... ۹۳
- شکل ۴-۹ موقعیت چاه ۳۶۸ میدان اهواز (نقشه UGC) (محمدیان ۱۳۸۹) ..... ۹۶
- شکل ۴-۱۰ پارامترهای مقاومتی سنگ در سازند ایلام، چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۱ پارامترهای الاستیک، فشار منفذی و تنشهای برجا در سازند ایلام، چاه شماره ۳۶۸ ..... ۱۱۱
- میدان اهواز ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۲ پارامترهای مقاومتی سنگ در سازند سروک، چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳ پارامترهای الاستیک، فشار منفذی و تنش های برجا در سازند سروک، چاه شماره ..... ۱۰۱
- ۳۶۸ میدان اهواز ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱ زون بندی نهایی مخزن بنگستان اهواز (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹) ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲ موقعیت چاه شماره ۳۶۸ در میدان اهواز (نفت خیز جنوب) ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۳ شکستگی های برداشت شده از نمودار تصویرگر چاه ۳۶۸ میدان اهواز (نفت خیز جنوب ..... ۱۰۹)
- ۱۳۸۹) ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۴ نمایش توزیع شکستگی ها در استریونت ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۵ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون E1 ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۶ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون E2 ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۷ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون G2 ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۸ مقایسه بیشینه بازشدگی زونهای  $G_2, E_1, E_2$  ..... ۱۱۷

## فهرست جداول

|          |                                                                    |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۱-۳ | توابع توزیع مورد استفاده در مدل                                    | ۴۳  |
| جدول ۲-۳ | خواص هندسی دسته درزه اول                                           | ۴۸  |
| جدول ۳-۳ | خواص هندسی دسته درزه دوم                                           | ۴۸  |
| جدول ۴-۳ | خواص سنگر بکر و شکستگی‌ها                                          | ۴۹  |
| جدول ۵-۳ | مقادیر تنش در عمق ۳۰۰۰ متری (مرکز مدل)                             | ۵۱  |
| جدول ۶-۳ | خواص سنگ بکر                                                       | ۵۳  |
| جدول ۷-۳ | خواص شکستگی                                                        | ۵۳  |
| جدول ۱-۴ | داده های مورد نیاز جهت یاخت مدل                                    | ۷۶  |
| جدول ۲-۴ | روابط تجربی برای تخمین موج برشی                                    | ۷۸  |
| جدول ۳-۴ | روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته دینامیک به استاتیک          | ۸۴  |
| جدول ۴-۴ | روابط تجربی به منظور تعیین مقاومت تکمحوری فشاری سنگ                | ۸۵  |
| جدول ۵-۴ | محاسبه حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب              | ۹۴  |
| جدول ۶-۴ | محاسبه حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موگی-کلومب             | ۹۵  |
| جدول ۱-۵ | عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری                  | ۱۰۵ |
| جدول ۲-۵ | خلاصه های از ویژگی های شکستگی های باز برداشت شده از نمودار تصویرگر | ۱۰۷ |
| جدول ۳-۵ | تراکم شکستگی ها در زونهای مختلف چاه ۳۶۸ میدان اهواز                | ۱۰۹ |
| جدول ۴-۵ | ثابت فیشر برای دسته درزه های چاه ۳۶۸ میدان اهواز                   | ۱۱۲ |
| جدول ۵-۵ | خواص شکستگیهای موجود در زونهای مورد مطالعه                         | ۱۱۲ |

جدول ۵-۶ خواص سنگ بکر ..... ۱۱۳

جدول ۵-۷ خواص هندسی دسته درزه اول ..... ۱۱۴

جدول ۵-۸ خواص هندسی دسته درزه دوم ..... ۱۱۴

جدول ۵-۹ خواص مکانیکی شکستگی ها ..... ۱۱۴



---

## افصل اول

---

### کلیات

## ۱-۱ پیشگفتار

کاربرد مکانیک سنگ سال‌هاست در بخش‌های مختلف صنعت نفت دنیا در موضوعاتی چون پایداری دیواره چاه‌ها، ماسه دهی چاه‌ها، حفاری‌های تعادلی و زیر تعادلی، مچالگی لوله‌های جداری، ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت و گاز، نشست سطح زمین و کف دریا، شکست هیدرولیکی و .... مطرح‌شده و پروژه‌های زیادی در ارتباط با آن تعریف و انجام گردیده است. با افزایش نیاز به انرژی، صنعتگران در حوزه نفت را بر آن واداشت تا در اندیشه‌ی اکتشاف منابع جدید و بالا بردن میزان تولید نفت از میدان‌های موجود قرار گیرند که موجب ارائه روش‌های جدیدی در این زمینه شده است. به‌طور کلی می‌توان روش‌های تحریک مخازن را در این زمینه ذکر و به‌طور خاص شکست هیدرولیکی را به عنوان شاخص‌ترین روش نام برد.

شکست هیدرولیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفتی، گازی و هیدروترمال به شمار می‌رود. این روش شامل تزریق سیال با فشارهای به‌اندازه کافی به درون چاه به‌منظور ایجاد شکاف و گسترش آن درون سازند است. پس از این که روش شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹ توسط کلارک<sup>۱</sup> معرفی گردید، نقش بسزایی در معادلات صنایع نفت و گاز جهان ایفا کرد. با پیشرفت فنی در فرآیند شکست هیدرولیکی، کاهش هزینه‌ی آن و افزایش چشمگیر قیمت منابع سوخت‌های فسیلی استفاده از منابع غیرمعارف را اقتصادی کرده و نقش این روش را پررنگ‌تر کرده است. طراحی صحیح شکست هیدرولیکی پیش از اجرای آن، کاهش عدم قطعیت در نتایج اجرای آن را به همراه خواهد داشت. ازین رو شناسایی عوامل موثر بر فرآیند شکست هیدرولیکی به منظور انجام طراحی صحیح، شایان اهمیت است. عوامل موثری در طراحی می‌توانند تاثیر گذار باشند، شکستگی‌های طبیعی موجود در مخزن از جمله مهم‌ترین این عوامل است. نحوه قرارگیری شکستگی طبیعی در مسیر شکستگی هیدرولیکی می‌تواند نتایج

---

<sup>1</sup> Clark

متفاوتی را رقم بزند. لذا بررسی هندسه شکستگی‌ها مهم تلقی می‌شود. در مطالعاتی که در فصول آتی به آن اشاره خواهد شد، نشان می‌دهد که پارامترهای معرف هندسه شکستگی نظیر جهت‌داری، اندازه شکستگی و چگالی هریک به نوعی در هندسه شکستگی هیدرولیکی اثر گذاشته و توجه به آن‌ها پر اهمیت است.

## ۲-۱ اهداف پژوهش

عوامل زیادی از جمله پارامترهای ژئومکانیکی، سیال و نوع پروپانت تزریقی، شرایط سازند از جمله نفوذپذیری و وجود شکستگی‌های طبیعی می‌توانند در فرآیند شکست هیدرولیکی موثر باشند. شناخت جامع و کافی از هر یک از عوامل مذکور و بررسی نقش هریک از آن‌ها می‌تواند در طراحی درست فرآیند شکست هیدرولیکی اثرگذار باشد.

شکستگی‌های طبیعی نیز از جمله عواملی است که می‌تواند شرایط انجام شکست هیدرولیکی را با محدودیت مواجه سازند. با توجه به اینکه شرایط هندسی شکستگی‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها در مخزن چگونه بوده، می‌توانند رخدادهای متفاوتی را در فرآیند شکست هیدرولیکی به وجود بیاورند. در این تحقیق باهدف بررسی تاثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌های طبیعی بر عملیات شکست هیدرولیکی، از شبکه شکستگی‌های مجزا به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تولید شکستگی‌ها با عدم قطعیت پایین و روش عددی اجزای مجزا استفاده شده و سوال اساسی مبنی بر اینکه هندسه شکستگی‌ها چه تاثیری بر شکستگی هیدرولیکی خواهند گذاشت، پاسخ داده می‌شود.

## ۳-۱ ضرورت پژوهش

نزدیک به ۷۰ سال از اولین عملیات شکست هیدرولیکی در دنیا می‌گذرد اما متأسفانه این فرآیند همچنان در ایران چندان به‌طور موفقیت آمیز انجام نشده است. با توجه به انقلاب استفاده از ذخایر غیرمتعارف، پژوهش و سرمایه‌گذاری فکری و مالی بیش‌تری را نیازمند است تا تمامی جوانب این موضوع

تحلیل و به انجام رسد.

از طرفی مقدار قابل توجهی از ذخایر نفت و گاز - بیش از ۶۰ درصد از ذخایر نفتی و ۴۰ درصد از ذخایر گازی جهان - در مخازن شکافدار طبیعی قرار دارند و درهم کنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی بسیار فرآیند پیچیده‌ای بوده و ممکن است شرایط متفاوتی را به هنگام تقابل دارا باشند. پیچیدگی این شرایط می‌تواند موجب نتایج غیر قابل قبولی شده و فرآیند تحریک را با شکست مواجه سازد. بدین منظور بررسی جوانب متفاوت فرآیند شکست هیدرولیکی در تقابل با شکستگی‌های طبیعی در مخازن شکافدار طبیعی پیش از اجرای فرآیند و در مرحله امکان‌سنجی اهمیت فراوانی دارد. از طرفی با توجه به تعداد بالای مخازن شکافدار و رفتار شکستگی‌های طبیعی، بررسی آن‌ها پیش از انجام عملیات، شایان اهمیت بوده و ضرورت پژوهش را توجیه می‌کند.

## ۴-۱ روش پژوهش

در پژوهش پیشرو به چگونگی پاسخ مخزن شکافدار طبیعی بر اثر جریان در عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته خواهد شد. به منظور رسیدن به این هدف، از ابزار روش عددی و شبکه شکستگی‌های مجزا استفاده می‌شود. بدین منظور روش عددی مورد استفاده المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار 3DEC خواهد بود که محیط را از بلوک‌هایی نفوذناپذیر که با استفاده از درزه‌ها و صفحات شکستگی از هم جدا شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کند. فرض مدل این است که جریان سیال فقط می‌تواند در شکستگی رخ دهد. بلوک‌ها الاستیک و نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شوند. به دلیل محدودیت نرم‌افزار، در این پژوهش گسترش شکستگی‌های قبلی نادیده گرفته خواهد شد. مدل رفتاری شکستگی‌های طبیعی با قانون کلمب-اسلیپ با چسبندگی صفر تعریف می‌شود.

پس از مدل‌سازی هندسه و شرایط مربوط، به نحوه‌ی پاسخ شکستگی هیدرولیکی در حضور

شکستگی‌های طبیعی در مدل پرداخته‌شده که به‌صورت فرم ساده‌ای از رفتار توأمان هیدرو مکانیکی است. سیال با یک نرخ ثابت تزریق‌شده و نحوه بررسی تاثیر شکستگی‌ها، با ارزیابی توابع توزیع حاکم بر پارامتر-های معرف هندسه شکستگی‌ها خواهد بود.

## ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو در شش فصل طبقه‌بندی می‌شود که به‌طور اختصار هرکدام از فصول به شرح زیر است: در فصل حاضر از پایان‌نامه ارائه‌شده، به شرح مختصری از موضوع پایان‌نامه پرداخته و اهمیت این پژوهش برای خواننده شرح داده‌شده است. سپس اهداف، ضرورت و روش پژوهش بیان‌شده و در ادامه آن، فصل‌بندی و نحوه ارائه مطالب برای خواننده توضیح داده‌شده است.

در فصل دوم مختصری درباره تاریخچه شکست هیدرولیکی، نحوه اجرا و مکانیسم آن و توصیف فیزیکی شکستگی ارائه خواهد شد. در پایان فصل، بررسی اجمالی روش‌های مدل‌سازی شکست هیدرولیکی مبتنی بر روش‌های تحلیلی و عددی صورت می‌پذیرد. نحوه تقابل و درهم‌کنش بین شکستگی هیدرولیکی و شکستگی طبیعی، مورد بررسی قرار گرفته و پژوهش‌هایی که تاکنون انجام‌شده و به نسبت مرتبط با این پژوهش بوده، معرفی می‌شود. در ادامه در فصل سوم، نحوه مدل‌سازی شکستگی‌ها با شبکه شکستگی‌های مجزا و مدل‌سازی عددی با روش اجزا مجزا پرداخته می‌شود. بررسی پارامتری و تحلیل حساسیت شکستگی هیدرولیکی بر پارامترهای هندسی شکستگی‌های طبیعی نظیر جهت‌داری، اندازه شکستگی و تراکم آن‌ها در مخزن در این فصل گنجانده خواهد شد.

در فصول چهارم و پنجم مطالعه موردی در چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز صورت می‌پذیرد. بدین شکل که در فصل چهارم نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی و فصل پنجم قابلیت تعمیم مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت با استفاده از یک مطالعه موردی بررسی می‌شود.

در نهایت در فصل ششم به جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده، دسته‌بندی نتایج و پیشنهادهایی به‌منظور

مطالعات آتی پرداخته خواهد شد.

---

۲ فصل دوم

---

## شکست هیدرولیکی

## ۱-۲ پیشگفتار

فرآیند شکست هیدرولیکی را به زبانی ساده می‌توان ایجاد یک ترک در اثر کشش و رشد آن با استفاده از بالا بردن فشار از طریق یک نوع سیال در بخش انتخابی از یک چاه تعریف کرد. به‌طوری‌که ایجاد شکستگی در مخزن می‌تواند موجب افزایش تولید در مخازن متعارف و حتی رهاسازی مواد هیدروکربوری در مخازن غیرمتعارف شود. فناوری شکست هیدرولیکی از ابتدای تولد تاکنون صنعت‌گران را با چالش‌های فراوانی روبه‌رو کرده است و به‌عنوان یک پرسش اساسی نزد متخصصین صنایع نفت و گاز شناخته شده است. با انقلاب در استخراج مواد هیدروکربوری از مخازن غیرمتعارف، شکست هیدرولیکی جایگاه ویژه‌ای را برخوردار شد. به‌گونه‌ای که امروزه استفاده از شکست هیدرولیکی به‌عنوان یک روش اساسی برای تولید مواد هیدروکربوری از مخازن غیرمتعارف به شمار می‌رود.

در فصل پیش رو مبانی و کلیات شکست هیدرولیکی، تاریخچه اجرای آن و مطالعه‌هایی که تاکنون انجام شده مورد بررسی قرار گرفته تا اهمیت موضوع پژوهش بیش‌ازپیش نمایان گردد. گستره بررسی مطالب با توجه به‌عنوان پژوهش، شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته طبیعی را در بر خواهد گرفت.

## ۲-۲ تاریخچه شکست هیدرولیکی<sup>۱</sup>

تحریک چاه نفت<sup>۲</sup> در مخازن کم‌عمق با سنگ سخت به سال ۱۸۶۰ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که از دینامیت<sup>۳</sup> و نیتروگلیسرین<sup>۴</sup> مایع برای افزایش تولید نفت و گاز در سازند استفاده شده است.

(Montgomery et al. 2010)

باوجوداینکه این روش بسیار پرخطر و ریسک‌پذیر بوده اما بااین‌حال در بسیاری از موارد پاسخ

---

<sup>1</sup> Hydraulic fracturing

<sup>2</sup> Well stimulation

<sup>3</sup> Dynamite

<sup>4</sup> Nitroglycerin

خوبی را به همراه داشته است. استفاده از شکست اسیدی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۳۰ مطرح شد. به دلیل اینکه اسید باعث انحلال سنگ شده و در نتیجه کانال‌های ارتباطی از طریق شکستگی‌ها همچنان باز و افزایش تولید را به همراه داشت. (Montgomery et al. 2010)

ارتباط بین عملکرد چاه و اعمال فشار اولین بار توسط فلویید فریس<sup>۲</sup> در شرکت استنداولیل<sup>۳</sup> مطالعه شد. این مطالعه اساس اولین تجربه شکست هیدرولیکی بوده که در سال ۱۹۴۷ توسط شرکت استنداولیل در یک میدان گازی انجام شده بود، پی‌ریزی شد (Montgomery et al. 2010).

روش استفاده از فشار سیال به منظور تحریک چاه در مقیاس صنعتی برای ایجاد شکاف درون سنگ توسط کلارک<sup>۴</sup> در سال ۱۹۴۹ معرفی گردید. روش معرفی شده توسط کلارک را می‌توان شامل دو فرایند زیر دانست (Clark et al. 1949):

- (۱) تزریق سیال با ویسکوزیته بالا، شامل ذراتی همچون ماسه یا دانه‌های شیشه، جهت باز نگه داشتن شکاف‌های ایجاد شده، تحت فشار زیاد به درون سازند که سبب ایجاد شکاف در سنگ می‌شود.
- (۲) تغییر ویسکوزیته سیال از مقادیر زیاد اولیه به مقادیر کوچک، جهت جابجایی و خالی نمودن سازند از سیال تزریقی.

۱۷ مارس ۱۹۴۹ شرکت هالیبرتون<sup>۵</sup> برای اولین بار دو عملیات شکست هیدرولیکی را در اوکلاهاما<sup>۶</sup> و تگزاس<sup>۷</sup> با موفقیت اجرا کرد که زمینه‌ساز توسعه این صنعت در ایالات متحده آمریکا شد. در اولین سال ۳۳۲ چاه توسط شکست هیدرولیکی تحریک شد که با افزایش میزان تولید با میانگین ۷۵٪ روبه‌رو شد.

---

<sup>1</sup> Acid fracture

<sup>2</sup> Floyd farris

<sup>3</sup> Stanolind

<sup>4</sup> Clark

<sup>5</sup> Halliburton

<sup>6</sup> Oklahoma

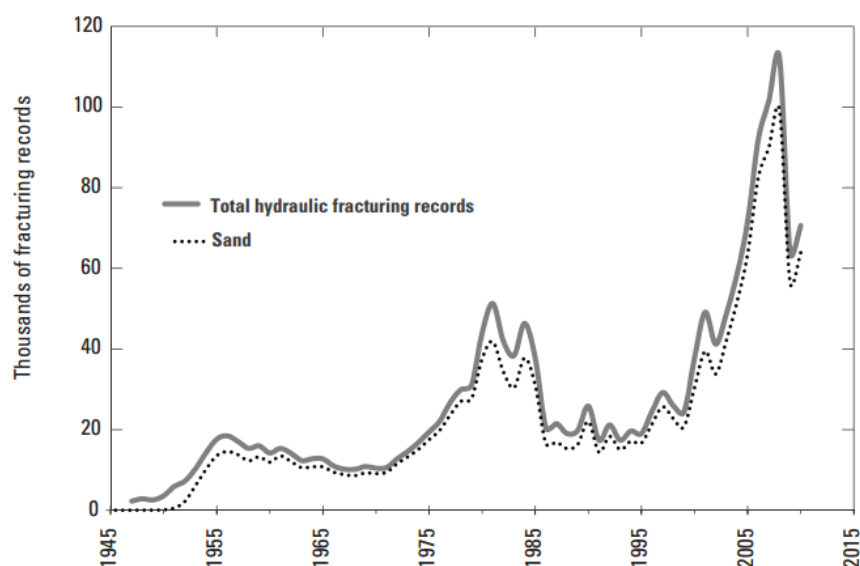
<sup>7</sup> Texas

استفاده از این فناوری به سرعت مورد اقبال صنعتگران قرار گرفته، به گونه‌ای که در اواسط سال ۱۹۵۰ به ۳۰۰۰ چاه در یک ماه رسید. شکل ۱-۲ تصویری از اولین عملیات شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد (Montgomery et al. 2010).



شکل ۱-۲ اولین عملیات شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹ توسط هالیبرتون (Economides et al. 2002)

در سال ۲۰۰۸ بیش از ۵۰ هزار شکست در سراسر جهان با هزینه‌ای بین ۱۰ هزار دلار تا ۶ میلیون دلار آمریکا برای هر شکست انجام گردید. پس از معرفی فناوری شکاف هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹ تاکنون ۲/۵ میلیون شکست چاه در سراسر دنیا انجام شده است (Montgomery et al. 2010). شکل ۲-۲ تعداد عملیات شکست هیدرولیکی از سال ۱۹۴۵ تا ۲۰۱۵ در ایالات متحده آمریکا را نشان می‌دهد. آمارها حاکی از آن است که استفاده از فرآیند شکست هیدرولیکی در ایالات متحده آمریکا سیر صعودی خود را پیش گرفته به گونه‌ای که در ابتدای قرن بیست و یکم به بیشترین میزان خود رسیده است (Gallegos & Varela 2015).



شکل ۲-۲ تعداد عملیات شکست هیدرولیکی در ایالات متحده آمریکا از سال ۱۹۴۵-۲۰۱۵ (Gallegos & Varela 2015)

تولید از منابع غیرمتعارف<sup>۱</sup> خصوصاً شیل‌های گازی<sup>۲</sup> با توجه به نفوذپذیری پایین آن‌ها، الزام استفاده از فناوری شکست هیدرولیکی را توجیه می‌کند. این فناوری در کنار حفاری افقی، نقش بسزایی را در به انجام رساندن تولید از منابع غیرمتعارف ایفا می‌کند. شاید بتوان دلیل افزایش استفاده از شکست هیدرولیکی در سال‌های اخیر را مربوط به افزایش روزافزون تولید از منابع غیرمتعارف دانست.

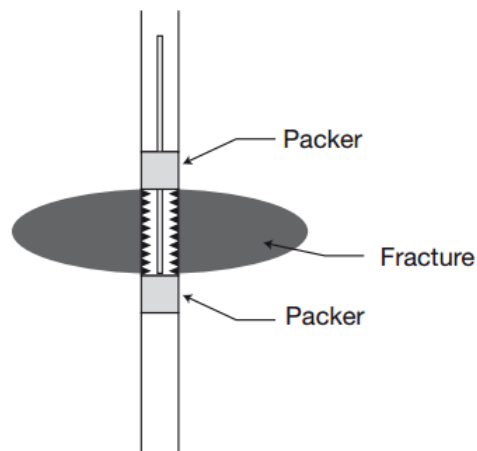
## ۲-۳ فرآیند شکست هیدرولیکی

هدف از فرآیند شکست هیدرولیکی ایجاد یک ناحیه نفوذپذیر در سازند، به‌منظور تخلیه و افزایش تولید نفت و گاز است. بدین منظور بخشی از چاه که در مرحله طراحی انتخاب شده است، با استفاده مسدودکننده<sup>۳</sup> کاملاً جداسازی می‌شود (شکل ۲-۳) (Technip & Nauroy 2011).

<sup>1</sup> Unconventional resource

<sup>2</sup> Shale gas

<sup>3</sup> Packer



شکل ۳-۲ تصویری شماتیک از نحوه انسداد بخش انتخابی چاه (Technip & Nauroy 2011)

از یک موتور یا پمپ به منظور انتقال سیال، تزریق و افزایش فشار با فشار و دبی مورد نظر استفاده می‌شود (Montgomery et al. 2010). از اوایل توسعه شکست هیدرولیکی سیال شکست را سیالات پایه نفتی تشکیل می‌دادند. کمی بعد از اسید به منظور بالا بردن گرانشی سیالات پایه نفتی برای تسهیل در انجام شکست و انتقال پروپانت<sup>۱</sup> استفاده شد. با افزایش آگاهی نسبت به واکنش سنگ نسبت به سیال خصوصاً در مخازن با درصد شیل بالا، استفاده از سیالات پایه آبی رایج گردید. به منظور افزایش گرانشی سیالات پایه آبی، در نتیجه آن انتقال هرچه بهتر پروپانت و شکستگی بهتر، از پلیمرهای پایه گوار<sup>۲</sup> استفاده شد (Al-Muntasheri 2014). مواد دانه‌ای که پروپانت نامیده می‌شوند، از طریق سیال وارد شکستگی شده تا مانعی برای بسته شدن مجدد آن پس از توقف گردد (Economides et al. 2002).

از ابتدای توسعه شکست هیدرولیکی که با استفاده از ماسه به عنوان پروپانت شروع شد، انواع متعددی از پروپانت در عملیات شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته است. با پیشرفت در بهره‌برداری از مخازن عمیق و همچنین توسعه ایجاد شکستگی‌های پیچیده از لحاظ هندسی، تغییرات در مواد

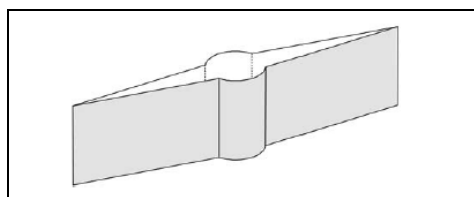
<sup>1</sup> Proppant

<sup>2</sup> Guar-based polymers

مورد استفاده به عنوان پروپانت را موجب شد. به عنوان مثال امروزه ساخت پروپانت‌هایی با مقاومت بیشتر و چگالی کمتر احساس شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. می‌توان ماسه و سرامیک را به عنوان پرکاربردترین پروپانت و در کنار آن‌ها پروپانت‌های اصلاح‌شده‌ای نظیر رزین و پروپانت‌های سبک را نام برد. در طراحی پروپانت و انتخاب آن پارامترهای نظیر نوع پروپانت، اندازه و شکل آن نقش مهمی را ایفا می‌کنند (Liang et al. 2016).

## ۴-۲ مکانیسم شکست هیدرولیکی

شکست هیدرولیکی در سنگ هنگامی ایجاد می‌شود که فشار سیال درون سنگ از تنش اصلی حداقل به اضافه مقاومت کششی سنگ بیشتر شده که منجر به شکست کششی سنگ می‌شود. با افزایش فشار سیال در چاه تا نقطه‌ای که تنش اصلی حداقل کششی شود، شکست ایجاد می‌شود. با ادامه تزریق و افزایش فشار، سازند شکافته شده و شکستگی در جهت حداقل مقاومت گسترش می‌یابد. این حداقل مقاومت در جهت تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل رخ داده و به صورت عمودی خواهد بود. اگر چاهی قائم در نظر گرفته شود، شکافتی عمودی مطابق با شکل ۴-۲ ایجاد می‌شود (Fjar et al. 2008).



شکل ۴-۲ شکافت عمودی در اطراف یک چاه قائم (Fjar et al. 2008)

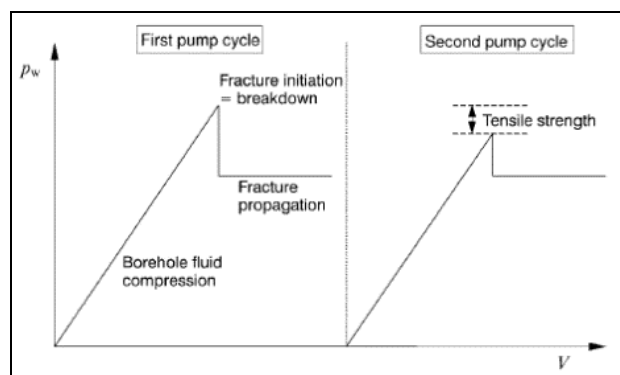
همان‌طور که بیان شد، شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که کشش القایی ناشی از تزریق سیال بر سنگ از مقاومت کششی آن بیشتر شود شرایط لازم برای وقوع شکست کششی در مواد متخلخل به صورت معادله ۱-۲ است (Fjar et al. 2008):

$$\sigma - p_f \prec -T_0 \quad (1-2)$$

جایی که در آن  $P_f$  فشار موجود در منافذ و  $T_0$  مقاومت کششی سنگ که بر حسب مگاپاسکال است. این رابطه در واقع معیاری برای شکست کششی سنگ است. شکاف‌هایی از قبل در سنگ وجود دارد، مقاومت کششی آن‌ها صفر بوده و در این صورت، معیار باز کردن مجدد شکاف به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma - p_f \prec 0 \quad (2-2)$$

در شکل ۵-۲ بخش خطی ابتدای نمودار نشان‌دهنده تغییر شکل الاستیک سیستم در چاه و اطراف آن است. نقطه بیشینه فشار نمودار، شرایط ایجاد شکاف را نشان می‌دهد. به دلیل بیشتر بودن نرخ گسترش شکستگی نسبت به نرخ تزریق، فشار در این نقطه بلافاصله کاهش می‌یابد. این افت ناگهانی، عدم ناپایداری گسترش شکستگی را نشان می‌دهد. زمانی که چرخه دوم تزریق آغاز می‌شود، در این حالت تنها مقاومتی که در مقابل ایجاد شکاف و شکست سازند وجود دارد، تمرکز تنش‌های اطراف چاه خواهد بود. به دلیل وجود شکستگی از قبل، مقاومت کششی صفر است؛ بنابراین اختلاف بین پیک نمودار اولی و نمودار دوم را می‌توان برابر با مقاومت کششی سنگ در نظر گرفت (Fjar et al. 2008).

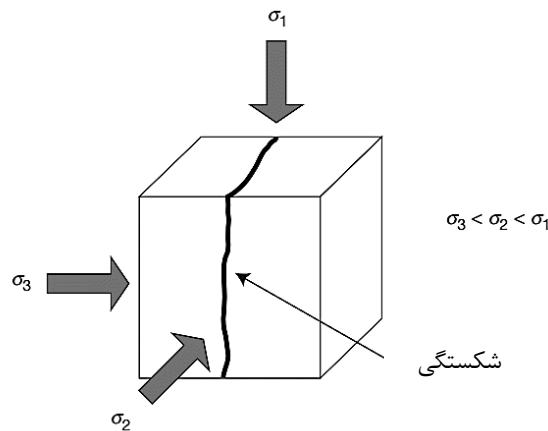


شکل ۵-۲ تغییرات فشار به هنگام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه قائم (Fjar et al. 2008)

## ۲-۵ توصیف فیزیکی شکستگی

اندازه و جهت شکستگی ایجاد شده و همچنین بزرگی فشار مورد نیاز جهت ایجاد آن، تحت تأثیر تنش‌های بر جای موجود در آن ناحیه است (Nolen-Hoeksema 2013).

هابرت<sup>۱</sup> و ویلیس<sup>۲</sup> طی آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که شکستگی ایجاد شده توسط عملیات شکست هیدرولیکی در راستای عمود بر محور تنش حداقل خواهد بود. میدان تنش در زیرزمین به صورت هیدرو استاتیک نبوده، بلکه از سه مؤلفه غیر یکسان و عمود بر هم تشکیل شده است (Hubbert & Willis 1954).



شکل ۲-۶ شکستگی و رژیم تنش‌های حاکم (Technip & Nauroy 2011)

رژیم تنش، جهت رشد شکستگی را کنترل می‌کند. شکستگی تمایل دارد در راستای کمترین مقاومت گسترش یابد. اگر بزرگ‌ترین مؤلفه تنش، تنش روباره باشد، شکستگی در جهت بزرگ‌ترین مؤلفه تنش افقی رشد کرده تا زمانی که فشار برابر با حداقل تنش افقی منطقه شود. در غیر این صورت در راستای تنش روباره گسترش خواهد یافت. (Nolen-Hoeksema 2013).

<sup>1</sup> Hubbert

<sup>2</sup> Willis

## ۶-۲ مدل سازی شکست هیدرولیکی

مدل سازی شکست هیدرولیکی فرآیند پیچیده‌ای است. این پیچیدگی نه تنها به موجب ناهمگن بودن خواص محیط مخزن، بلکه فیزیک خاص مساله این شرایط را ایجاب می‌کند. می‌توان هم‌زمانی بررسی تغییر شکل سنگ مخزن در مجاورت شکستگی، جریان سیال درون شبکه شکستگی و رشد شکستگی را یکی از دلایل اساسی این پیچیدگی مدل سازی دانست (Ahn 2016). تعدادی از مدل‌های تحلیلی و عددی از گذشته تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. تلاش‌های اولیه در استفاده از مدل‌های تحلیلی بوده و به مرور استفاده از مدل سازی عددی نیز بدین منظور اضافه شده‌اند. در این بخش به صورت مختصر به این تلاش‌ها اشاره شده است.

## ۶-۲-۱ روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی عمدتاً روش‌هایی هستند که مبتنی بر حل دقیق معادلات ریاضی با استفاده از برخی ساده سازی ها انجام می‌شود. به منظور حل تحلیلی شکست هیدرولیکی روش‌های مختلفی معرفی شده‌اند که در ادامه این بخش، برخی از این روش‌ها به صورت مختصر معرفی شده‌اند.

### ۶-۲-۱-۱ مدل سازی تحلیلی با روش $PKN^1$

پرکین<sup>۲</sup> و کرن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۱ برای محاسبه طول و عرض ترک با در نظر گرفتن ارتفاع ثابت، روابطی را ارائه کردند. کمی بعد نوردگرن<sup>۴</sup> این روابط را تصحیح و میزان از دست رفتن سیال را در آن دخیل کرد؛ از این رو این روش به PKN شهرت یافت. مدل PKN فرض می‌کند که اثر چقرمگی شکست<sup>۵</sup> قابل چشم‌پوشی است؛ زیرا انرژی مورد نیاز برای غلبه بر چقرمگی به مقدار قابل توجهی کوچک‌تر از انرژی مورد نیاز برای به جریان انداختن سیال درون شکستگی است. این مدل از شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده

<sup>1</sup> Perkin- Kern- Nordgren

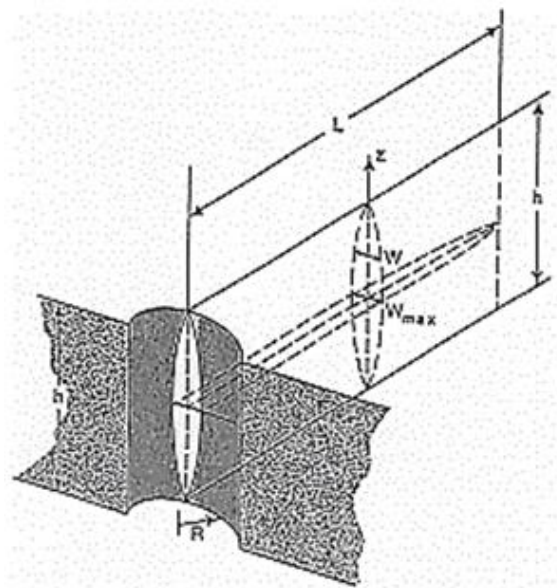
<sup>2</sup> Perkin

<sup>3</sup> Kern

<sup>4</sup> Nordgren

<sup>5</sup> Fracture toughness

کرده، میزان ارتفاع شکستگی ثابت و جهت گسترش شکستگی را افقی در نظر می‌گیرد (Xiang 2011).  
 شکل ۷-۲ به صورت شماتیک مدل PKN را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲ طرحی شماتیک از مدل PKN (Yew & Weng 2014)

بر اساس مطالعه نوردگرن معادله پیوستگی برای یک سیال غیرقابل تراکم در درون شکستگی را می‌توان  
 به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + q_1 + \frac{\partial A}{\partial T} = 0 \quad (۱-۲)$$

نوردگرن با تحلیل رابطه (۱-۲) روابطی را برای محاسبه طول شکستگی (متر) (L)، عرض شکستگی (متر) (w) و فشار چاه برای حالتی با در نظر گرفتن نشت سیال ارائه کرد. برای حالتی که نشت سیال زیاد است:

طول شکستگی برابر است با:

$$L = \frac{Q}{\pi c_1 h} t^{1/2} \quad (۲-۲)$$

عرض شکستگی:

$$w_0 = 4 \left[ \frac{2(1-\theta)\mu Q^2}{\pi^3 G c_l h} \right]^{1/4} t^{1/8} \quad (3-2)$$

فشار چاه:

$$p_w = 4 \left[ \frac{2G^3 \mu Q^2}{\pi^3 (1-\theta)^3 c_l h^5} \right]^{1/4} t^{1/8} \quad (4-2)$$

برای حالت بدون نشت سیال:

$$L = 0.68 \left[ \frac{GQ^3}{(1-\theta)\mu h^4} \right]^{1/5} t^{4/5} \quad (5-2)$$

$$w_0 = 2.5 \left[ \frac{(1-\theta)\mu Q^2}{Gh} \right]^{1/5} t^{1/5} \quad (6-2)$$

$$p_w = 2.5 \left[ \frac{G^4 \mu Q^2}{(1-\theta)^4 h^6} \right]^{1/5} t^{1/5} \quad (7-2)$$

که در روابط فوق  $h$  ارتفاع شکستگی (متر)،  $L$  طول کل شکستگی (m)،  $w$  عرض ترک (m) در مختصات محلی،  $r_w$  (m) شعاع چاه،  $G$  مدول برشی (Gpa)،  $P$  (pa) فشار در مختصات محلی،  $P_w$  (pa) فشار سر چاه،  $Q$  دبی جریان و  $q_l$  دبی نشت سیال ( $m^3/sec$ )،  $\mu$  (cp) ویسکوزیته جریان و  $C_l$  ثابت هرزروی سیال است.

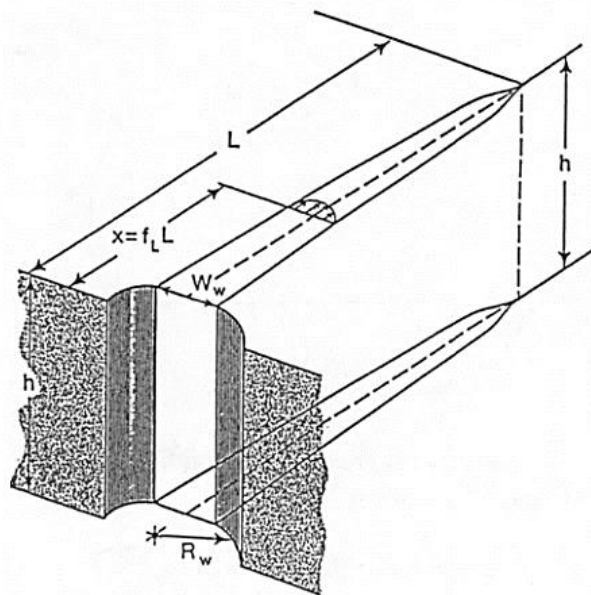
به دلیل اینکه مدل PKN شرایط کرنش صفحه‌ای را در نظر می‌گیرد، استفاده از این مدل در شرایطی که نسبت طول به ارتفاع شکستگی بزرگ باشد، مناسب‌تر است (Yew & Weng 2014).

## ۲-۱-۶-۲ مدل سازی تحلیلی با روش KGD<sup>۱</sup>

مدل KGD از سال ۱۹۵۵ توسط کریستیانویچ و ژلتوف<sup>۲</sup> معرفی و در ادامه با مطالعه

گریشما<sup>۳</sup> و دی کلرک<sup>۴</sup> در سال ۱۹۶۹ توسعه پیدا کرده است.

این مدل نرخ جریان را ثابت و برای سادگی تحلیل، فشار سیال را در طول ترک به جز در نزدیکی نوک ترک ثابت در نظر می گیرد. مدل KGD از شرایط کرنش صفحه ای استفاده کرده و مانند روش PKN ارتفاع ترک را ثابت در نظر می گیرد (Xiang 2011). شکل ۲-۸ به صورت شماتیک مدل KGD را نشان می دهد.



شکل ۲-۸ طرحی شماتیک از مدل KGD (Yew & Weng 2014)

<sup>۱</sup> Khristianovitch -Geertsma- De Klerk

<sup>۲</sup> Khristianovitch and Zheltov

<sup>۳</sup> Geertsma

<sup>۴</sup> De Klerk

بر اساس این مدل فرض شده شکستگی با مجرای به عرض  $W$ ، مقدار فشار برای جریان سیال

نیوتونی در داخل شکستگی برابر است با

$$p_w - p = \frac{12\mu QL}{h} \int_{f_{LW}}^{f_L} \frac{df_L}{w^3} \quad (۸-۲)$$

که در روابط اشاره شده  $h$  ارتفاع شکستگی (متر)،  $L$  طول کل شکستگی  $w$ ، عرض ترک (m) در مختصات محلی،  $rw$  (m) شعاع چاه،  $f_L = X/L$ ،  $f_{LW} = rw/L$ ،  $p$  (pa) فشار در مختصات محلی،  $P_w$  (pa) فشار سر چاه،  $Q$  دبی جریان ( $m^3/sec$ )،  $\mu$  (cp) ویسکوزیته جریان است.

گريشما و دی کلرک با تحلیل معادله (۸-۲) روابط ۹-۲، ۱۰-۲ و ۱۱-۲ را ارائه کردند.

$$L = 0.48 \left[ \frac{8GQ^3}{(1-\theta)\mu} \right]^{1/6} t^{2/3} \quad (۹-۲)$$

$$w_0 = 1.32 \left[ \frac{8(1-\theta)Q^3\mu}{G} \right]^{1/6} t^{1/3} \quad (۱۰-۲)$$

$$p_w = \sigma_{min} + 0.96 \left[ \frac{2G^3Q\mu}{(1-\theta)^3L^2} \right]^{1/4} \quad (۱۱-۲)$$

در روابط بالا  $G$  مدول برشی (Gpa)،  $\nu$  ضریب پواسون و  $\sigma_{min}$  تنش افقی حداقل (MPa) است (Yew & Weng 2014).

## ۲-۶-۱-۳ مدل شبه سه بعدی (Pseudo-3D)

استفاده از مدل های دوبعدی در گذشته رایج بوده است، اما این مدل ها نمی توانند انتشار قائم و جانبی شکاف را به طور هم زمان شبیه سازی کنند. مدل شبه سه بعدی توسعه یافته مدل PKN است با این تفاوت که سطح مقطع آن بیضی شکل نیست و ارتفاع شکاف در آن تابع فاصله از چاه و زمان است. این

مدل‌ها به دودسته تقسیم می‌شوند: الف) مدل‌هایی که طول شکاف را به سلول‌هایی تقسیم می‌کنند که هندسه آن‌ها به فشار سیال بستگی دارد و ب) مدل‌هایی که از نمایش هندسه کل شکاف استفاده می‌کنند (Technip & Nauroy 2011). مدل شبه سه‌بعدی کاربرد فراوانی در مدل‌سازی شکست هیدرولیکی پیدا کرده و عمدتاً در مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در سازندهای چندلایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل می‌تواند ضعف مدل‌سازی عددی در سیستم‌هایی با تنش‌های دربرگیرنده غیریکنواخت و چندلایه پوشش دهد و دقت مدل‌سازی را بالا ببرد (Shahid et al. 2016).

## ۲-۶-۱-۴ مدل‌های سه‌بعدی کامل

مدل‌های شبه سه‌بعدی امکان مدل‌سازی شکاف‌هایی با جهت‌گیری و شکل متفاوت (مانند شکاف-هایی که در چاه‌های انحرافی شکل می‌گیرند) را ندارند. مدل‌های سه‌بعدی کامل، توانایی توصیف دقیق‌تر هندسه شکاف را دارند؛ اما اجرای این مدل‌ها پیچیده‌تر است. مدل‌های سه‌بعدی کامل توسط ستاری<sup>۱</sup> و کلیری<sup>۲</sup> (۱۹۸۴) توسعه یافته‌اند. در این مدل یک سری معادله با در نظر گرفتن موارد زیر فرمول‌بندی شده‌اند:

(۱) جریان دوفازی و سه‌بعدی در مخزن

(۲) جریان دوفازی غیرنیوتونی در شکاف و انتقال حرارت، با در نظر گرفتن هرز روی‌های سیال به علت تنش روباره

(۳) انتشار عمودی و جانبی شکاف

(۴) انتقال پروپانت، هیدرولیک چاه، روابط PVT و خصوصیات رئولوژی سیال مخزن و شکاف.

یکی از مشکلات مدل‌های سه‌بعدی نیاز به تعداد زیاد پارامترهای ورودی، حساسیت مدل نسبت به

---

<sup>1</sup> Settari

<sup>2</sup> Cleary

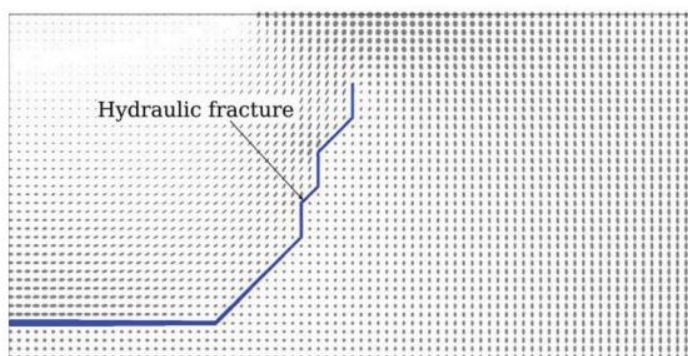
این پارامترها و در نتیجه دشواری در تعیین تمام داده‌های مورد نیاز برای مدل سازی است. (Settari & Cleary 1984)

## ۲-۶-۲ روش‌های عددی

استفاده از مدل سازی‌های عددی در تحلیل و طراحی ژئومکانیکی خصوصا شکست هیدرولیکی در دنیا نسبت به گذشته گسترش و مقبولیت زیادی بین مهندسان پیدا کرده است. مدل سازی‌های عددی به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی شکست هیدرولیکی در مسایل مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. روش‌های عددی مختلفی در تحلیلی شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه به برخی از این روش‌ها اشاره شده است.

## ۲-۶-۲-۱ روش اجزا محدود<sup>۱</sup> (FEM)

اولین شبیه سازی عددی ایجاد شده شکست هیدرولیکی توسط روش اجزا محدود انجام شد. این روش با استفاده از مش بندی سیستم مورد مطالعه را به بخش‌های کوچک تری که المان نامیده می شود، تقسیم بندی می کند. هریک از المان‌های ایجاد شده با استفاده از یک تابع شکل<sup>۲</sup> با ترکیب خطی ساده شده توصیف می شود (Shahid et al. 2016).



شکل ۹-۲ مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی با استفاده از FEM (Shahid et al. 2016)

<sup>۱</sup> Finite Element Method

<sup>۲</sup> Shape function

یکی از مزایای استفاده از روش اجزا محدود، شبیه‌سازی سه‌بعدی رشد ترک در سیستم‌های پیچیده است. این روش می‌تواند هندسه‌های پیچیده و ناهمگن را مدل‌سازی کرده و توانایی اعمال خواص ناهمسانگرد را داراست. جریان سیال و تغییر شکل‌پذیری ژئومکانیکی با استفاده از تئوری بایوت پورو الاستیک<sup>۱</sup> به صورت توأمان و رشد ترک با تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)<sup>۲</sup> تحلیل می‌شود (Shahid et al. 2016). در روش اجزا محدود باید المان‌های خاصی را در نظر گرفت که در مرز بین المان‌های دیگر قرار گرفته و مسیر گسترش ترک را نشان دهد. به علت یکپارچه بودن المان‌ها جهت شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته در روش اجزای محدود، ایجاد شکاف در داخل المان‌ها امکان‌پذیر نیست. لزوم قرار گرفتن ترک در مرز بین المان‌ها یک نقطه ضعف برای این روش محسوب می‌شود؛ زیرا الگوی گسترش ترک مطابق با نحوه قرارگیری المان‌ها بوده و تابع وضعیت شبکه<sup>۳</sup> خواهد شد. برای فائق آمدن بر این مشکل یک‌راه، ریز کردن شبکه<sup>۴</sup> و راه دیگر تطبیق هندسه مش با جهت گسترش ترک در هر گام مسئله است (پاک ۱۳۹۵).

لازم به ذکر است که در شکل ۲-۱۰ با در نظر گرفتن وضعیت C برای مدل‌سازی ترک واقعی مستلزم آن است که جهت پیشروی ترک از قبل، معین باشد و در مسائل پیچیده که ممکن است مسیر پیشروی ترک تغییر کند لازم است که در هر گام محاسباتی، مش جدیدی در نظر گرفته شود تا مسیر ترک جدید در مرز بین المان‌ها قرار گیرد.

این کار نیاز به انتقال حجم بزرگی از اطلاعات تنش و کرنش میان مش قدیم و مش جدید دارد که علاوه بر افزایش تلاش محاسباتی، موجب کاهش دقت جواب‌ها می‌شود (پاک ۱۳۹۵).

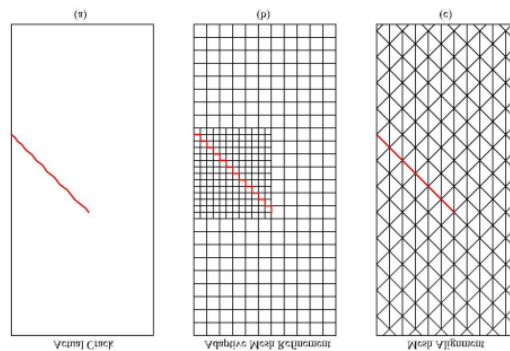
---

<sup>1</sup> Biot's poro-elastic theory

<sup>2</sup> Linear Elastic Fracture Mechanics

<sup>3</sup> Mesh dependent

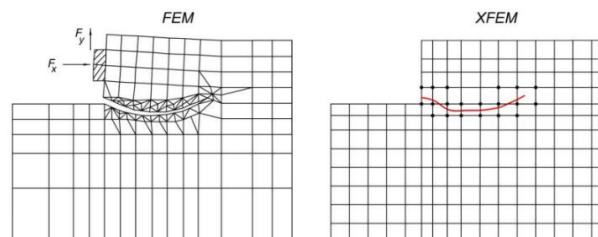
<sup>4</sup> Mesh refinement



شکل ۲-۱۰ راه کارهای رفع مشکل مدل سازی با اجزای محدود (پاک ۱۳۹۵)

## ۲-۶-۲-۲ روش اجزا محدود توسعه یافته (XFEM)<sup>۱</sup>

یکی از روش هایی که به منظور شبیه سازی فرآیند شکست هیدرولیکی و بهبود کاستی های روش اجزا محدود معرفی شده، روش اجزا محدود توسعه یافته است. سختی های مدل سازی با روش اجزا محدود در این روش وجود ندارد و از آنجایی که شکستگی به عنوان عضوی از مدل از قبل در نظر گرفته نشده است، نیاز به مش بندی مجدد نخواهد داشت (Keshavarzi et al. 2012). ایده اصلی در این روش، افزودن جملات اضافی به توابع شکل المان هایی است که ناپیوستگی در آن ها وجود دارد. اضافه کردن این جملات به توابع شکل المان ها را اصطلاحاً غنی سازی<sup>۳۰</sup> می نامند. به کمک این جملات می توان ناپیوستگی در المان ها را مدل سازی کرد و محدودیت قرارگیری ترک ها در مرز میان المان ها از بین می رود (پاک ۱۳۹۵).



شکل ۲-۱۱ مقایسه شبیه سازی ترک در دو روش FEM و XFEM (پاک ۱۳۹۵)

<sup>1</sup> Extended finite element method

## ۲-۶-۳ روش المان مرزی<sup>۱</sup>

روش المان مرزی به عنوان ابزاری برای مدل سازی شکست هیدرولیکی بسیار مفید واقع شده است. این روش تنها با مش بندی در مرز ناحیه به کار گرفته می شود. در این روش زمانی که مدل بی نهایت نبوده نیاز به ایجاد یک مرز بیرونی و مصنوعی وجود ندارد. روش المان مرزی مدل را به دو ناحیه تقسیم بندی می کند (Shahid et al. 2016):

(۱) ناحیه درونی شامل شکستگی

(۲) ناحیه بیرونی و محل تلاقی با سنگ بکر

مزیت المان مرزی عدم مش بندی ناحیه داخلی است. به منظور پوشش همه نواحی نیاز به بالا بردن تعداد مدل و برقراری ارتباط بین آنهاست. این مدل قابلیت خود را در مدل سازی نواحی بزرگ از دست می دهد. امروزه تلاش هایی شده که با تغییر فرضیات اولیه مدل و الگوریتم های تکرار، این نقیصه را برطرف نمایند. روش جابه جایی ناپیوستگی (DDM)<sup>۲</sup> یک نتیجه گیری از روش اجزا مرزی است. در این روش، المان های مستقل در طول مرز شکستگی ها با جابه جایی های ثابت توزیع می شوند. امروز این روش کاربرد زیادی در بررسی پدیده های اثرگذار بر شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد (Shahid et al. 2016).

## ۲-۶-۴ روش اجزا مجزا<sup>۳</sup>

روش اجزا مجزا در تحلیل مسائل محیط های دارای شکستگی و بلوکی به کار می رود. توسعه و پیکره بندی این روش از سال ۱۹۷۹ توسط کاندال<sup>۴</sup> آغاز شده و بیش از ۴۰ سال زمان برده است. در اصل، روش اجزا مجزا برای شبیه سازی دوبعدی یک توده سنگ درزه دار ایجاد شد؛ اما این روش برای کاربرد

<sup>1</sup> Boundary element method

<sup>2</sup> Displacement Discontinuity Method

<sup>3</sup> Distinct Element Method

<sup>4</sup> Cundall

در تحقیق درباره‌ی جریان ذرات، مطالعه روی مکانیزم‌های میکروسکوپی در مواد دانه‌ای، شکل‌گیری درزه در سنگ‌ها و بتن نیز گسترش داده شده است. نکته اساسی در روش اجزای مجزا این است که دامنه مدل مورد بررسی به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌ها و دیسک‌های صلب یا شکل‌پذیر رفتار می‌کنند. تماس بین آن‌ها باید در حین تغییرات در مدل و حرکت بلوک‌ها تشخیص و به صورت مداوم به روز شود. این روش می‌تواند کاربرد مناسبی در شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکافدار طبیعی با توجه به شبیه‌سازی نزدیک‌تر به شرایط واقعی از لحاظ ناپیوستگی‌ها، داشته باشد. ( Itasca Consulting Group inc , 2013).

## ۷-۲ شکستگی‌های طبیعی<sup>۱</sup> و برهم‌کنش آن با شکستگی هیدرولیکی

در مخازن شکافدار، مسیر جریان از شکستگی‌های باز عبور کرده لذا مکانیسم تولید به طور قابل ملاحظه‌ای با مخازن بدون شکاف متفاوت است. زمانی که فشار مخزن افت می‌کند، شکستگی‌ها بسته شده و می‌تواند تاثیر شگرفی در نحوه رشد و هندسه ترک در شکست هیدرولیکی داشته باشد؛ بنابراین بررسی خواص این شکستگی‌ها و هندسه آن‌ها برای طراحی عملیات شکست بسیار ضروری است. درهم کنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی بسیار فرآیند پیچیده‌ای است و ممکن است شرایط متفاوتی را به هنگام تقابل دارا باشند. این شرایط در اثر عقب نشست سیال<sup>۲</sup> از داخل ترک و میدان تنشی که در نوک ترک<sup>۳</sup> ایجاد شده، رخ دهد (Gu et al. 2011).

نوک ترک به نقطه برخورد با شکستگی طبیعی رسیده اما سیال به دلیل عقب نشست به نوک ترک نمی‌رسد و فشار سیال در این نقطه را می‌توان صفر در نظر گرفت. رشد شکستگی هیدرولیکی در اثر وجود میدان تنش و از طریق ریزترک‌های القایی ادامه پیدا می‌کند. این گام از فرآیند اثر متقابل شکستگی‌های

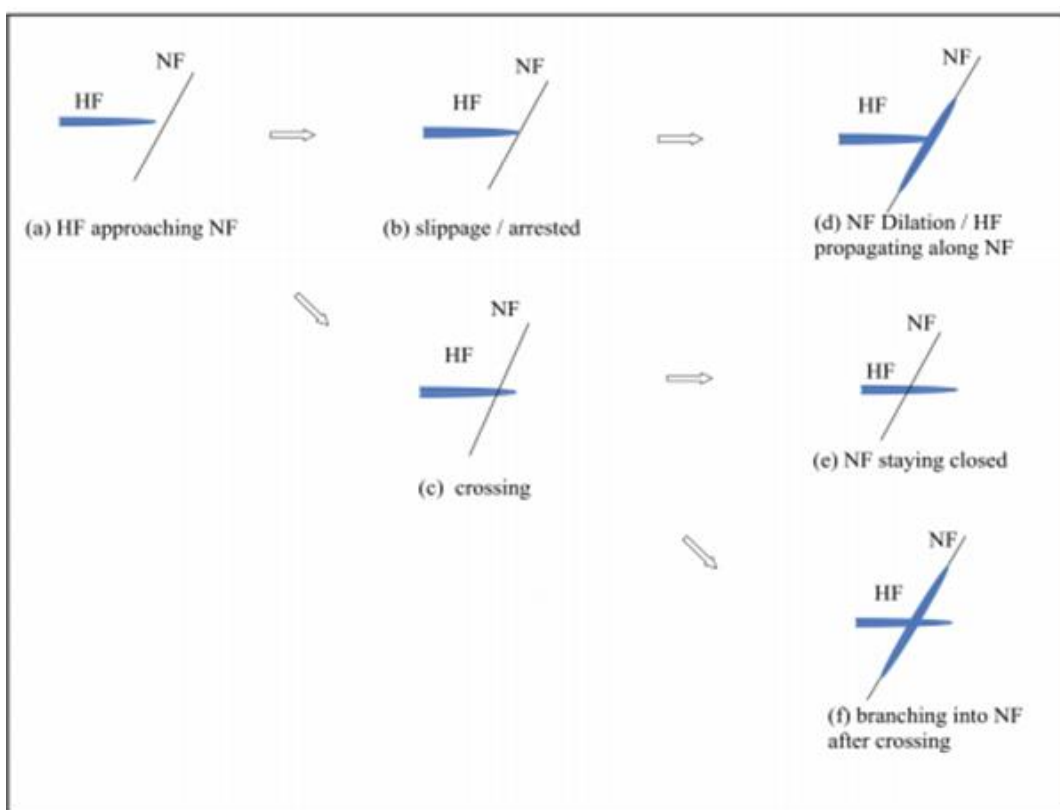
---

<sup>1</sup> Natural fracture

<sup>2</sup> Fluid lag

<sup>3</sup> Fracture tip

طبیعی و شکست هیدرولیکی را می‌توان بدون در نظر گرفتن اثر سیال و با استفاده از اندرکنش مکانیکی بین آن‌ها مورد بررسی قرارداد. نتایج احتمالی اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی می‌تواند لغزش برشی<sup>۱</sup>، توقف<sup>۲</sup> و عبور<sup>۳</sup> از شکستگی طبیعی به ترتیب در حالات a, b و c در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. عموماً رخداد این پدیده نادر بوده و تنها در صورت استفاده از سیال با گرانیروی پایین رخ می‌دهد (Gu et al. 2011).



شکل ۲-۱۲ تفکیک فرآیند اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی (Gu et al. 2011)

وقتی جبهه سیال به نقطه تماس با شکستگی طبیعی رسیده و منجر به افزایش فشار شد، اگر فشار سیال از فشار نرمال حاکم بر شکستگی بیشی گرفت، سیال ممکن است شکستگی طبیعی را باز کند؛

<sup>1</sup> Shear slippage

<sup>2</sup> Arrest

<sup>3</sup> Crossing

به عبارت دیگر گسترش شکست هیدرولیکی در تماس با شکستگی طبیعی از این نقطه آغاز می شود (شکل ۲-۱۲ d) (Gu et al. 2011).

پس از عبور شکست هیدرولیکی از شکستگی طبیعی، به دلیل نرسیدن فشار سیال به حد فشار نرمال حاکم بر شکستگی طبیعی، احتمال این وجود دارد که شکستگی طبیعی همچنان بسته باقی بماند. (شکل ۲-۱۲ e) در این صورت شکستگی هیدرولیکی به صورت صفحه ای باقی مانده و اگر شکستگی مواد پرکننده نفوذپذیر را در خود جای داده باشد، میزان نشت<sup>۱</sup> سیال افزایش می یابد. اگر فشار سیال از فشار نرمال حاکم بر روی شکستگی طبیعی تجاوز نماید، شکستگی طبیعی باز شده و اجازه عبور سیال را می دهد (شکل ۲-۱۲ f) (Gu et al. 2011).

## ۲-۸ اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی

جفری<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۷ با استفاده از مدل دوبعدی DDM اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی را مطالعه کردند. آن ها توانستند لغزش برشی شکستگی هیدرولیکی را در حضور شکستگی طبیعی را بررسی کنند. آن ها از دو شکستگی موازی به عنوان شکستگی طبیعی استفاده کرده و نشان دادند که شکستگی هیدرولیکی می تواند در محل تقاطع با شکستگی طبیعی می تواند از آن عبور کند (Jeffrey et al. 1987).

ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ از مدل دوبعدی DDM با در نظر گرفتن تغییر شکل پذیری الاستیک و رفتار توأمان هیدرومکانیکی و در نظر گرفتن لغزش برشی، به بررسی اندرکنش بین شکستگی هیدرولیکی و طبیعی پرداختند. در این مدل مش بندی تنها بر روی شکستگی ها انجام شده است. به منظور کاهش عدم قطعیت نتایج و بالا بردن صحت آن ها، مش بندی با رشد ترک تغییر کرده و در هر گام به روز

<sup>1</sup> Leakoff

<sup>2</sup> Jeffrey

<sup>3</sup> Zhang

شده است (Zhang et al. 2007).

طالقانی در سال ۲۰۰۹ با استفاده از XFEM به بررسی این موضوع پرداخت و گسترش شکستگی بدون وابستگی به مش بندی مجدد را بررسی نمود. سه حالت ممکن برای اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی در نظر گرفته شده و مدلی جدید بر اساس نرخ انرژی آزاد شده به منظور گسترش ترک در کد XFEM گنجانده شده است. نتایج حاصل از مطالعه رفتار توامان هیدرولیکی نشان گر این بوده که برای رشد ترک در داخل شکستگی طبیعی با بررسی گرادیان فشار در نقطه تقاطع، فشار و انرژی بیشتری نیازمند است (Taleghani 2009). تاثیر جهت داری شکستگی طبیعی، محل تزریق، ویسکوزیته سیال و ناهمسانگردی تنش در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و نقش به سزای هریک از این پارامترها نشان داده شد؛ و مشخص شد که ناهمسانگردی تنش بر گسترش ترک نقش پررنگ تری را ایفا می کند (Taleghani 2009).

کشاورزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ اذعان داشتند که الگوی هندسه شکستگی هیدرولیکی به دلیل وجود شکستگی های طبیعی می تواند بسیار پیچیده باشد و در مسیر خود منحرف شود. به منظور مدل سازی خود از XFEM استفاده کرده و شرایط الاستیک و کرنش صفحه ای از جمله فرضیات این مساله بوده است. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که عواملی چون تنش تفاضلی افقی<sup>۱</sup>، فشار شبکه<sup>۲</sup> و جهت داری شکستگی های طبیعی می تواند انحراف شکستگی هیدرولیکی را کنترل کند. بدین صورت که افزایش فشار شبکه منجر به کاهش انحراف شکستگی هیدرولیکی و کاهش تنش تفاضلی، موجب افزایش میزان انحراف شبکه خواهد شد (Keshavarzi et al. 2012).

---

<sup>1</sup> In-situ differential horizontal stress

<sup>2</sup> Net pressure

دی پاتر<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ برای بررسی رفتار توامان هیدرومکانیکی اندرکنش بین شکستگی هیدرولیکی و طبیعی از روش اجزا مجزا استفاده کرد و نشان داد می‌توان از این روش به‌منظور بررسی شرایط حاکم بر رفتار آن‌ها در عملیات شکست هیدرولیکی چندمرحله‌ای نیز استفاده کرد. در این روش نتایج وابستگی زیادی به شکل و سائز المان‌ها داشته و به‌منظور کاهش حساسیت آن، باید راه‌کاری را اندیشید. در این مطالعه المان‌ها صلب و نقاط تماس آن‌ها الاستیک در نظر گرفته شد (De Pater & Beugelsdijk 2005).

بی هاید<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از برنامه سه‌بعدی اجزا مجزا (3DEC) به بررسی هرزروی سیال<sup>۳</sup> به هنگام عملیات شکست هیدرولیکی بر روند تغییرات بازشدگی شکستگی در حضور شکستگی‌های طبیعی پرداخت. در این مدل‌سازی از دودسته درزه استفاده شده و بر فرضیات زیر حاکم است (Bhide et al. 2012):

۱. گسترش ترک در داخل سنگ بکر اتفاق نمی‌افتد و شکستگی‌های طبیعی از سیال اشباع بوده و در اثر افزایش فشار ناشی از سیال باز می‌شوند.
۲. جریان سیال تک‌فازی است.
۳. سنگ مخزن غیرقابل نفوذ و هرزروی سیال تنها از طریق شکستگی‌ها امکان‌پذیر است.
۴. حوزه اطراف آن تنها قابلیت تغییر شکل‌پذیری را داراست.

نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش میزان هرزروی سیال، فشار شبکه افزایش یافته و در ادامه آن بازشدگی شکستگی‌های درگیر، بیشتر می‌شود (Bhide et al. 2012).

---

<sup>1</sup> De Pater

<sup>2</sup> Bhide

<sup>3</sup> Fluid loss

دیتورنی<sup>۱</sup> و لموس<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۶ جریان پروپانت<sup>۳</sup> را در عملیات شکست هیدرولیکی با استفاده از برنامه 3DEC شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه یک شکستگی متقاطع و عمود بر شکستگی هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و جریان سیال حاوی پروپانت از آن‌ها عبور می‌کند نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پروپانت به فرم دایره‌ای شکل در داخل شکستگی اول نفوذ کرده و وارد شکستگی طبیعی می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه حجم پروپانت تزریق شده اولیه و مشاهده شده در مرزبندی نیز اختلاف دودرصدی بین آن‌ها را نشان می‌دهد (C.Detournay & J.Lemos 2016).

دونز<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز از مدل 3DEC استفاده کرده و به تاثیر ناشی از تغییرات جهت‌داری شکستگی طبیعی نسبت به شکستگی هیدرولیکی نیز پرداختند. شیب شکستگی طبیعی به‌عنوان پارامتری اساسی از جهت‌داری شکستگی با در مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها بیان داشتند که با افزایش میزان زاویه شیب، جریان سیال تمایل بیشتری به باز کردن شکستگی‌های طبیعی را داراست (Donze et al. 2016).

ریاحی و دومنک در سال ۲۰۱۳ با استفاده از برنامه دو بعدی اجزا مجزا (UDEEC) و شبکه شکستگی‌های مجزا به بررسی پارامترهایی چون توزیع اندازه شکستگی، جهت‌داری تنش‌های برجا و نرخ تزریق بر فرآیند شکست هیدرولیکی پرداخت. در این مطالعه نشان داده شده است که موفقیت فرآیند شکست به بسیاری از شرایط موجود، مانند اندازه و جهت گیری تنش‌های برجا، خصوصیات شبکه شکستگی‌ها و خواص آن‌ها وابستگی دارد (Riahi & Damjanac 2013).

کاتساگا<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از نرم افزار 3DEC و شبکه شکستگی‌های مجزا به

---

<sup>1</sup> Detournay

<sup>2</sup> Lemos

<sup>3</sup> Proppant

<sup>4</sup> Donze

<sup>5</sup> Katsaga

مدل سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته طبیعی پرداختند. به این نتیجه رسیده‌اند که شبکه سه‌بعدی شکستگی می‌تواند یک بیان واقع‌گرایانه داشته اما به صورت فرم ساده‌ای از مدل توامان هیدرو مکانیکی باشد. خصوصیات شبکه شکستگی‌ها، نفوذ سیال را زمانی که تحت تاثیر فشار ناشی از تزریق سیال باقی‌مانده است، کنترل می‌کند. روش‌های مدل سازی با استفاده از ابزار شبکه شکستگی مجزا می‌تواند به امکانات جدیدی برای کارایی‌های شکست هیدرولیکی با یک طرح مطلوب و منطقی و با توجه به پیچیدگی‌های موجود زمین‌شناسی منجر شود. در این مطالعه با بررسی تاثیر اندازه شکستگی نشان دادند که وجود شکستگی‌های بزرگ می‌تواند باعث ایجاد محلی سازی جریان و اشکال نامتقارن حجم تحریک شده شود (Katsaga et al. 2015).

## ۲-۹ جمع‌بندی

فرآیند شکست هیدرولیکی را به زبانی ساده می‌توان ایجاد یک ترک در اثر کشش و رشد آن با استفاده از بالا بردن فشار سیال در سازند تعریف کرد. به‌طوری‌که ایجاد شکستگی در سازند می‌تواند موجب افزایش تولید در مخازن متعارف و حتی رهاسازی مواد هیدروکربوری در مخازن غیرمتعارف شود.

در این فصل ابتدا، با مرور تاریخچه شکست هیدرولیکی به بیان تعریف کلی از این فرآیند پرداخته شد. همان‌طور که بیان شد، شکست هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفتی است؛ که ابتدا در سال ۱۹۴۷ معرفی و از سال ۱۹۴۹ مورد استفاده صنعتی قرار گرفت. استفاده از این فناوری به سرعت مورد اقبال صنعتگران قرار گرفته، به گونه‌ای که در اواسط سال ۱۹۵۰ به ۳۰۰۰ چاه در یک ماه رسید. در ادامه ابتدا توضیحاتی درباره نحوه انجام عملیات شکست، مکانیسم شکست هیدرولیکی و توصیف فیزیکی شکستگی ارائه شد. نحوه شبیه‌سازی با روش‌های تحلیلی نظیر PKN، KGD و. مورد بحث قرار گرفته و بررسی شد؛ و در انتها، چگونگی مدل سازی عددی شکاف هیدرولیکی با روش‌های اجزای محدود، اجزای محدود توسعه یافته، اجزای مرزی، اجزای مجزا ارائه گردید.

نحوه تاثیر شکستگی‌های طبیعی بر شکست هیدرولیکی پرداخته شده است و توضیح داده شد که شکستگی‌های طبیعی و شکست هیدرولیکی براساس شرایط هندسه شکستگی‌های طبیعی، می‌توانند رفتار متفاوتی در تقابل با یکدیگر از خود نشان دهند. این شرایط در اثر عقب نشست سیال از داخل ترک و میدان تنشی که در نوک ترک ایجاد شده رخ دهد. در پایان نیز پیشینه مطالعات انجام شده در این زمینه توسط پژوهشگران متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. پیشینه پژوهشی که در زمینه تقابل شکست هیدرولیکی ذکر شده، نشان از اهمیت فراوان بررسی موضوع تاثیر شکستگی‌های طبیعی در فرآیند شکست هیدرولیکی است که می‌توان با تکیه بر این سوابق پژوهش، سوالات باقی مانده و مبهم در این زمینه را شناسایی و پاسخ داد.



## مدل سازی عددی و تحلیل پارامتری

### ۱-۳ پیشگفتار

پیشرفت و توسعه چشمگیر در عرصه علوم کامپیوتر موجب شده است که روشهای عددی در تمامی علوم مهندسی کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. استفاده از مدل‌سازی‌های عددی در تحلیل و طراحی ژئومکانیکی در دنیا نسبت به گذشته گسترش و مقبولیت زیادی بین مهندسان پیدا کرده است. مدل‌سازی‌های عددی به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی ژئومکانیکی مسایل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فصل پیش‌رو نحوه مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکافدار طبیعی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC با جزییات شرح داده شده است. یکی از راه‌های بررسی نقش هریک از عوامل مؤثر در ایجاد تغییر در روند فرآیند شکست، تحلیل حساسیت و انجام مطالعات پارامتری است. در ادامه پارامترهای هندسی شکستگی‌های طبیعی، نظیر جهت‌داری و اندازه شکستگی و تراکم شکستگی‌ها در بلوک، ارزشیابی شده و با استفاده از تحلیل حساسیت و مطالعه پارامتری مورد نقد و تفسیر قرار گرفته‌اند.

### ۲-۳ نرم‌افزار 3DEC<sup>۱</sup>

یک برنامه سه بعدی است که براساس روش اجزاء مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، بکار می‌رود. این نرم‌افزار قادر است که محیط‌های ناپیوسته، مانند توده سنگ‌های درزه دار را تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا استاتیکی شبیه سازی و تحلیل نماید. فرمول بندی و شکل گیری روش المان گسسته ی به کار رفته در 3DEC طی چند دهه پس از معرفی اولیه توسط کاندال<sup>۲</sup> (۱۹۷۱) بهبود یافته است. در سال ۱۹۸۸ کاندال و پرسنل شرکت آیتسکا<sup>۳</sup>، 3DEC را برای انجام محاسبات مهندسی، روی یک کامپیوتر شخصی سازگار کردند. این نرم‌افزار برای محاسبه ی سریع مدل های حاوی چندین هزار بلوک طراحی شده است (Itasca Consulting Group inc 2013).

<sup>۱</sup> 3D distinct element method code

<sup>۲</sup> Cundall

<sup>۳</sup> Itasca

برخی ویژگی‌های آن عبارت است از:

۱. توده سنگ به صورت مجموعه‌ای سه بعدی از بلوک‌های صلب یا تغییرشکل‌پذیر مدل می‌شود.

شود.

۲. ناپیوستگی‌ها به صورت تماس‌های مرزی مجزا میان این بلوک‌ها در نظر گرفته شده که رفتار

درزه‌ای برای این تماس‌ها از پیش تعریف می‌شود.

۳. الگوی درزه‌ای ناپایا و پایا می‌تواند بر پایه‌ی آماری تولید شود. یک ساختار درزه‌ای می‌تواند بطور

مستقیم از نقشه برداری زمین‌شناسی در داخل مدل ساخته شود.

۴. این نرم‌افزار یک الگوریتم حل صریح در زمان را بکار می‌گیرد، بطوری که هر دو تغییر شکل

بزرگ و چرخش را سازگار می‌کند و محاسبات حوزه‌ی زمان را مجاز می‌کند. ( Itasca )

(Consulting Group inc 2013)

### ۳-۳ شبکه شکستگی‌های مجزا<sup>۱</sup>

در کاربردهای مختلف مهندسی سنگ، شناخت دقیق سیستم‌های شکستگی الزامی است. به دلیل

وجود تعداد زیاد شکستگی‌ها و عدم قطعیت در خصوصیات هندسی آن‌ها، برداشت کامل ناپیوستگی‌ها و

مدل‌سازی سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ امکان‌پذیر نیست. بدین منظور مدل هندسی ناپیوستگی‌

های توده سنگ با رویکردی تصادفی و استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا تهیه می‌گردد (میرزایی نصیر

آباد حسین، ۱۳۹۱). این روش، ابتدا در سال ۱۹۸۰ در دو حالت دو بعدی و سه بعدی معرفی شد ( Jing )

(& Stephansson 2007).

این ابزار به منظور درک و تفسیر بهتر مفاهیم زیر توسعه یافته است:

---

<sup>1</sup> Discrete fracture network

۱. الگوی هندسی شکستگی‌ها

۲. بررسی تغییرات باز شدگی و آبگذری<sup>۱</sup> شکستگی‌های تکی

به منظور ایجاد شکستگی‌ها، از یک رویکرد تصادفی با استفاده از توابع توزیع احتمالاتی معرف خصوصیات هندسی شکستگی‌ها و شبیه ساز مونت کارلو استفاده می‌شود. شبکه شکستگی‌های مجزا، ابزاری است که این امکان را می‌دهد که در یک شبکه با شکستگی‌های متصل، فرآیند جریان سیال و انتقال آن نیز بررسی شود. از این رو می‌تواند ابزار مناسبی برای شبیه سازی شکستگی‌ها در شبیه‌سازی فرآیند شکست هیدرولیکی باشد (Jing & Stephansson 2007). علاوه بر این، دلایل دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند توجیه استفاده از شبکه شکستگی مجزا در شبیه سازی شکست هیدرولیکی را روشن کند.

ارتباط هیدرولیکی بین شکستگی‌ها بسیار غیر قابل پیش‌بینی بوده و تا حد زیادی به خصوصیات هندسی شکستگی‌ها بستگی دارد. شکستگی‌های زیادی ممکن است در نزدیکی صفحه شکست هیدرولیکی وجود داشته و عملاً هیچ گونه ارتباط هیدرولیکی با یکدیگر نداشته باشند؛ اما ممکن است شکستگی‌هایی که بسیار فاصله داشته، دارای ارتباط هیدرولیکی قوی باشند. شبکه شکستگی‌های مجزا توانایی این را داشته، نتایج بهتری را در مورد ارتباط هیدرولیکی بین شکستگی‌ها ارائه نماید (McClure & Horne 2013)

تغییرات تنش ناشی از تغییر شکل شکستگی‌ها تأثیر بسزایی در فرآیند تحریک هیدرولیکی دارد. این تغییرات بسیار ناهمگن بوده و ناشی از باز شدن شکستگی‌ها و لغزش آن‌ها است. تأثیر تمرکز تنش ایجاد شده ناشی از تغییر شکل شکستگی‌ها بر شکستگی‌های مجاور، وابسته به جهت‌داری شکستگی و مکان آن است. تمرکز تنش ایجاد شده می‌تواند با دقت بسیار بیشتر توسط شبکه شکستگی‌های مجزا بررسی شود (McClure & Horne 2013)

---

<sup>1</sup> Transmissivity

### ۳-۴ خصوصیات هندسی شکستگی‌های توده سنگ

خصوصیاتی که وضعیت هندسه ی یک شکستگی در توده سنگ درزه‌دار را توصیف می‌کند عبارت-  
اند از: جهت‌داری<sup>۱</sup>، فاصله‌داری<sup>۲</sup>، شکل، طول خط اثر<sup>۳</sup>، بازشدگی، چگالی و موقعیت مرکز شکستگی  
زاویه‌ی شیب و زاویه شیب جهت شکستگی، جهت‌داری آن شکستگی را مشخص می‌کند و برای  
تعیین تعداد دسته‌درزه‌های توده سنگ، تصاویر استریو گراف بکار می‌روند.  
فاصله‌داری، فاصله دو شکستگی مجاور از یک دسته‌درزه یکسان که جهت‌داری آن‌ها از تابع توزیع یکسانی  
تبعیت می‌کند. شکل ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های توده سنگ اساساً نامعلوم بوده و از شکل خاصی  
تبعیت نمی‌کنند، معمولاً برای ساده‌سازی در روند محاسبات، به شکل دایره‌ای، مستطیلی و چندضلعی  
فرض می‌شود. طول خط اثر هر شکستگی در رخنمون دیواره‌های سنگی به صورت یک خط مشاهده می-  
شود. این خط، خط اثر شکستگی و طول آن، طول خط اثر نامیده می‌شود (حسین میرزایی نصیر آباد،  
۱۳۹۱).

اندازه شکستگی‌ها عموماً نامعلوم و به طور مستقیم نمی‌توان با استفاده از برداشت سطحی و  
اطلاعات گمانه‌ها به دست آورد. عملاً فرض بر این است طول خط اثر و اندازه شکستگی‌ها از یک تابع  
توزیع یکسان تبعیت می‌کنند. فاصله دو صفحه شکستگی اصطلاحاً بازشدگی نام دارد. اندازه‌گیری  
بازشدگی مستقیماً در محل مشکل بوده و استفاده از روش فتوگرامتری دوبعدی فقط برای سطوح  
شکستگی فرسایش یافته قابلیت کاربرد دارد. چگالی شکستگی‌ها ( $P_{32}$ ) در یک دسته شکستگی، به صورت  
تعداد متوسط شکستگی‌ها در واحد حجم توده سنگ تعریف می‌گردد (حسین میرزایی نصیر آباد، ۱۳۹۱)

---

<sup>1</sup> Orientations

<sup>2</sup> Spacing

<sup>3</sup> Trace length

۳-۵ توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها  
 همانطور که پیش از این اشاره شد، خصوصیات هندسی شکستگی‌ها از توابع توزیع آماری تبعیت می‌کنند و ابتدایی ترین مرحله به منظور ساخت شبکه شکستگی مجزا، شناخت و تعریف این توابع توزیع مطابق با خصوصیات هندسی شکستگی‌هاست که در ادامه شرح داده می‌شود.

### ۳-۵-۱ تولید تصادفی جهت‌داری

جهت‌داری نیز معمولاً از تابع توزیع فیشر<sup>۱</sup> تبعیت می‌کند. اگر  $\theta$  زاویه انحراف از میانگین شیب و جهت شیب باشد، تابع توزیع فیشر به شکل زیر است:

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\ln[e^k - F(e^k - e^{-k})]}{k} \right\} \quad (۱-۳)$$

در این تابع توزیع  $k$  ثابت فیشر است که انحراف جهت‌داری از یک مقدار میانگین شیب و جهت شیب دسته درزه‌ها را نشان می‌دهد (Baghbanan & Jing 2007).

### ۳-۵-۲ تولید تصادفی اندازه شکستگی

طول خط اثر عموماً از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می‌کند که تابع توزیع آن به فرم زیر است:

$$n(l) = \alpha \cdot l^{-\alpha} \quad (۲-۳)$$

پارامتر  $\alpha$  چگالی شکستگی‌ها را بر اساس محدوده تغییرات اندازه شکستگی نشان می‌دهد. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر شود، شکستگی‌های بزرگ مقدار به نسبت شکستگی‌های کوچک بیشتر می‌شوند. به منظور استفاده از این تابع توزیع، حد بالا و پایین شکستگی از لحاظ اندازه اعمال خواهد شد. در این

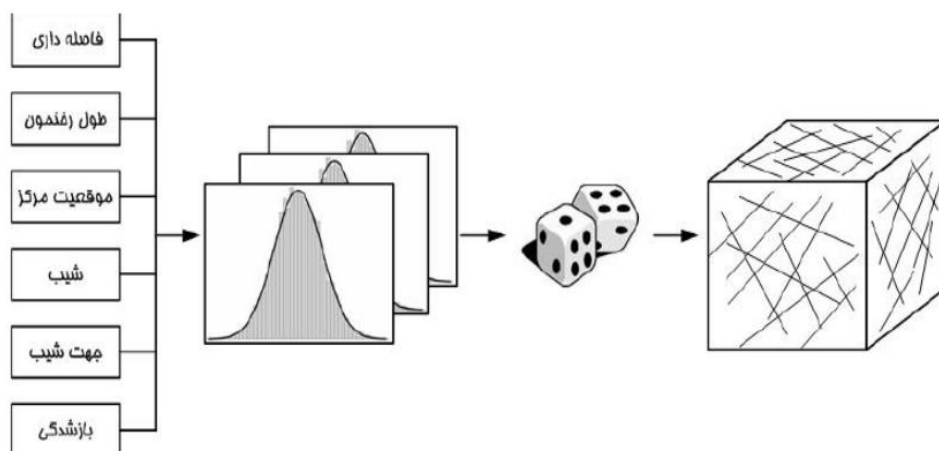
---

<sup>۱</sup> Fisher

تابع توزیع دو مقدار  $l_{min}$  عنوان کوچک ترین مقدار شکستگی و  $l_{max}$  به عنوان بزرگ ترین اندازه شکستگی تعریف می شود (Katsaga et al. 2015).

### ۳-۶ شبیه ساز مونت کارلو<sup>۱</sup>

شبیه سازی مونت کارلو یک فرایند تصادفی است که تصادفی بودن هندسه شبکه شکستگی ها را با نمایش خصوصیات شکستگی به صورت تصادفی که از توابع توزیع مخصوص به خود تبعیت می کنند، بیان می کند. شکل ۳-۱۱ فرایند شبیه سازی با استفاده از شبیه ساز مونت کارلو را نشان می دهد (حسین میرزایی نصیر آباد ۱۳۹۱).



شکل ۳-۱ تولید شبکه شکستگی های مجزا با شبیه ساز مونت کارلو (حسین میرزایی نصیر آباد ۱۳۹۱)

### ۳-۷ مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی

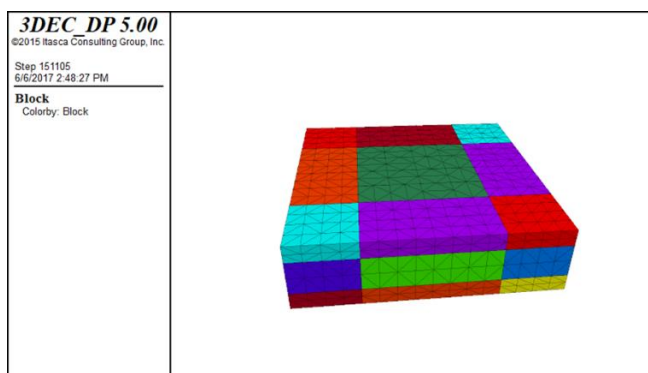
روش عددی مورد استفاده المان مجزا (DEM) و با استفاده از نرم افزار 3DEC خواهد بود که محیط را از بلوک هایی نفوذناپذیر که با استفاده از درزه ها و صفحات شکستگی از هم جدا شده اند، شبیه سازی می کند. فرض مدل این است که جریان سیال فقط می تواند در شکستگی رخ دهد. بلوک ها الاستیک و

<sup>1</sup> Monte Carlo

نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شوند. به دلیل محدودیت نرم‌افزار، در این مطالعه گسترش شکستگی‌های قبلی نادیده گرفته خواهد شد.

### ۳-۸ ابعاد مدل سازی

هندس مدل از یک هسته مرکزی که شبکه شکستگی مجزا در آن جا نمایی می‌شود و یک بلوک در برگیرنده تشکیل شده است. درواقع هسته مرکزی مدل، نماینده ناحیه مسدود شده توسط مسدود-کننده‌ها بوده و تزریق در مرکز آن انجام می‌شود. (شکل ۳-۲) نحوه تشکیل بلوک مرکزی به این صورت است که ابتدا بلوک بیرونی تشکیل شده سپس با استفاده از صفحاتی بلوک بیرونی برش خورده و بلوک مرکزی تشکیل شده است. به منظور عدم تغییر شرایط محیط و حذف تاثیرگذاری این درزه‌های مصنوعی، چسبندگی و مقاومت کششی این درزه‌ها بسیار بالا و برابر  $10^{30}$  پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۲ هندسه اولیه مدل

ابعاد هسته مرکزی به طول و عرض ۱۵۰ و عمق ۴۰ متر است، ابعاد بلوک بیرونی دو برابر این ابعاد است. انتخاب ابعاد بزرگ با توجه به نزدیک کردن شرایط به محیط انتخاب شده است. در مطالعات پیشین، از ابعاد بسیار بزرگ‌تری از این مقدار استفاده شده است اما با توجه به نبود رایانه‌های قوی، امکان بزرگ‌تر کردن این ابعاد وجود نداشته است.

### ۹-۳ تولید شکستگی‌ها

برای تولید شکستگی‌ها و به منظور نزدیک شدن هندسه شکستگی‌ها از شبکه شکستگی مجزا استفاده شده است. همانطور که پیش از این شرح داده شد، شبکه می‌تواند با استفاده از یک رویکرد تصادفی و بهره‌گیری از توابع توزیع احتمالاتی، شکستگی‌های نزدیک‌تر به شرایط واقعی زمین را تولید کند. به همین منظور از توابع احتمالاتی، مطابق با جدول ۱-۳ برای تولید شکستگی‌ها استفاده شده است:

جدول ۱-۳ توابع توزیع مورد استفاده در مدل

| پارامتر هندسی | تابع توزیع |
|---------------|------------|
| جهت‌داری      | فیشر       |
| طول رخنمون    | نمایی منفی |
| مرکز شکستگی   | یکنواخت    |

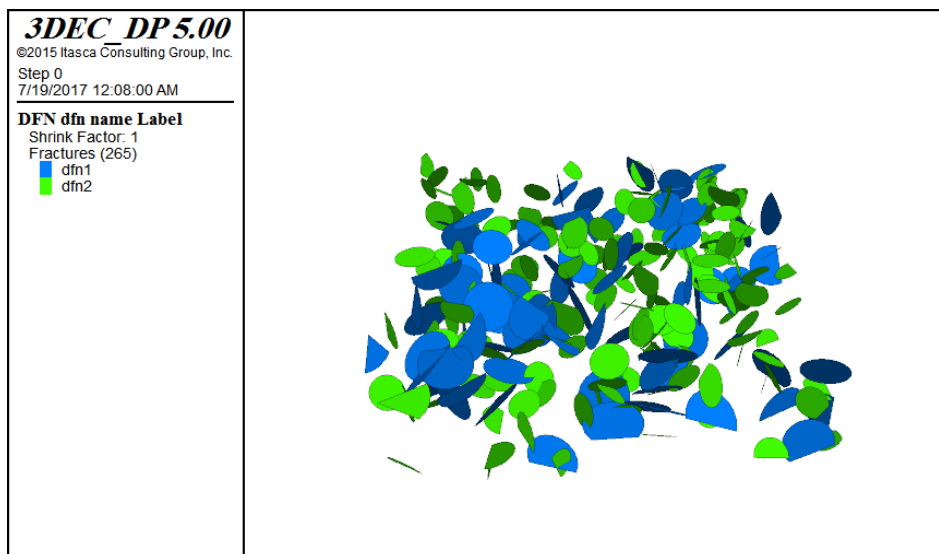
پارامترهای آماری که شبکه شکستگی‌های مجزا را را تعریف می‌کند شامل تابع توزیع اندازه شکستگی، جهت‌داری و چگالی است. که هریک در بخش‌های قبلی تشریح شده‌اند.

مدل شامل دو دسته درزه بوده که هریک با یک نوع جهت‌داری ثابت شده‌اند. برای تعیین جهت-داری شکستگی‌ها معمولاً از تابع توزیع فیشر استفاده می‌شود. هر یک از دسته درزه‌ها با زاویه شیب ۷۵ درجه و جهت شیب ۴۵ و ۱۳۵ درجه تعریف شده‌اند. (مطابق با مطالعه (Katsaga et al. 2015)). زاویه شکستگی‌ها در مقاومت نهایی توده سنگ تاثیر بسزایی دارد. مقاومت توده سنگ درزه‌دار در برابر بارگذاری

در نزدیکی زاویه شیب ۴۵ درجه و ۱۳۵ درجه درزه، دارای مقداری کمینه است. (Hudson & Harrison 2000) به دلیل این که توده سنگ آماده تغییر در اثر تزریق سیال پرفشار باشد، زوایای دسته درزه ها ۴۵ و ۱۳۵ درجه انتخاب می شود.

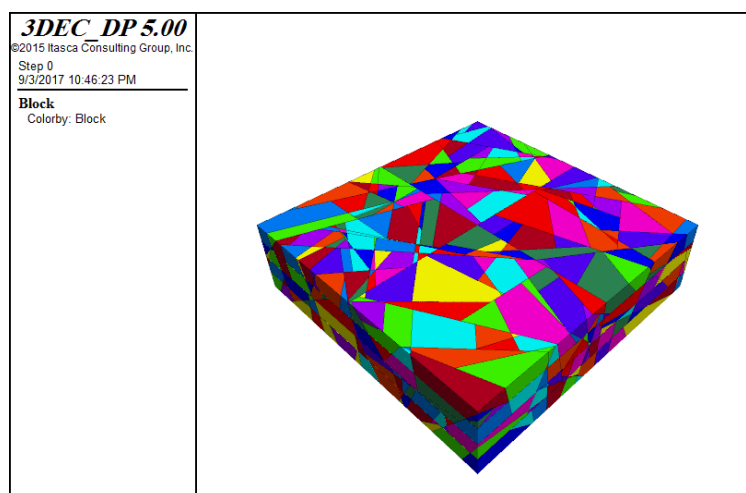
توزیع اندازه شکستگی از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می کند. به منظور استفاده از این تابع، می بایست پارامترهای  $\alpha$ ، طول بیشینه و کمینه شکستگی ها تعریف شوند. پارامتر  $\alpha$  براساس شرایط موجود ناحیه تعیین می شود. عموماً مقادیر این پارامتر از مقدار ۲ بیشتر است. فرض شده که شکستگی های قبلی در حال حاضر باز و هادی بوده و یک باز شدگی یکنواخت برای هر دسته درزه در نظر گرفته شده است. در این مطالعه سه بعدی، P32 به عنوان معیار سنجش تراکم شکستگی استفاده می شود. همانطور که قبلاً هم تعریف شد، P32 به عنوان بخشی از سطحی بوده که بر حجم دامنه مورد بررسی تقسیم شده است. توزیع پواسون موجب تولید شکستگی هایی کوچک مقیاسی می شود که بین فضای دو شکستگی قرار می گیرند و ارتباط بین شکستگی ها رو مختل می کند؛ از این رو از تابع توزیع یکنواخت برای تعیین مرکز شکستگی ها استفاده شده است. (Katsaga et al. 2015) با اینکه از تابع توزیع یکنواخت استفاده می شود؛ با این وجود شکستگی های کوچک مقیاس دیده می شود. ازین رو با ایجاد یک فیلتر در شکستگی ها مطابق با دستور نرم افزار، این شکستگی ها حذف می شوند تا یک شبکه هادی ایجاد شود.

شکل شکستگی ها نیز به صورت دیسکی مطابق با دستور نرم افزار در نظر گرفته می شود. شبکه شکستگی مجزا توصیف شده مطابق با شکل ۳-۳ تولید می شود.



شکل ۳-۳ تولید الگوی شکستگی‌های مدل با استفاده از شبکه شکستگی مجزا

پس از ایجاد شبکه شکستگی‌های مجزا، بلوک تعریف شده مطابق با الگو این شبکه برش خورده و تولید شکستگی می‌نماید. شکل ۴-۳ شکستگی‌های تولیدی بلوک تعریف شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳ شکستگی تولید شده در بلوک

### ۳-۱۰ تعیین خواص سنگ بکر و شکستگی‌ها

مرحله بعد در مدل‌سازی عددی، اختصاص خواص سنگ بکر و شکستگی‌هاست. به منظور تخصیص خواص سنگ بکر و شکستگی‌ها، ابتدا نیازمند است تا مدل رفتاری<sup>۱</sup> سنگ و شکستگی‌ها از پیش تعیین شود. از آنجایی که رفتار سنگ بکر و عملکرد آن تاثیر چندانی نداشته و حائز اهمیت نبوده و تنها خواص و شرایط هندسی شکستگی‌ها در ارتباط با موضوع پژوهش تاثیرگذار بوده، مورد ارزشیابی قرار می‌گیرند. شرایط سنگ مخزن الاستیک در نظر گرفته شده و پارامترهای ورودی، مطابق با آن در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری الاستیک ساده‌ترین حالت برای توصیف رفتار سنگ است. این مدل برای مصالح همگن با رفتاری خطی که بیان‌گر شرایط تنش-کرنش است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع رفتار مشخصه سنگ، کرنش مصالح با افزایش تنش به صورت خطی مطابق با قانون هوک تغییر می‌کند (Itasca Consulting Group inc 2013).

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G \Delta\varepsilon_{ij} + \alpha_2 \Delta\varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (3-3)$$

جایی که:

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G \quad (3-4)$$

K مدول بالک، G مدول برشی بر حسب GPa است.

مدل رفتاری اصلی که 3DEC برای شکستگی‌های تعریف می‌کند، مدل رفتاری کلمب-اسلیپ<sup>۲</sup> است. مدل‌های ساختاری درزه برای بیان واکنش واقعی درزه‌های سنگی طراحی شده‌اند. مدل کلمب-اسلیپ برای بلوک‌های نزدیک به هم و دارای تماس سطحی در نظر گرفته شده است. این مدل، رفتار خطی حد تسلیم و سختی درزه را نشان می‌دهد و بر اساس خواص الاستیک سختی، اصطکاک، چسبندگی،

<sup>1</sup> Constitutive Model

<sup>2</sup> Coulomb-Slip

مقاومت کششی و ویژگی های اتساع معمول در درزه های سنگی است. این مدل ضعیف شدگی ناشی از جابه جایی درزه را با کم شدن چسبندگی و مقاومت کششی در آغاز شکست برشی و کششی شبیه سازی می کند. بر اساس این مدل ساختاری برای یک درزه بکر<sup>۱</sup> بدون جابه جایی از قبل، نیروی کششی نرمال وارد بر سطوح تماس<sup>۲</sup> برابر است با (Itasca Consulting Group inc 2013) :

$$T_{\max} = -TA_c \quad (۵-۳)$$

جایی که T برابر با مقاومت کششی درزه و بر حسب Mpa است. حداکثر مقدار نیروی برشی اجازه داده شده در مدل نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$F_{\max}^s = cA_c + F^n \tan(\phi) \quad (۶-۳)$$

c و  $\phi$  به ترتیب، چسبندگی و زاویه اصطکاک و  $F^n$  نیروی نرمال وارد بر درزه است.

زمانی که شکست برشی و کششی رخ می دهد، مقاومت کششی و چسبندگی کاهش یافته و صفر شده و شرایط نیرو را مطابق با روابط زیر بازسازی می کند (Itasca Consulting Group inc 2013):

برای شکست کششی:

$$F^n < T_{\max}, \rightarrow F^n = 0, F_s^i = 0 \quad (۷-۳)$$

برای شکست برشی:

$$F^s > F_{\max}^s, \rightarrow F_i^s = F_i^s \frac{F_{\max}^s}{F_s} \quad (۸-۳)$$

---

<sup>1</sup> Intact joint

<sup>2</sup> Sub-contact

جایی که  $F_s$  برابر است با:

$$F^s = (F_i^s F_i^s)^{1/2} \quad (9-3)$$

خواص ورودی مدل مطابق با جداول ۲-۳، ۳-۳ و ۴-۳ تعریف می‌شود.

جدول ۲-۳ خواص هندسی دسته درزه اول

| دسته درزه اول |               |                        |                        |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|
| جهت داری      | ثابت فیشر (k) | شیب (درجه)             | جهت شیب (درجه)         |
|               | ۵             | ۷۵                     | ۴۵                     |
| اندازه شکستگی | $\alpha$      | کوچک ترین اندازه (متر) | بزرگ ترین اندازه (متر) |
|               | ۴             | ۳۰                     | ۴۰                     |
| $P_{32}=۰.۰۳$ |               |                        |                        |

جدول ۳-۳ خواص هندسی دسته درزه دوم

| دسته درزه دوم |               |                        |                        |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|
| جهت داری      | ثابت فیشر (k) | شیب (درجه)             | جهت شیب (درجه)         |
|               | ۵             | ۷۵                     | ۱۳۵                    |
| اندازه شکستگی | $\alpha$      | کوچک ترین اندازه (متر) | بزرگ ترین اندازه (متر) |
|               | ۴             | ۲۰                     | ۳۰                     |
| $P_{32}=۰.۰۳$ |               |                        |                        |

جدول ۳-۴ خواص سنگر بکر و شکستگی‌ها

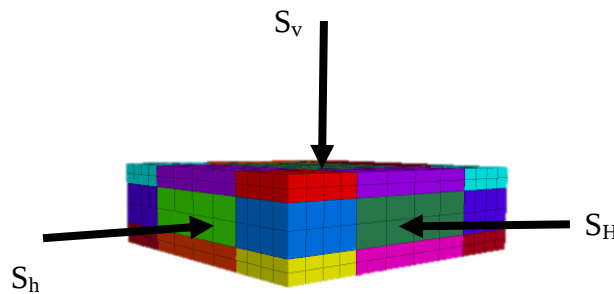
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ (چگالی)<br>$E = 20 \text{ Gpa}$ (مدول یانگ)<br>$\nu = 0.2$ (نسبت پواسون)                                                                                                                                                                                                           | سنگ بکر          |
| $K_n = 2e10 \text{ pa/m}$ (سختی نرمال)<br>$K_s = 2e10 \text{ pa/m}$ (سختی برشی)<br>$C = 0 \text{ Mpa}$ (چسبندگی)<br>$\Phi = 20 \text{ deg}$ (زاویه اصطکاک)<br>$a_0 = 10^{-4} \text{ m}$ (بازشدگی اولیه)<br>$a_{res} = 10^{-4} \text{ m}$ (بازشدگی باقی مانده)<br>$a_{max} = 10^{-3} \text{ m}$ (بازشدگی بیشینه) | شکستگی‌های طبیعی |

### ۳-۱۱ شرایط مرزی<sup>۱</sup>

شرایط مرزی در یک مدل عددی عبارت است از متغیرهای میدانی که در مرز مدل تعریف می‌شود. این مرزها می‌تواند مرز سازه‌ای یا مرز مصنوعی باشند. مرزهای مدل به صورت پیش فرض نرم افزار سطوحی فاقد تنش و محدود نشده هستند و نیاز به ایجاد محدودیت و تعیین شرایط مرزی در مرزهای مدل وجود دارد. شرایط مرزی که در مدل عددی تعیین می‌شود در واقع شرایط از پیش تعیین شده‌ای بوده که تا پایان محاسبات بدون تغییر باقی می‌ماند. به هنگام اعمال بارگذاری مشاهده می‌شود که مرزهای مدل جا به جا شده و امکان ادامه محاسبات وجود ندارد. به همین علت مرزهای دیواره‌های مدل با استفاده از تکیه-

<sup>1</sup> Boundary conditions

گاه‌های غلطکی و کف مدل با صفر درجه آزادی بسته می‌شود. اعمال این شرایط موجب می‌شود نواحی که به دور از ناحیه اعمال فشار قرار دارند، بدون جابه‌جایی غیر واقعی قرار گرفته و ادامه محاسبات اتفاق بیافتد. بارگذاری مدل در راستای محورهای مختصات صورت می‌پذیرد. بدین شکل که تنش افقی حداکثر ( $S_H$ ) در راستای محور  $X$  و تنش افقی حداقل ( $S_h$ ) در راستای محور  $Y$  اعمال می‌شود (شکل ۳-۵). تنش معادل با روباره نیز ( $S_v$ ) در راستای محور  $Z$  تعریف شده و در نهایت فشار منفذی بر مدل افزوده می‌شود.



شکل ۳-۵ نمایش وضعیت تنش‌های برجا

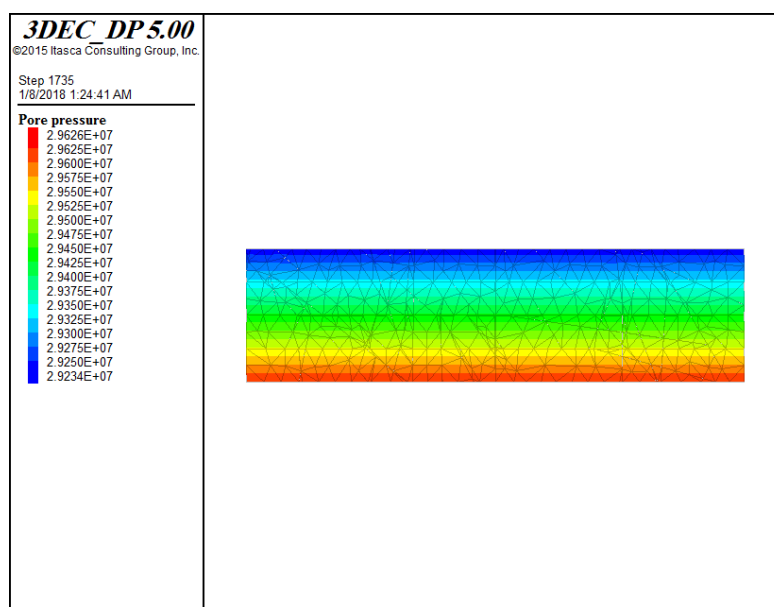
تنش قائم یا تنش معادل با روباره، به تناسب عمق محاسبه می‌شود. و مقدار آن برابر با حاصل ضرب چگالی سنگ و شتاب گرانش زمین در عمق مورد نظر تعیین می‌شود. چگالی سنگ برابر  $2600 \text{ kg/m}^3$  و شتاب گرانش زمین برابر  $9.81 \text{ m}^2/\text{sec}$  است. به دلیل اینکه عمده مخازن نفتی ایران در اعماق زیاد قرار دارند، مرکز مدل برابر با عمق ۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. همانطور که در بخش‌های ابتدایی نیز توضیح داده شد، هندسه شکستگی هیدرولیکی تحت تاثیر شرایط تنش قرار می‌گیرد. در صورتی که بزرگ‌ترین مقدار تنش منطقه تنش قائم باشد، سیال تمایل دارد در راستای تنش قائم حرکت کند. ازین رو به منظور اینکه سیال بتواند تعداد بیشتری از شکستگی‌های طبیعی را در نتیجه مدل‌سازی به منظور ارزشیابی بهتر دخیل کند، مقادیر تنش قائم و تنش افقی حداکثر برابر در نظر گرفته شده و تنش افقی حداقل نیمی از

این مقدار است. با این اوصاف، مقادیر تنش در مرکز مدل برابر با مقادیر جدول ۳-۵ است.

جدول ۳-۵ مقادیر تنش در عمق ۳۰۰۰ متری (مرکز مدل)

| تنش افقی حداکثر (Mpa) | تنش افقی حداقل (Mpa) | تنش قائم (Mpa) |
|-----------------------|----------------------|----------------|
| ۷۶.۴۴                 | ۳۸.۲۲                | ۷۶.۴۴          |

فشار منفذی نیز مانند تنش قائم از طریق ضرب چگالی سیال در عمق مورد نظر و شتاب گرانش زمین بدست می‌آید. چگالی سیال برابر با  $1000 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. فشار منفذی در عمق ۳۰۰۰ متری برابر ۲۹.۴۳ مگا پاسکال تعیین می‌شود. با توجه به عمق‌های متفاوت این مقدار تغییر می‌کند. شکل ۳-۶ توزیع فشار در اعماق متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ توزیع فشار منفذی در مدل

### ۳-۱۲ تزریق<sup>۱</sup>

نرخ تزریق  $0.06 \text{ m}^3/\text{sec}$  یا  $60 \text{ kg/s}$  به کار گرفته شده است. این نرخ تقریباً برابر با  $21 \text{ bbbl}$  (گالن بر دقیقه) برابر است. سیال مورد استفاده پایه آبی خواهد بود. تزریق از مرکز بلوک داخلی آغاز شده و با نرخ ثابت انجام می پذیرد و از پروپانت استفاده نشده است. به منظور شبیه سازی آغاز تزریق، در مرکز مدل نقطه ای به عنوان مبدا آغاز تزریق تعیین شده است. از این نقطه برداری هایی هادی برای جهت گیری درست سیال تعریف شده که همانند شرایط واقعی، سیال در همه جهت هایی که اجازه ورود دارد، امکان انتقال و تغییر فشار را دارا باشد.

### ۳-۱۳ اعتبارسنجی

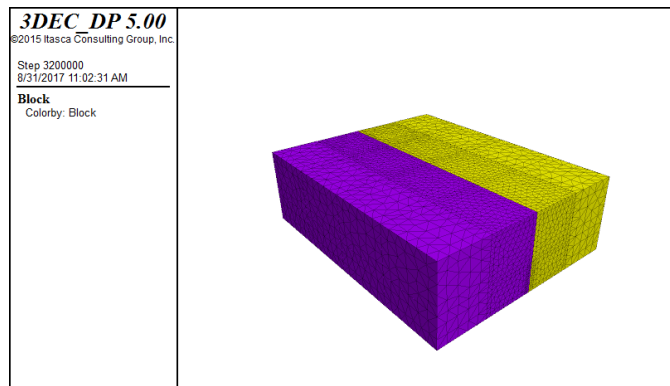
مدل سازی عددی در کنار اعتبارسنجی آن مفهوم پیدا می کند، روش های متفاوتی به منظور اعتبارسنجی مدل های عددی وجود دارد که می توان استفاده از روابط تحلیلی و مدل آزمایشگاهی اشاره کرد. در این مطالعه به منظور اعتبار سنجی مدل عددی از مدل تحلیلی PKN استفاده می شود. همانطور که در فصل دوم اشاره شد، این روش شرایط کرنش صفحه ای را در نظر گرفته و برای شکستگی هایی که طول آن نسبت به ارتفاع آن بسیار بزرگ تر است، نتایج بهتری دارد. به همین منظور از دستورالعمل نرم افزار 3DEC به منظور مقایسه با روش PKN استفاده شده که پیش از این نیز مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است (Damjanac & Cundall 2016) (Donze et al. 2016).

اعتبارسنجی مدل مورد استفاده در این پژوهش به دلیل هندسه پیچیده آن کار دشواری است؛ از این رو پیش از شروع استفاده از مدل مربوطه مدلی ساده ساخته شده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفته تا قابلیت نرم افزار در فرآیند تزریق سنجیده شود. در صورت تایید صحت کارایی نرم افزار ادامه کار انجام خواهد شد. روش کار بدین شکل است که برای اعتبارسنجی، بلوکی مطابق با هندسه روش PKN مانند

---

<sup>1</sup> Injection

شکل ۷-۳ تعریف می‌شود. صفحاتی در داخل بلوک به عنوان محدود کننده ارتفاع شکستگی در داخل آن تعبیه شده است تا بتواند شرایط ارتفاع ثابت بودن ترک را اعمال کند. به دلیل تقارنی که در هندسه مدل وجود دارد، نیمی از ابعاد مدل اصلی استفاده شده است.



شکل ۷-۳ هندسه مدل PKN

خواص استفاده شده در این بخش به منظور همگام سازی شرایط مدل تحلیلی و عددی ساده سازی تر شده و کمی پایین تر در نظر گرفته شده اند. خواص ورودی مدل مطابق جداول زیر تعریف شده است:

جدول ۶-۳ خواص سنگ بکر

| $E$ (مدول ینگ) Gpa | $\nu$ (نسبت پواسون) | $\rho$ (چگالی) $kg/m^3$ |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| ۱۰                 | ۰.۲                 | ۲۶۰۰                    |

جدول ۷-۳ خواص شکستگی

| $a_{max}$         | $a_{res}$             | $a_0$            | $J_{ten}$      | $\phi$          | $C$              | $K_s$        | $K_n$         |
|-------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|--------------|---------------|
| بازشدگی<br>بیشینه | بازشدگی<br>باقی مانده | بازشدگی<br>اولیه | مقاومت<br>کششی | زاویه<br>اصطکاک | چسبندگی<br>(Mpa) | سختی<br>برشی | سختی<br>نرمال |
| (m)               | (m)                   | (m)              | (Mpa)          | (deg)           |                  | (Pa/m)       | (Pa/m)        |
| 1e-2              | 0.5e-4                | 0.5e-4           | 0              | 20              | 0                | 1e10         | 1e10          |

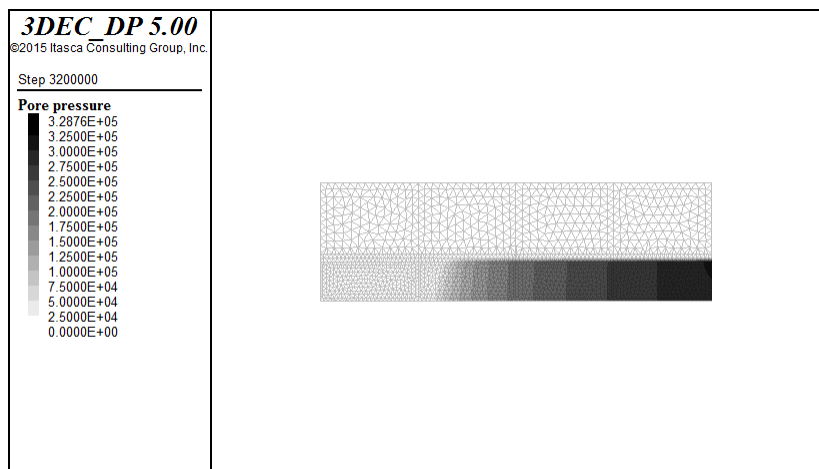
شرایط تنش در این مدل به صورت  $S_v = S_H = 0.5 S_h$  اعمال شده و سیال با نرخ ثابت  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$  و گرانی 1cp تزریق خواهد شد.

تزریق سیال با استفاده از روش عددی نرم افزار 3DEC و هم با کمک روش PKN انجام می شود. نتایج حاصل از دو روش ذکر شده، آزموده شده و با یکدیگر مقایسه می شود. نتایج حاصل از روش های عددی 3DEC و تحلیلی PKN و مقایسه آنها در شکل های ۳-۸، ۳-۹ و ۳-۱۰ آورده شده است.

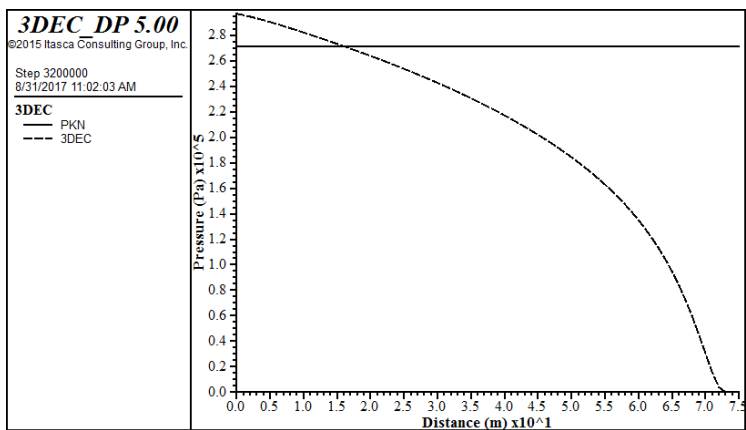
شکل ۳-۸ تغییرات فشار در داخل شکستگی هیدرولیکی را در مدل نشان می دهد. ابتدای مسیر فشار بیشتری اعمال می شود. در ادامه فرآیند با فاصله گرفتن از محل تزریق، از مقدار اولیه کاسته می شود.

شکل ۳-۹ مقایسه ای بین فشار شبکه بدست آمده از دو روش PKN و مدل عددی نرم افزار 3DEC انجام شده است. PKN مقدار فشار منفذی را ثابت نشان می دهد که یکی از فرضیه های مدل است. نتایج مربوط به نرم افزار 3DEC یک روند کاهشی را نشان می دهد. بدین صورت که با یک فشار بالا در نزدیکی نقطه تزریق شروع و در نهایت در انتهای مسیر به صفر می رسد. فشار بیشینه ی ابتدای نمودار مطابق با فشار سر چاه است. فشار بدست آمده از نرم افزار 3DEC و روش تحلیلی PKN در بررسی فشار بیشینه در حوالی نقطه تزریق که نماینده فشار سر چاه است، از تقریب نسبتاً مناسبی برخوردار است.

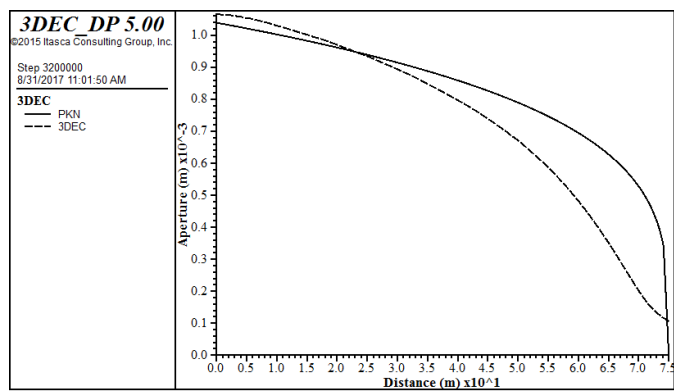
مقادیر بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در دو مدل PKN و عددی در ابتدای مسیر تناسب خوبی داشته و در نقاطی که از محل تزریق فاصله گرفته، دارای اختلاف بیشتری شده و سرانجام به صفر می رسند. دلیل این افزایش اختلاف می تواند بالا رفتن مقدار نیروی غیر متعادل کننده در 3DEC دانست که موجب اختلاف در مقادیر شده است.



شکل ۸-۳ نمایش تغییرات فشار (پاسکال) در داخل شکستگی هیدرولیکی



شکل ۹-۳ مقایسه فشار حاصله در فرآیند شکست در دو روش PKN و عددی



شکل ۱۰-۳ مقایسه تغییرات بازشدگی در دو روش PKN و عددی

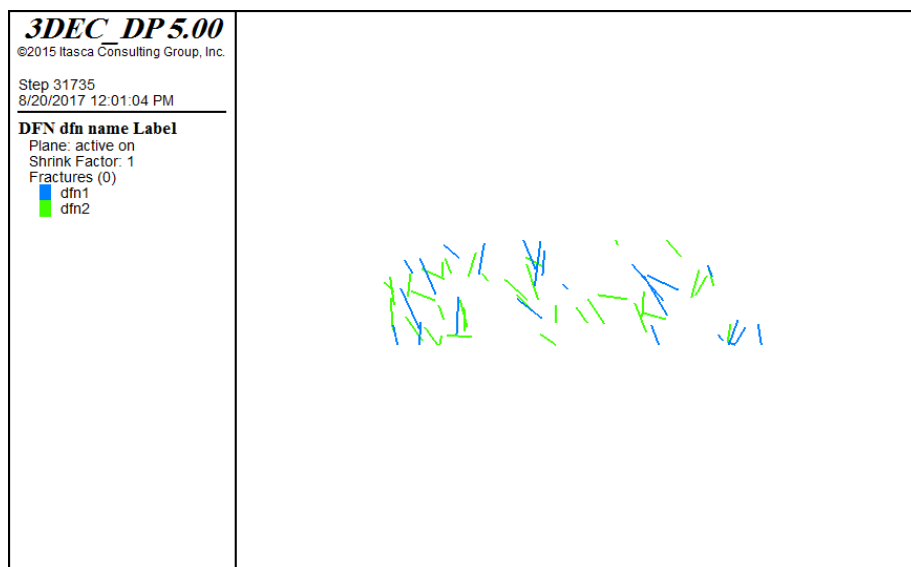
هرچند این اختلاف دیده می‌شود؛ اما با توجه به ساده سازی‌های موجود در روش تحلیلی PKN و فرضیاتی که در نظر گرفته می‌شود و شرایط خود نرم‌افزار، اختلاف این نتایج قابل توجیه است. این اعتبار سنجی جهت بررسی صحت توابع برنامه نویسی شده به منظور انجام شکست هیدرولیکی انجام شده است. با توجه به نزدیکی تقریبی نتایج دو نوع مدل سازی عددی و تحلیلی، نشان از صحت قابل قبول این توابع به منظور مدل سازی شکست هیدرولیکی خواهد بود.

### ۳-۱۴ نتایج حاصل از مدل سازی

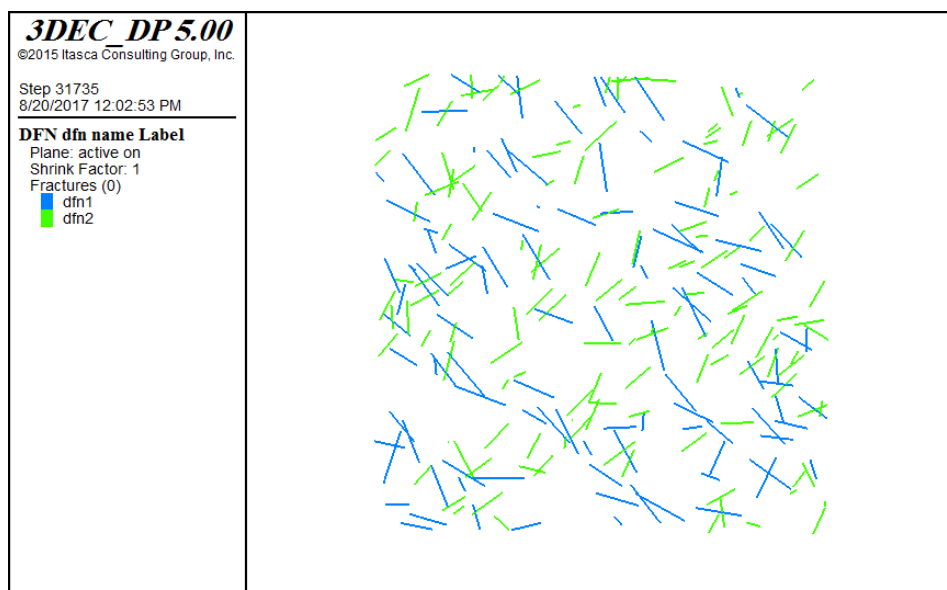
در بخش‌های قبلی به نحوه مدل سازی و پارامترهای ورودی مدل پرداخته و الزامات مدل سازی صحیح، بیان شد. همانطور که بیان گردید، مدل رفتاری سنگ بکر الاستیک و مدل رفتاری شکستگی‌ها از کلوب-اسلیپ تبعیت می‌کند.

شبکه شکستگی‌ها یک فرآیند تصادفی بوده که مطابق با توابع توزیع تعریف شده برای هریک از پارامترها، خواص هندسی شکستگی را تعریف می‌کند. با توجه به این قضیه، احتمال وجود شکستگی طبیعی و قرار گرفتن در مسیر شکستگی هیدرولیکی به نسبت مساوی برای همه نقاط موجود در بلوک تقسیم می‌شود. بررسی نحوه قرارگیری شکستگی‌ها پیش از فرآیند تزریق، شایان اهمیت است. به منظور بررسی تقاطع‌های احتمالی با شکستگی‌های طبیعی در بلوک، مقاطعی عمودی و افقی عبوری از محل تزریق واقع در مرکز بلوک تعریف شده است. این مقاطع هندسه شکستگی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها را در فضای مورد مطالعه، نشان می‌دهند. این مقاطع در شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ نمایش داده شده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها نیز مشاهده می‌شود، شکستگی‌های زیادی در مسیر احتمالی شکست هیدرولیکی برخورد داشته و ایجاد تقاطع می‌نمایند. هریک از این شکستگی‌ها می‌توانند با قرار گرفتن در مسیر جریان ناشی از تزریق، در فرآیند شکست هیدرولیکی، یک درهم‌کنش ایجاد کنند. در نهایت با فشار ایجاد شده در شبکه، تاثیر خود را بروز دهند. در این مقاطع، نقطه‌ای که قرار است تزریق از آن‌جا آغاز شود، مشخص

شده است. تعدادی درزه در نزدیکی این نقطه قرار گرفته و نمایانگر آن است که پس از آن که تزریق آغاز شد، با عبور جریان از درون این درزه‌ها تاثیر زیادی را در نتایج ایجاد خواهند کرد.

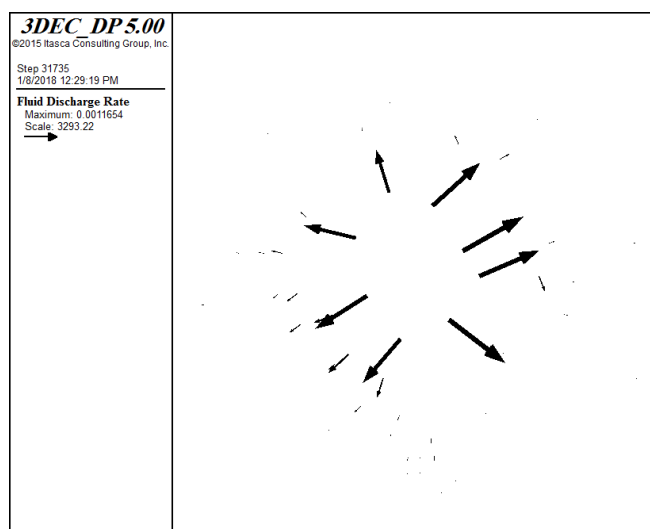


شکل ۱۱-۳ نمایش شکستگی‌های طبیعی بر صفحه قائم عبوری از محل تزریق



شکل ۱۲-۳ نمایش شکستگی‌های طبیعی بر صفحه افقی گذرنده از محل تزریق

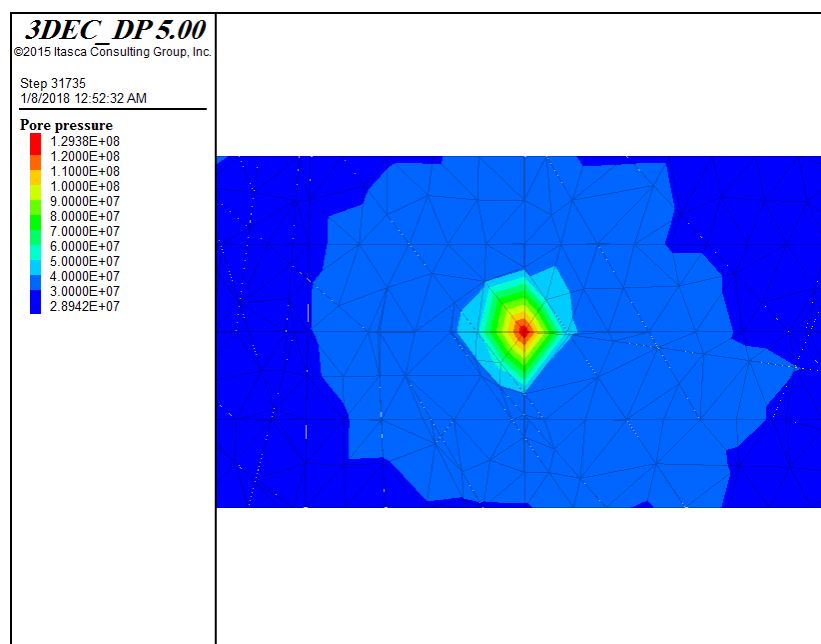
با علم بر این که در مدل ساخته شده با وجود تقاطع‌هایی که در محل تزریق وجود دارد و در ادامه مسیر هم وجود خواهد داشت، فرآیند تزریق انجام شده است. سیال با توجه به مسیرهایی که ناشی از حضور شکستگی‌ها است، مسیر خود را انتخاب کرده و پیشروی می‌کند. این پیشروی تا جایی که به بن بست خورده یا انرژی لازم برای جابه‌جایی را از دست دهد، ادامه پیدا کرده است. شکل زیر خطوط جریان سیال را پس از تزریق از نقطه تعیین شده نشان می‌دهد.



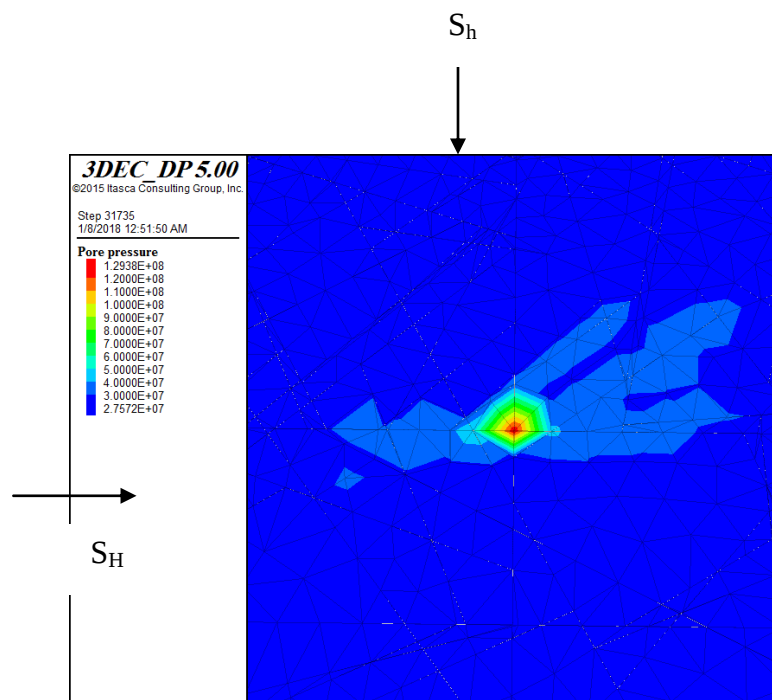
شکل ۳-۱۳ نمایش خطوط جریان سیال تزریق شده

براساس تئوری مساله پس از این که فرآیند تزریق آغاز شد، اگر فشار ایجاد شده از مقدار تنش افقی حداقل بیشتر شود، شکستگی هیدرولیکی در سنگ القا می‌شود. مقدار تنش افقی حداقل در محل تزریق که در عمق ۳۰۰۰ متری قرار دارد، برابر با مقدار ۳۸ مگا پاسکال است. ازین رو حد آستانه فشار برای آغاز فرآیند شکست در سازند در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳-۱۴ تغییرات فشار را پس از تزریق نشان می‌دهد. همانطور که قابل ملاحظه است، بیشینه فشار در صفحه شکست، به مرز ۱۲۹ مگا پاسکال رسیده و با توجه به گذر از مقدار ۳۸ مگا پاسکال، فرآیند شکست منطبق با تئوری مساله انجام پذیرفته است. از طرفی با توجه به جهات تنش‌های اصلی، شکستگی تمایل دارد در جهت کمترین مقاومت حرکت کند. به همین

علت عمود بر تنش افقی حداقل و در راستای تنش افقی حداکثر مسیر عبوری خود را انتخاب می‌کند. تغییرات فشار در صفحه افقی گذرنده از محل تزریق و با توجه به جهات تنش‌های افقی نشان داده شده (شکل ۳-۱۵)، مسیر شکستگی هیدرولیکی را در جهت کمترین مقاومت به روشنی بیان می‌کند. از موارد دیگری که در شکل ۳-۱۵ می‌توان اشاره کرد، انحراف جریان از خط سیر مستقیم خود است که دلالت بر تاثیر وجود شکستگی‌های طبیعی داشته و وجود این شکستگی‌ها موجب هدایت جریان در آن‌ها شده است. به گونه‌ای که با افزایش زمان تزریق شکستگی‌های بیشتری درگیر شده و فشار شبکه برای عبور در مراحل بعدی را کاهش می‌دهد. انرژی مورد نیاز برای ادامه عملیات شکست و باز کردن شکستگی‌های طبیعی کاهش یافته و موجب افت چشمگیر فشار می‌شود. این کاهش فشار در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی پیش بینی شده مطابق با رژیم تنش نیز در شکل ۳-۱۵ مشهود است.



شکل ۳-۱۴ تغییرات فشار در اثر تزریق در صفحه احتمالی شکست هیدرولیکی

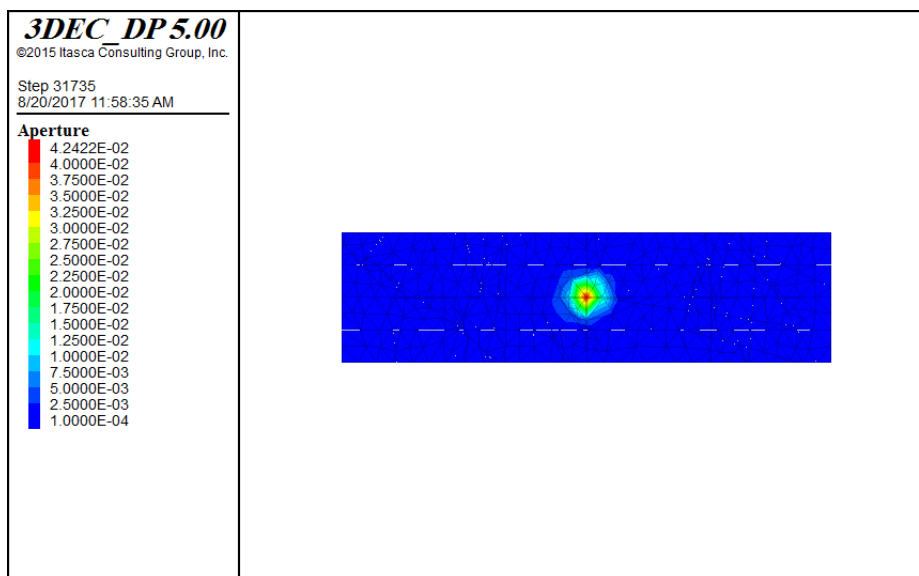


شکل ۳-۱۵ تغییرات فشار در برش افقی از بلوک مرکزی در محل تزریق

در تحلیل و تفسیر فرآیند شکست هیدرولیکی، از جمله پارامترهای اساسی مورد توجه، بازشدگی شکستگی است که نقش بسزایی در افزایش تولید خواهد داشت. شکل ۳-۱۶ تغییرات بازشدگی شبکه درزه‌های مدل در مسیر احتمالی شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در نزدیکی محل اعمال تزریق، ابتدای درزه‌ها از بازشدگی بیشتری برخوردار بوده و با فاصله گرفتن از محل تزریق به واسطه کاهش و افت فشار هیدرولیکی از بازشدگی درزه‌ها کاسته می‌شود. جهت یافتگی بازشدگی درزه‌ها نیز در تعامل با شرایط تنش‌های برجای حاکم بر مدل است. تغییرات بازشدگی از ۲.۵ میلی‌متر تا ۴.۲ سانتی‌متر متغیر است.

از مقایسه شرایط بازشدگی در صفحه احتمالی وقوع شکستگی هیدرولیکی و فشار حاکم، می‌توان به ارتباط نزدیک تغییرات آن‌ها نسبت به هم اشاره کرد. به گونه‌ای که افت و خیز فشار اثر مستقیم بر مقدار بازشدگی داشته است. که به این ترتیب، با مطالعه شرایط فشار ایجاد شده در داخل سازند می‌توان

به مقدار دلخواه طراحی شده تا حدی میل کرد.



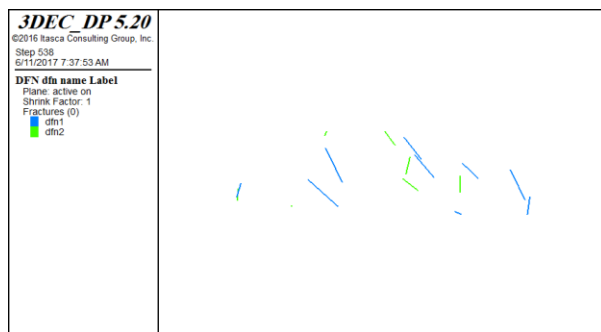
شکل ۳-۱۶ تغییرات بازشدگی صفحه شکست هیدرولیکی

### ۳-۱۵ مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

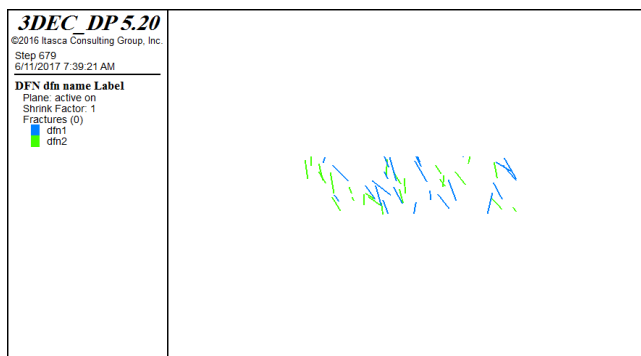
یکی از راه‌های بررسی نقش هریک از عوامل مؤثر در ایجاد تغییر در روند فرآیند شکست، تحلیل حساسیت و انجام مطالعات پارامتری است. از جمله پارامترهایی که می‌تواند در فرآیند شکست هیدرولیکی در ارتباط با شکستگی‌های طبیعی اثر گذار باشد، پارامترهایی است که هندسه شکستگی‌های طبیعی را تعریف می‌کند. هندسه شکستگی‌های طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا تولید شده که هریک از پارامترها از یک توزیع احتمالاتی مناسب برای آن پارامتر تبعیت می‌کند. در ادامه سعی شده است فاکتورهایی که در توابع توزیع شرکت داشته و در نهایت در تشکیل هندسه شکستگی‌ها و توزیع آن‌ها نقش دارند، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

تراکم شکستگی‌ها ( $p_{32}$ ) معیاری است سطح شکستگی‌ها در دامنه مدل را تعیین می‌کند. از این رو افزایش این مقدار می‌تواند تعداد شکستگی‌ها را در دامنه مدل افزوده و موجب بیشتر شدن اتصالات شبکه

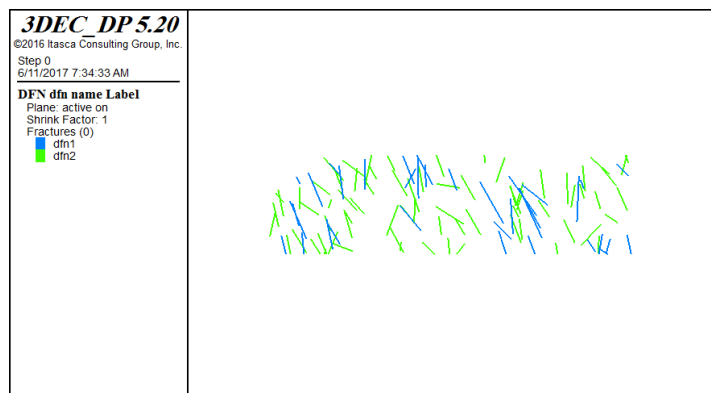
شود. بنابراین بررسی تاثیر این پارامتر مهم تلقی می‌شود. به همین منظور تحلیل پارامتری هریک از مشخصه‌های هندسی شکستگی، در سه حالت تراکم پایین، متوسط و بالا ارزیابی شده است. به منظور تغییر در حالت تراکم در شکستگی‌ها مقدار چگالی شکستگی‌ها ( $p_{32}$ ) با مقادیر ۰.۰۱، ۰.۰۳ و ۰.۰۵ تغییر می‌کند. برای این‌که تاثیر این پارامتر در تغییر هندسه شکستگی‌ها بهتر دیده شود، اشکال ۳-۱۷، ۳-۱۸ و ۳-۱۹ آورده شده‌اند. این اشکال، صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک را نشان می‌دهد. این اشکال حضور شکستگی‌ها را در سه حالت تراکم متفاوت بیان می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش مقدار  $p_{32}$  منجر به افزایش تعداد شکستگی و اتصالات در شبکه شده که بدیهی است تاثیر بسزایی بر روی نتایج حاصل از عملیات تزریق در محیط درزه‌دار خواهد داشت؛ ازین رو مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۷ شکستگی‌های موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم پایین ( $P_{32}=0.01$ )



شکل ۳-۱۸ شکستگی‌های موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم متوسط ( $P_{32}=0.03$ )



شکل ۳-۱۹ شکستگی‌های موجود در صفحه قائم عبوری از مرکز بلوک در حالت تراکم بالا ( $P_{32}=0.05$ )

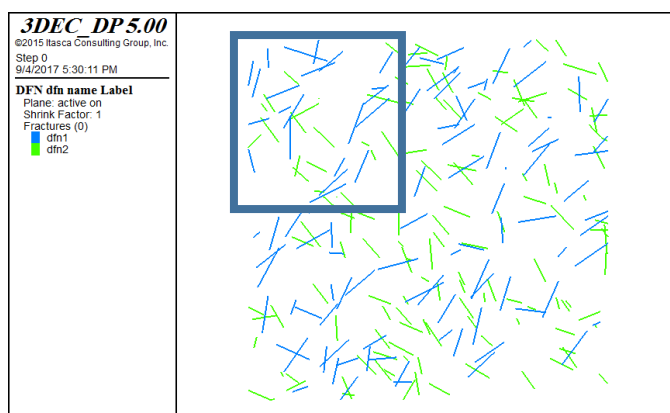
برای انجام این کار از یک مدل مرجع استفاده می‌شود و پارامترهایی که قرار است مورد بررسی قرار گیرند، تغییر پیدا می‌کنند. پارامترهای ورودی مدل مرجع شامل خواص سنگ بکر و شکستگی‌ها خواهد بود. نحوه ساخت هندسه مدل، اختصاص خواص و تزریق سیال مطابق با بخش‌های قبلی انجام شده است در ادامه به بررسی پارامتری تاثیر پارامترهای هندسی نظیر جهت‌داری، طول خط اثر و چگالی پرداخته می‌شود.

### ۳-۱۶ جهت‌داری شکستگی‌های طبیعی

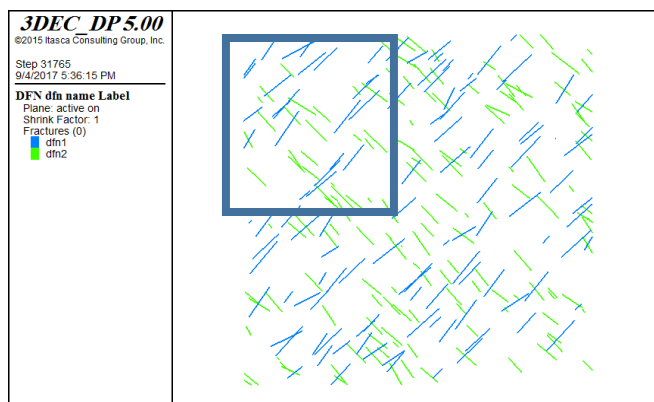
همانطور که پیش از این ذکر شده است، در تعریف و اعمال جهت‌داری شکستگی‌های مدل از تابع توزیع فیشر استفاده شده است. در این تابع توزیع،  $k$  ثابت فیشر است که انحراف جهت‌داری از یک مقدار میانگین شیب و جهت شیب دسته درزه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار بزرگتر این ضریب نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها کمتر بوده و شکستگی‌ها تمایل دارند در راستای میانگین شیب و جهت شیب قرار گرفته و موازی شوند. به دلیل این که این امر نشان داده شود، به عنوان نمونه شبکه شکستگی‌های مجزا در دو حالت  $k$  با مقادیر ۵ و ۶۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. صفحه افقی عبوری از مرکز بلوک (محل تزریق پیش بینی شده) در شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ آورده شده است. از مقایسه این دو شکل و نحوه توزیع شکستگی‌ها می‌توان تاثیر افزایش ثابت فیشر در توزیع شکستگی‌ها را از نقطه نظر جهت‌داری شکستگی‌ها

استنباط کرد. و کاملاً گویای این است که با افزایش ثابت فیشر می‌تواند پراکندگی شکستگی‌ها از دیدگاه جهت‌داری حول میانگین کاهش دهد.

در قسمت بالای اشکال ۲۰-۳ و ۲۱-۳ بخشی از شکستگی‌ها انتخاب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شکستگی‌های موجود در بخش انتخاب شده از شکل ۲۰-۳ که دارای ثابت فیشر پایین‌تر است، جهت‌گیری نامنظم‌تری دیده شده و در شکل ۲۱-۳ شکستگی‌ها منظم‌تر و نسبت به شکستگی‌های شکل ۲۰-۳ موازی‌تر نشان می‌دهند. اختلاف چشم‌گیری که تغییر ثابت فیشر در توزیع شکستگی‌ها ایجاد کرده موجب شده است تا تاثیر تغییرات این پارامتر نیز بررسی شود.



شکل ۲۰-۳ توزیع شکستگی‌ها در صفحه افقی عبوری از محل تزریق در حالت  $k=5$



شکل ۲۱-۳ توزیع شکستگی‌ها در صفحه افقی عبوری از محل تزریق در حالت  $k=60$

اتصالات ایجاد شده توسط شکستگی‌ها و کیفیت آن‌ها می‌تواند در میزان آبدگزی آن‌ها اثر گذار بوده و در نهایت در شکستگی هیدرولیکی موثر واقع شوند.

فرکانس تراوش<sup>۱</sup>، هدایت هیدرولیکی، چگالی تقاطع (P20) شدت تقاطع (P21) و شاخص قطع شدگی از پارامترهایی بسیار مهمی هستند که می‌توانند در توصیف اتصالات شبکه مفید واقع شوند. فرکانس تراوش همان درجه اتصال داخلی یا اتصال کلی یک شبکه شکستگی بوده که از رابطه زیر قابل محاسبه است. (Leung & Zimmerman 2012)

$$\xi = \frac{n_{node}}{n} \quad (10-3)$$

که  $n_{node}$  تعداد تقاطع‌ها و  $n$  تعداد شکستگی‌ها است.

پارامتر هدایت نیز معرف میزان اتصال در شبکه شکستگی است. در حالتی که بازشدگی دارای توزیع یکنواخت باشد، پارامتر هدایت دارای همبستگی خطی با هدایت هیدرولیکی شبکه‌های شکستگی دارد. این پارامتر از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Leung & Zimmerman 2012)

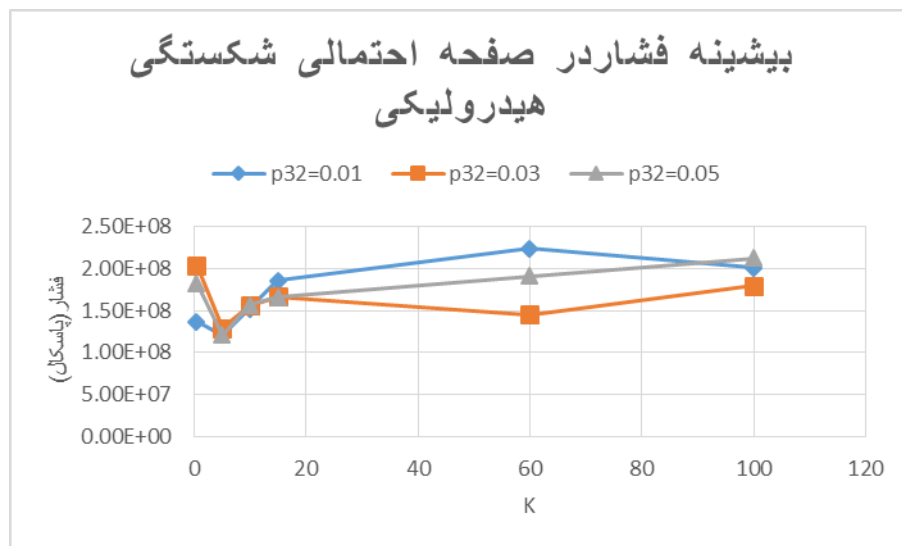
$$\eta = \frac{n\bar{l}}{2} \sqrt{1 + \frac{2n_{node}}{nA}} \quad (11-3)$$

همانطور که در شکل‌های ۲۰-۳ و ۲۱-۳ نیز نشان می‌دهد، با افزایش میزان ثابت فیشر شکستگی -ها تمایل پیدا کرده به صورت موازی قرار گیرند. در اینصورت مطابق با روابط ۱۰-۳ و ۱۱-۳ از میزان تقاطع بین شکستگی‌ها کاسته شده و در نتیجه آن توانایی آبدگزی شبکه کاهش می‌یابد. با کاهش میزان این آبدگزی، سیال درون شکستگی‌ها کمتر ورود کرده و در مسیر مورد انتظار حرکت کرده و با افزایش

---

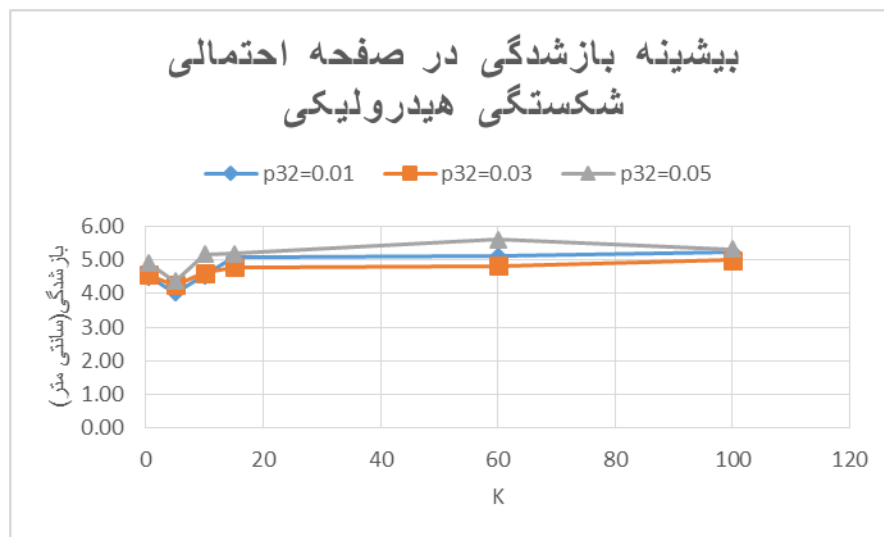
<sup>1</sup> Percolation Frequency

فشار موجب افزایش میزان بازشدگی می‌شود که می‌تواند دلیل دومی برای انتخاب این پارامتر به منظور تحلیل پارامتری باشد. برای تحلیل پارامتری ثابت فیشر، مقادیر آن از ۵ تا ۱۰۰ متغیر بوده و فرآیند تزریق در هر کدام از حالت‌ها انجام شده و نتایج آن به صورت نمودار در شکل‌های ۲۲-۳ و ۲۳-۳ آورده شده است. شکل ۲۲-۳ تغییرات فشار بیشینه در صفحه شکست هیدرولیکی نشان می‌دهد. با رسیدن مقدار ثابت فیشر به عدد ۵، مقادیر فشار بیشینه کاهش می‌یابد. پس از آن با افزایش این مقدار و رسیدن به عدد ۱۵ سیر صعودی خود را پیش گرفته و به مقدار ثابتی می‌رسد و نشان می‌دهد عمده ناهمگونی در مقادیر فشار، در بازه کوچک‌تر از ۱۵ رخ می‌دهد. همانطور که پیش از این گفته شد، هرچه مقادیر ثابت فیشر کوچک‌تر می‌شود، تمایل شکستگی‌ها برای موازی شدن در راستای یک شیب و جهت شیب معین، کاسته شده و دچار یک بی‌نظمی می‌شود. این بی‌نظمی می‌تواند دلیل عمده تغییرات در مقادیر کوچک ثابت فیشر باشد. از طرفی دیگر تأثیرات افزایش تراکم شکستگی‌ها نیز بررسی شده و نشان داده شده است که با افزایش تراکم شکستگی‌ها در عمده نقاط اندازه‌گیری شده، فشار افزایش خواهد یافت. دلیل آن می‌تواند حبس شدن سیال در انبوهی از شکستگی‌ها و بالا رفتن فشار سیال باشد.



شکل ۲۲-۳ فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

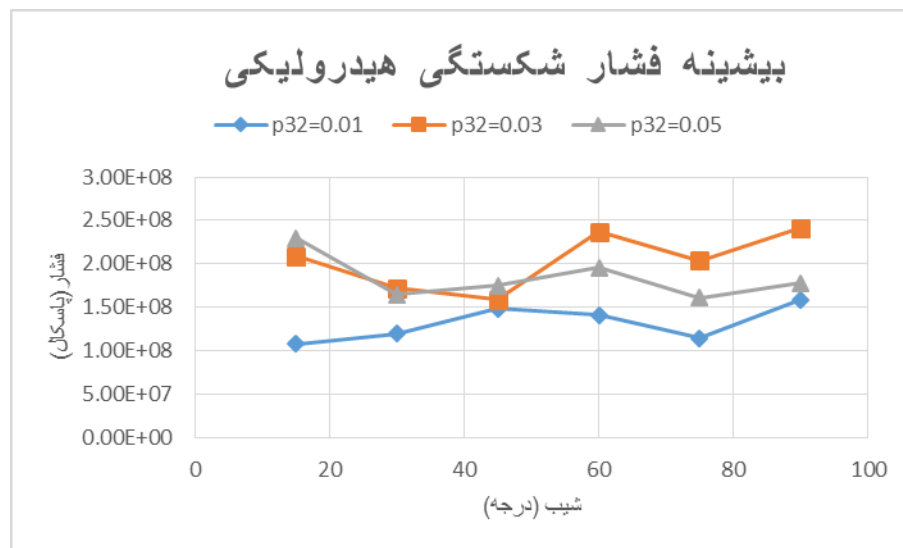
بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی نیز به تبعیت از تغییرات فشار عمل کرده است. به نحوی که در شکل ۳-۲۳ دیده شده، تغییرات نمودار، کاملاً مانند نمودار تغییرات فشار بوده و تحت تاثیر آن قرار گرفته است.



شکل ۳-۲۳ بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر

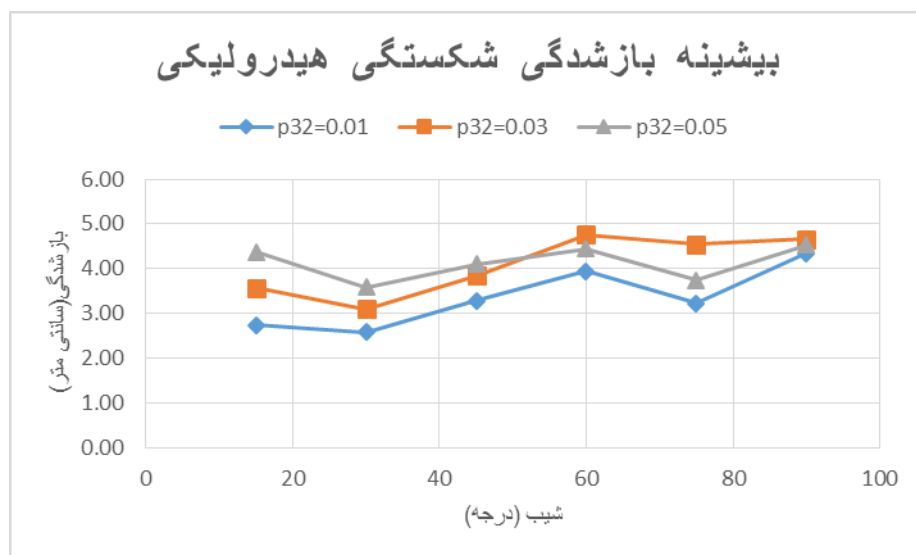
از پارامترهای دیگری که در جهت‌داری شکستگی‌ها مطرح است، جهت شیب است. برای تحلیل پارامتر جهت شیب، خواص دسته درزه‌ها مطابق با جداول ۳-۲ و ۳-۳ بوده با این تفاوت که ثابت فیشر ثابت بوده و جهت شیب تغییر کرده و مقادیر جهت شیب در بازه ۱۵ تا ۹۰ درجه متغیر است.

وقتی میزان شیب کم است، شکستگی طبیعی عمدتاً در جهت تنش افقی حداکثر قرار می‌گیرند. با افزایش مقدار شیب این شکستگی‌ها، هم سو تنش افقی حداقل شده و تمایل برای باز شدن شکستگی کمتر می‌شود. در نتیجه شکستگی‌هایی با شیب کم، تاثیر نمی‌پذیرند. با افزایش مقدار شیب سیال موجود در این شکستگی‌ها موجب بالا رفتن بیشتر فشار شده و در نتیجه آن تمایل شکستگی‌ها برای باز شدن افزایش یافته و مقدار بازشدگی شکستگی‌ها بیشتر می‌شود. شکل ۳-۲۴ و ۳-۲۵ گویای این نتایج است.



شکل ۳-۲۴ فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و

پایین



شکل ۳-۲۵ بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و

پایین.

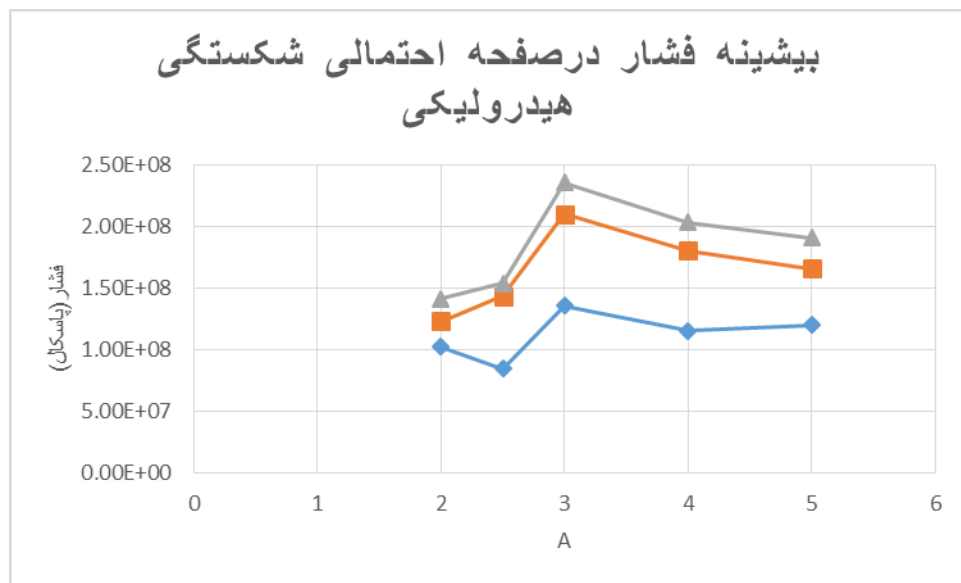
### ۱۷-۳ اندازه شکستگی

همانطور که قبلا توضیح داده شد، اندازه شکستگی عموماً از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می‌کند. در این تابع پارامتر  $\alpha$  به همراه بیشینه و کمینه اندازه شکستگی تعریف می‌شوند. پارامتر  $\alpha$  چگالی شکستگی‌ها را بر اساس محدوده تغییرات اندازه شکستگی نشان می‌دهد. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر شود، شکستگی‌های بزرگ مقدار به نسبت شکستگی‌های کوچک بیشتر می‌شوند.

به منظور تحلیل پارامتری و مشاهده تاثیر اندازه شکستگی‌ها، خروجی مدل عددی بر اساس تغییر پارامتر  $\alpha$  و کمینه اندازه شکستگی‌ها بررسی شد. در این بخش پارامتر  $\alpha$  در بازه ۲ تا ۵ و کمینه اندازه شکستگی، در بازه ۵ تا ۳۵ متر متغیر است.

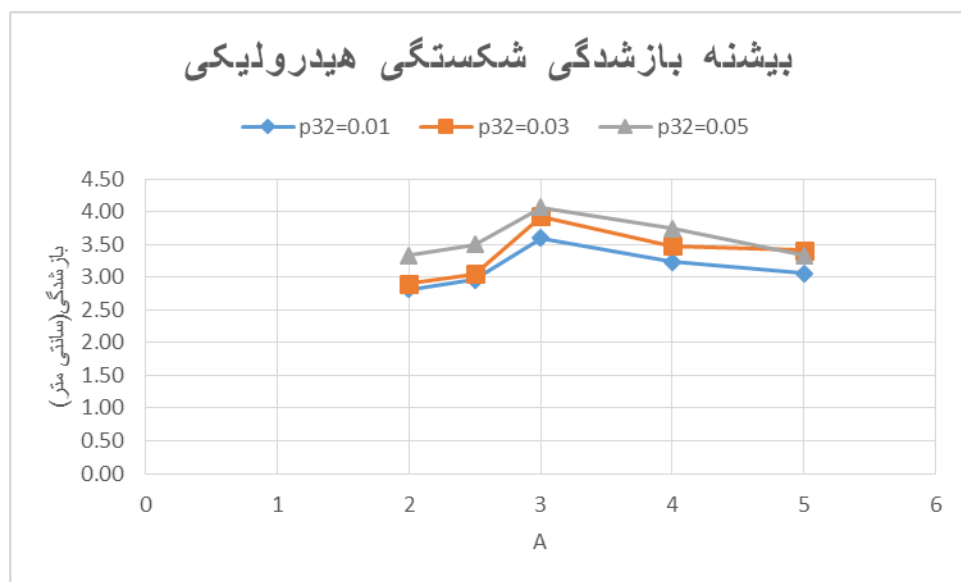
شکل ۳-۲۶ تغییرات فشار متناسب با تغییرات پارامتر  $\alpha$  را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، در مقادیر ۲ تا ۳ شاهد افزایش فشار بوده و پس از با کاهش فشار، به مقدار ثابتی رسیده است. با افزایش مقدار  $\alpha$  تعداد شکستگی‌های با اندازه بزرگ بیشتر شده و سیال برخورد کمتری با پل‌های سنگی دارد. در نتیجه امکان حبس آن کمتر شده و مقدار فشار کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان استنباط کرد که در مقادیر ۲/۵ و ۳ نقاط بحرانی بوده و افزایش یا کاهش مقادیر  $\alpha$ ، تغییرات چشمگیری را به همراه دارد.

با توجه با این تغییرات فشاری که در اثر تغییر پارامتر  $\alpha$  آمده است. در اندازه بازشدگی درزه‌ها اثر مستقیم دارد. به گونه‌ای که در شکل ۳-۲۷ نیز مشاهده می‌شود، تغییرات بازشدگی نیز با تغییرات فشار دارای روند تغییر یکسانی است.



شکل ۲۶-۳ فشار پیشینه در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر  $\alpha$  در سه حالت

تراکم بالا، متوسط و پایین

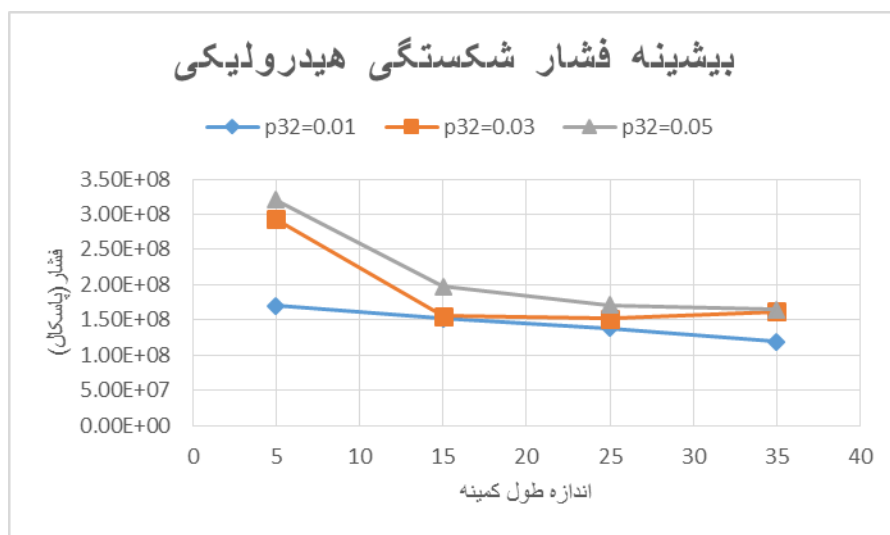


شکل ۲۷-۳ پیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر  $\alpha$  در سه

حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

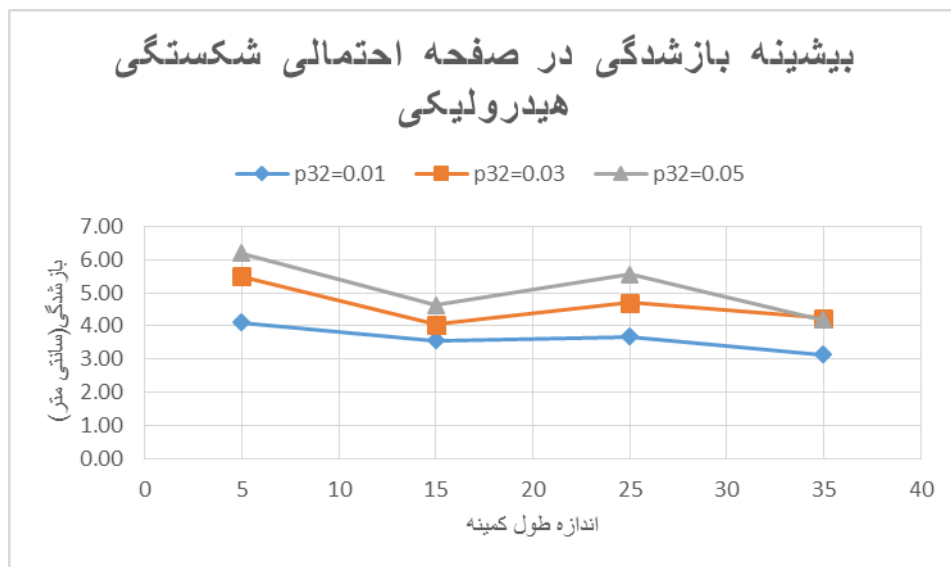
پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفته، طول کمینه اندازه شکستگی است. تغییرات اندازه

شکستگی می‌تواند تاثیر بسزایی در روند فرآیند داشته باشد. به گونه‌ای که وجود شکستگی‌های بزرگ مقیاس موجب محلی سازی جریان در این نوع شکستگی‌ها شده و نتایج را تحت تاثیر وجود این نوع شکستگی‌ها در شبکه قرار دهد. به منظور تحلیل پارامتری تاثیر این مولفه هندسی شکستگی‌ها، مقدار کمینه شکستگی‌ها از ۵-۳۵ متر متغیر در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۳-۲۸ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار کمینه اندازه شکستگی و بزرگ‌تر شدن ابعاد شکستگی‌های شبکه، مقادیر فشار در به سرعت کاهش یافته است. این تغییر فشار نشان می‌دهد که جریان سیال در یکی از شکستگی‌های بزرگ مقیاس وارد شده و فشار در صفحه احتمالی عبوری شکستگی هیدرولیکی را کاهش داده است، به تناسب این کاهش فشار، شکستگی‌های موجود در مسیر کمتر تحت تاثیر قرار گرفته و مقدار بازشدگی کاهش یافته است. تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها نیز در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۸ فشار پیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینه در سه حالت تراکم بالا،

متوسط و پایین



شکل ۳-۲۹ پیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینہ در

سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

### ۳-۱۸ جمع بندی

جهت انجام عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن شکافدار طبیعی، بررسی نقش شکستگی‌های طبیعی در تقابل با شکست هیدرولیکی اهمیت بسزایی دارد. به گونه‌ای که این شکستگی‌ها می‌توانند شرایط ایجاد شکست هیدرولیکی را محدود سازند. در این فصل، به نحوه مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن شکافدار طبیعی با استفاده از نرم افزار 3DEC اشاره شد. با توجه به قابلیت شبکه شکستگی مجزا در کاهش عدم قطعیت در تولید شکستگی‌ها و الگوی هندسی آن‌ها، از این شبکه برای تولید شکستگی‌ها استفاده شد. خصوصیات هندسی شکستگی‌ها از جمله جهت‌داری، اندازه شکستگی و تراکم آن‌ها در توده سنگ، می‌توانند در فرآیند شکست اثرگذار باشند. لذا تحلیل پارامتری در این زمینه در ادامه فصل انجام شد. نتایج نشان دادند که افزایش بی‌نظمی در جهت‌داری شکستگی‌ها میزان بازشدگی شکستگی هیدرولیکی را کاهش داده و وجود شکستگی‌های بزرگ می‌تواند موجب کانالیزه شدن جریان سیال در داخل آن و کاهش میزان بازشدگی شود.

---

۴ فصل چهارم

---

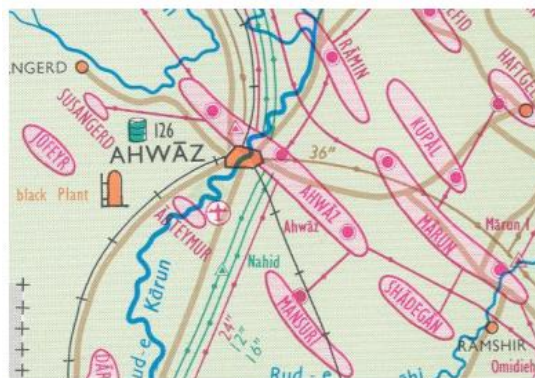
## مدل سازی ژئومکانیکی چاه مورد مطالعه

#### ۱-۴ پیشگفتار

مدل ژئومکانیکی روشی نوین در تعیین تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی به شمار می‌رود. به‌منظور ساخت این مدل، اطلاعات اولیه از طریق نگارهای پتروفیزیکی جمع‌آوری شده و در نهایت خروجی آن پارامترهای الاستیک سنگ، پارامترهای مقاومتی سنگ، فشار منفذی، اندازه و جهت تنش برای یک میدان می‌باشد. امروزه استفاده از مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در مطالعات ژئومکانیکی امری بدیهی است به‌گونه‌ای که جز اصلی مطالعات ژئومکانیکی را در برمی‌گیرد. یکی از موارد تأثیرگذار در بررسی ژئومکانیکی مخزن، رژیم تنش حاکم بر منطقه است. شناخت درست از تنش در عمق، یکی از فاکتورهای اساسی در مطالعات ژئومکانیکی است. استفاده از مدل ژئومکانیکی می‌تواند در شناخت صحیح از شرایط تنش در عمق راه‌گشا باشد؛ ازین رو به‌منظور شناخت محیط استفاده از مدل ژئومکانیکی امری جدانشدنی است. دراین فصل ساخت مدل ژئومکانیکی برای تخمین پارامترهای مقاومتی سنگ مخزن و همچنین رژیم تنش حاکم ابتدا با معرفی میدان مورد مطالعه و سپس فرآیند مدل‌سازی ژئومکانیکی مرحله به مرحله ارائه خواهد شد.

#### ۲-۴ میدان اهواز

میدان نفتی اهواز به‌صورت یک تاقدیس سینوسی ملایم و تقریباً متقارن با امتداد شمال غرب، جنوب شرق در زیر قسمتی از شهر اهواز در ناحیه دزفول شمالی واقع شده است.



شکل ۱-۴ نقشه موقعیت میدان اهواز و میادین هم‌جوار (نفت خیز جنوب).

مخزن بنگستان اهواز در افق ایلام با طول تقریبی ۷۵ کیلومتر و عرض ۸ کیلومتر در سال ۱۳۳۸ هجری شمسی (۱۹۵۹ میلادی) با حفر چاه شماره ۶ اهواز کشف و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. مخزن بنگستان در میدان اهواز دارای خواص مخزنی بهتری نسبت به اغلب مخازن بنگستان در ناحیه مرکزی خوزستان است. در حال حاضر حدود ۱۸۷ حلقه چاه در این مخزن حفاری شده است و اطلاعات جامع‌تری از این مخزن وجود داشته بطوریکه نسبت به میادین هم‌جوار خود، توصیف بهتری را شامل شده است.

تاق‌دیس نفتی اهواز در محدوده عرض جغرافیایی ۴۸ الی ۴۹ درجه طول جغرافیایی ۳۰ الی ۳۱ درجه و در مرز جنوبی فروافتادگی دزفول در دشت خوزستان واقع شده است. این تاق‌دیس تقریباً متقارن با خمش سطح محوری دارای ابعاد سطحی بطول ۱۵ و عرض ۴-۶ کیلومتر در افق بنگستان بوده و یکی از بزرگترین مخازن نفتی ایران را تشکیل داده است. مخزن آسماری حدوداً در عمق ۲۵۷۷ متری، بنگستان در عمق ۳۷۷۷ و داریان در عمق ۵۷۷۷ متری واقع شده است. بیرون‌زدگی سطحی این میدان بسیار کم شناخته شده است و محور تاق‌دیس سطحی در حدود ۱ الی ۴ کیلومتر نسبت به محور تاق‌دیس زیر سطحی، در جهت جنوب غرب جابه‌جا شده است.

تاق‌دیس اهواز از شمال به تاق‌دیس رامین، از شمال غرب به تاق‌دیس دشت میشان، از غرب به تاق‌دیس بندکرخه و سوسنگرد، از جنوب غرب به تاق‌دیس آبتیمور، از جنوب به تاق‌دیس منصوری، از جنوب شرق به تاق‌دیس شادگان، از شرق به تاق‌دیس مارون و از شمال شرق به تاق‌دیس کوپال محدود می‌گردد. (نفت خیز جنوب).

#### ۴-۳ گردآوری داده

اولین قدم به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی گردآوری داده‌هاست که می‌تواند با استفاده از منابع متفاوت این امر میسر شود. جدول زیر داده‌های ورودی به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی و منابع آن‌ها را

در حالت کاملاً ایده‌آل نشان می‌دهد:

جدول ۴-۱ داده‌های مورد نیاز جهت یاخت مدل (Afsari et al. 2009)

| داده مورد نظر          | منبع اصلی دریافت                   | دیگر منابع                                      |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| چینه شناسی             | نگار گاما، چگالی، مقاومت و صوتی    | داده های حفاری                                  |
| فشار منفذی             | سرعت موج فشاری، نگار مقاومت        | داده های لرزه نگاری، گزارش روزانه حفاری         |
| تنش قائم               | نگار چگالی                         | خرده‌های حفاری                                  |
| تنش افقی حداقل         | سرعت موج برشی و فشاری              | LOT, XLOT<br>تست تزریق، فشار منفذی، گزارش حفاری |
| تنش افقی حداکثر        | لاگ تصویری، مدل تنش‌های چاه        | تنش افقی حداقل، فشار منفذی، پارامترهای مقاومتی  |
| پارامترهای مقاومتی سنگ | سرعت موج برشی و فشاری، نگار چگالی، | تست آزمایشگاهی بر روی مغزه ها                   |

در برخی موارد ممکن است داده‌های رسیده از نگارهای پتروفیزیکی دارای خطاهایی باشند که این خطاها به صورت داده‌های پوچ خود را نشان داده و حذف می‌شوند. اطلاعات مربوط به نگارها عموماً شامل بخش پوش سنگ نبوده و بخش مخزنی را در برمی‌گیرد. به دلیل هزینه گزاف این گونه آزمون‌ها عمدتاً به منظور ساخت مدل ژئومکانیکی همه داده در دسترس نبوده و نیاز به تخمین آن‌ها بر اساس پارامترهای دیگر به چشم می‌خورد.

#### ۴-۴ تخمین سرعت موج برشی

سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ژئومکانیک محسوب می‌شود که به دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نشده است. به همین دلیل روش‌های متعددی برای برآورد این پارامتر از سایر نگارهای پتروفیزیکی ارائه شده است (Eskandari et al. 2003).

همانطور که در جدول ۴-۱ نیز اشاره شده است، با توجه به اهمیت سرعت موج برشی در ساخت مدل ژئومکانیکی، محققان زیادی با توجه به میدان مورد مطالعه و شرایط لیتولوژی سنگ مخزن، روابطی تجربی در ارتباط تخمین سرعت موج برشی ارائه کردند. اشکال اساسی در روابط تجربی، وابستگی شدید آن‌ها به شرایط سنگ‌شناسی ناحیه مورد مطالعه، کاربرد آن‌ها را محدود کرده و در صورت استفاده نیاز به کالیبراسیون وجود دارد.

کاستاگنا<sup>۱</sup> سرعت موج برشی را با توجه به جنس سازند با سرعت موج فشاری در ارتباط دانسته و برای سازندهای مختلف روابطی را ارائه کرده است (Castagna 1993). اسکندری و همکاران با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مغزه و مقایسه نتایج با نگاره صوتی، روابطی براساس نگار تخلخل، چگالی و سرعت موج فشاری ارائه کردند (Eskandari et al. 2003).

امین و همکاران بر اساس نمونه مغزه‌های موجود و نگارهای به دست آمده از مخازن کربناته سرعت موج برشی را بر اساس مقاومت فشاری تک محوره و تخلخل سنگ تخمین زدند. روابط ارائه شده توسط آن‌ها در جدول ۴-۲ آورده شده است.

---

<sup>1</sup> Castagna

جدول ۴-۲ روابط تجربی برای تخمین موج برشی

| شماره رابطه | چینه شناسی | رابطه                                                                                 | مرجع                     |
|-------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| (۱-۴)       | شیل        | $V_s = 0.77V_p - 0.8674$                                                              | (Castagna 1993)          |
| (۲-۴)       | ماسه سنگ   | $V_s = 0.8042V_p - 0.8559$                                                            | Castagna ) (1993         |
| (۳-۴)<br>(  | دولومیت    | $V_s = 0.583V_p - 0.07776$                                                            | Castagna ) (1993         |
| (۴-۴)       | آهک        | $V_s = -0.05509V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$                                            | Castagna ) (1993         |
| (۵-۴)<br>(  | کربناته    | $V_s = -17.0885 + 0.4068V_p - 2.1907NPHI^2 - 1.1794NPHI - 3.2747RHOB^2 + 15.3587RHOB$ | Eskandari ) (etal., 2003 |

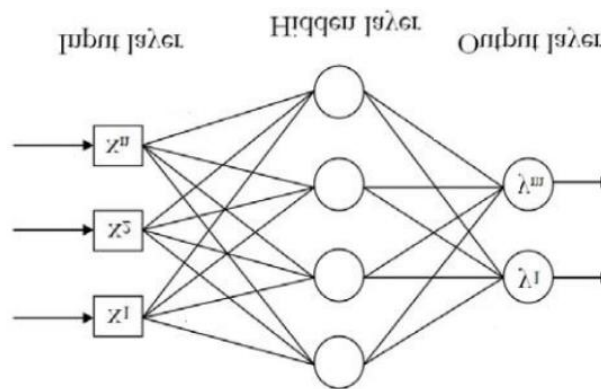
در روابط این جدول  $V_s$  و  $V_p$  به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه، NPHI تخلخل نوترونی و RHOB چگالی بر حسب gm/cc است. علاوه بر استفاده از روابط تجربی، استفاده از شبکه عصبی و روش‌های هوشمند نیز می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند به منظور تخمین سرعت موج برشی مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق به دلیل اندازه گیری سرعت موج برشی در یکی از چاه‌ها، به بررسی ارتباط آن با سرعت موج فشار پرداخته می‌شود. از شبکه MLP<sup>۱</sup> به منظور تخمین سرعت موج برشی با استفاده از سرعت موج فشاری استفاده خواهد شد.

<sup>1</sup> Multilayer Perceptron

#### ۱-۴-۴ شبکه MLP

در این تحقیق شبکه استفاده شده برای پیش بینی، شبکه پیشخور چندلایه است که به آن شبکه پرسپترون چندلایه هم می گویند. در این شبکه نرون های هر لایه تماما به نرون های لایه قبل متصل شده است. خروجی هر لایه پس از تاثیر گذاشتن تابع محرک، ورودی لایه بعدی می گردد و این روند تا به دست آمدن خروجی شبکه ادامه می یابد. شکل ۲-۴ این روند را نشان می دهد. (نوروزی ۱۳۹۳).



شکل ۲-۴ نمای شماتیک شبکه MLP (نوروزی ۱۳۹۳)

قبل از مراحل آموزش و آزمایش شبکه، باید فرایند استانداردسازی رویدادهای انجام شود تا داده ها در دامنه خاصی وارد شبکه گردند. با استفاده از دستور استاندارد سازی، داده ها در محدوده ۰ تا ۱ و یا در بازه ۱- تا ۱+ نرمال می شوند. هرچند در این روش خطر از دست رفتن برخی داده ها وجود دارد، ولی داده ها فرم همگنی پیدا کرده و با سایر داده ها قابل مقایسه می گردند. داده ها را می توان مطابق رابطه زیر نرمال کرد (نوروزی ۱۳۹۳):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۴-۶)$$

برای تعیین میزان دقت مدل‌های پیش‌بینی، باید از معیار مناسبی استفاده گردد. این معیار، پارامتری است که توسط آن به کارایی شبکه در حین آموزش پی برده می‌شود، همچنین همگرایی شبکه توسط این شاخص کنترل می‌شود. توابع هدف مورد استفاده برای بهینه‌سازی عبارت‌اند از میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) که از روابط ۷-۴ و ۸-۴ قابل محاسبه است (نوروزی ۱۳۹۳)

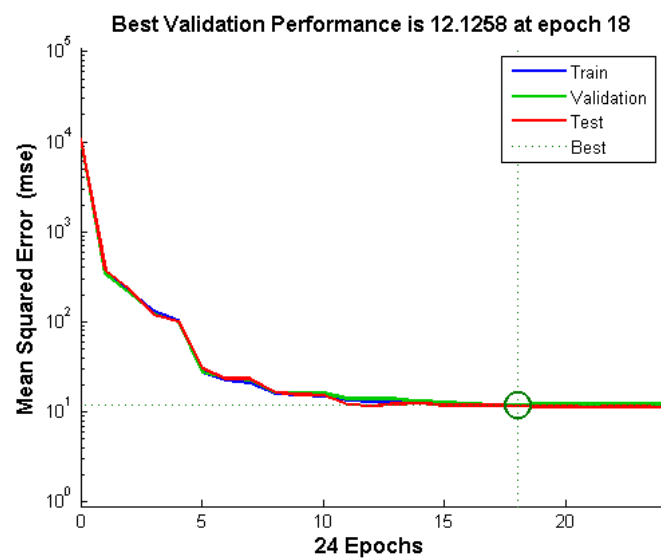
$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_s - X_o)^2}{n}} \quad (۷-۴)$$

$$R = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_s - \bar{X}_s)^2}} \right] \quad (۸-۴)$$

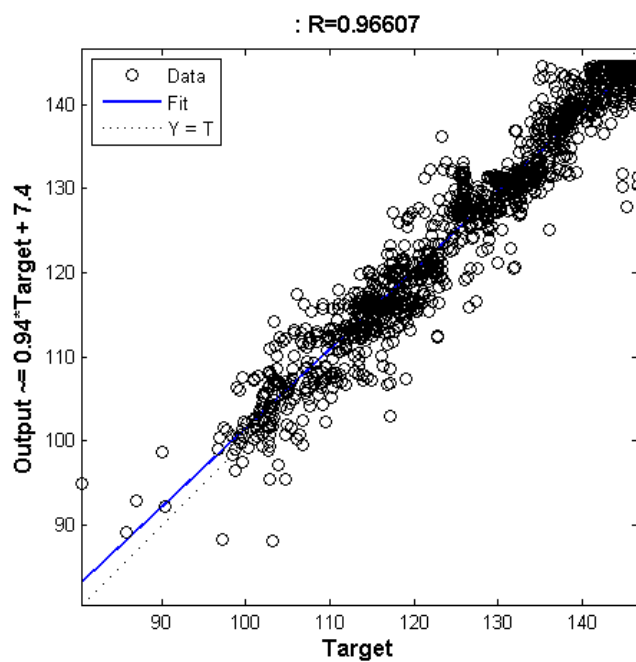
که  $X_0$  مقدار مشاهداتی،  $X_s$  مقدار تخمینی و  $X$  میانگین مقدار مشاهداتی یا تخمینی است.

به منظور تخمین مقادیر سرعت موج برشی و فشاری، از داده‌های اندازه‌گیری شده در چاه ۳۶۰ مورد استفاده قرار گرفت. از مجموع کل داده‌ها، ۷۰ درصد به آموزش شبکه، ۲۰ درصد به تست شبکه و ۱۰ درصد به اعتبار سنجی آن اختصاص داده و به بررسی رابطه بین سرعت موج برشی و فشاری پرداخته شد. به طور کلی، بهترین پیش‌بینی زمانی رخ می‌دهد که میزان ضریب همبستگی نزدیک به یک بوده و مقدار مربع خطا کم و به صفر میل کند.

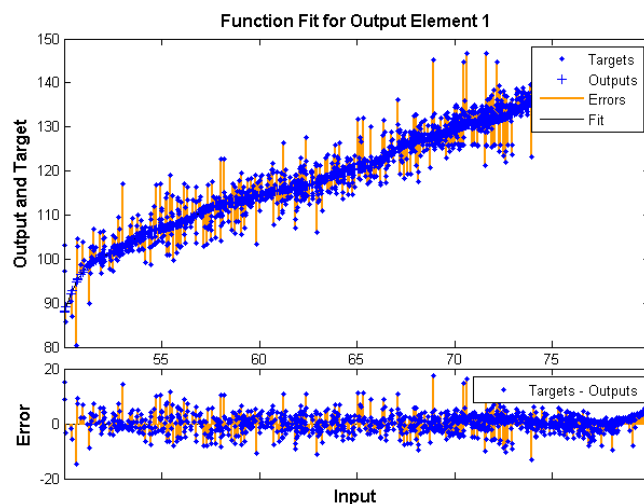
شکل ۴-۴ نمودار کلی رگرسیونی حاصل از تخمین را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار همبستگی برابر با ۰.۹۶ بوده و حاکی از همبستگی بالای داده‌ها است. در شکل ۴-۵ مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده دارای نزدیکی بسیار بوده و عمده نقاط، با خطای کمی تخمین زده شده‌اند.



شکل ۳-۴ همگرایی شبکه با انجام ۱۸ آموزش و کاهش میزان مربع خطا



شکل ۴-۴ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده



شکل ۴-۵ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده به همراه مقدار خطا

#### ۴-۵ محاسبه پارامترهای مکانیکی سنگ

پارامترهای الاستیک سنگ نماینده ظرفیت سنگ در برابر تغییر شکل‌پذیری هستند. برای مقادیر بالای پارامترهای الاستیک، تغییر شکل‌پذیری سنگ بسیار پایین است که می‌تواند نقش شایان توجهی در طراحی‌های ژئومکانیکی ایفا کند. (Peng & Zhang 2007) یکی از روش‌های تخمین پارامترهای الاستیک سنگ، استفاده از نگار صوتی چاه است. این نگار در حین حفاری برداشت‌شده و عموماً قابل دسترسی است. خروجی این نگار سرعت موج فشاری و سرعت موج برشی بوده که روابط موجود برای تخمین پارامترهای الاستیک سنگ تابعی از این دو پارامتر است (Fjar et al. 2008).

با استفاده از سرعت موج فشاری و برشی، مدول یانگ و نسبت پواسون دینامیکی از روابط ۴-۹ و

۴-۱۰ به دست می‌آید:

$$E_{dyn} = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (4-9)$$

$$v_{dyn} = \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (10-4)$$

با استفاده از روابط موجود بین پارامترهای الاستیک، مدول برشی و مدول بالک از روابط ۱۱-۴ و ۱۲-۴ محاسبه می‌شود (Fjar et al. 2008).

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2(1 + \nu_{dyn})} \quad (11-4)$$

$$K_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{3(1 - 2\nu_{dyn})} \quad (12-4)$$

در این روابط  $v_p$  و  $v_s$  به ترتیب سرعت موجب فشاری و برشی برحسب متر بر ثانیه،  $\rho$  برحسب  $\text{gm/cc}$ ،  $E$ ،  $G$  و  $k$  به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی و مدول بالک دینامیکی بوده و برحسب  $\text{Gpa}$  است (Fjar et al. 2008).

#### ۴-۶ تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی

مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای الاستیک به‌دست‌آمده از طریق نگارها کاملاً متفاوت از مقادیر حاصله از کار آزمایشگاهی است. وجود آب منفذی می‌تواند از دلایل این اختلاف باشد. در اندازه‌گیری از طریق نگارها، تغییر شکل سنگ در شرایط بدون زهکشی حاصل‌شده که بزرگ‌تر از مدول‌های به‌دست‌آمده در شرایط زهکشی در آزمایشگاه است (Zoback 2010) (King 1983).

به دلیل هزینه بالا و مشکلات تهیه مغزه، روابطی تجربی به منظور تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی ارائه شدند. این روابط مطابق منطقه مورد مطالعه، براساس لیتولوژی و شرایط منطقه ارائه شده‌اند. تعدادی از این روابط در جدول ۳-۴ آورده شده‌اند.

جدول ۳-۴ روابط تجربی برای تعیین مدول الاستیسیته دینامیک به استاتیک

| شماره رابطه | چینه شناسی              | رابطه                        | مرجع                 |
|-------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| (۱۳-۴)      | سنگ‌های آذرین و دگرگونی | $E_s = 1.26E_d - 29.5$       | (King 1983)          |
| (۱۴-۴)      | کربناته ایران           | $E_s = 0.4154E_d - 1.0593$   | (Afsari et al. 2009) |
| (۱۵-۴)      | شیل                     | $E_s = 0.0428E_d^2 + 0.2334$ | (Fjar et al. 2008)   |

مطالعات آزمایشگاهی نیز در شرکت مناطق نفت خیز جنوب انجام شده است که بر اساس آن روابطی به منظور تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی ارائه شده‌اند.

$$E_{sta} = 0.7E_{dyn} \quad (۱۶-۴)$$

$$\nu_{sta} = \nu_{dyn} \quad (۱۷-۴)$$

مدول برشی و بالک نیز با استفاده از روابط بین پارامترهای الاستیکی مطابق روابط زیر به دست می‌آید.

$$G_{sta} = \frac{E_{sta}}{2(1+\nu_{sta})} \quad (۱۸-۴)$$

$$K_{sta} = \frac{E_{sta}}{3(1-2\nu_{sta})} \quad (۱۹-۴)$$

#### ۷-۴ پارامترهای مقاومتی سنگ

پارامترهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی، از پرکاربردترین پارامترهای بیانگر مقاومت سنگ در آنالیزهای ژئومکانیکی است. مقاومت تک‌محوری فشاری سنگ (UCS) یکی از مهم‌ترین این پارامترها می‌باشد. این پارامتر از طریق آزمایش بر روی نمونه مغزه‌های سنگ به دست می‌آید. مسلماً به علت محدودیت‌هایی که در گرفتن مغزه در اعماق زیاد وجود دارد، می‌بایست به دنبال روشی جایگزین گشت. روش‌های تجربی مختلفی به منظور محاسبه UCS بر اساس داده‌های نگارهای پتروفیزیکی ارائه شده‌اند. هرچند باید به این نکته مهم توجه داشت که هر کدام از این روابط برای سنگ‌هایی مخصوص و در شرایط مشخص به دست آمده‌اند؛ بنابراین توجه به این ویژگی‌ها و محدوده به کارگیری مدل و همچنین کالیبره کردن آن‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی بر روی تعدادی محدود نمونه از ناحیه مورد بررسی، امری اجتناب‌ناپذیر است (Peng & Zhang 2007). برخی از روابط ارائه شده در جدول زیر اشاره شده است.

جدول ۴-۴ روابط تجربی به منظور تعیین مقاومت تک‌محوری فشاری سنگ

| شماره رابطه | چینه شناسی                      | رابطه                                                    | مرجع                 |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------|
| (۲۰-۴)      | سنگ آهک و دولومیت               | $UCS = \frac{\left(\frac{7682}{DTC}\right)^{1.82}}{145}$ | Chang et al. (2006)  |
| (۲۱-۴)      | سنگ آهک<br>$10 < UCS < 300$ Mpa | $UCS = 13.8 E_{dyn}^{0.51}$                              | Chang et al. (2006)  |
| (۲۲-۴)      | کربناته ایران                   | $UCS = 4.1089 E_{sta} + 2.28$                            | Afsari et al. (2009) |

در این مطالعه، از روابط ارائه شده توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب برای تخمین پارامترهای مقاومتی استفاده شده است.

$$UCS = 2.27E_{sta} + 4.74 \quad (۲۳-۴)$$

$$T = 0.08UCS \quad (۲۴-۴)$$

روابط موجود برای تخمین زاویه اصطحاک داخلی بسیار محدود است. رابطه زیر را پلامب<sup>۱</sup> برای سنگ های خرده آواری ارائه کرده است (Archer & Rasouli 2012).

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - \phi - v_{shale}) + 62.5(1 - \phi - v_{shale})^2 \quad (۲۵-۴)$$

$V_{shale}$  درصد حجم شیل و  $\varphi$  تخلخل است.

درصد حجم شیل را می توان با استفاده از نگار گاما از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (۲۶-۴)$$

#### ۴-۸ فشار منفذی

فشار منفذی به فشار ناشی از سیال در حفرات سنگ گفته شده که یکی از مهم ترین پارامترها برای مدل سازی ژئومکانیکی است. بدون داشتن یک پیش بینی درست از میزان فشار منفذی سازند، نمی توان به نتایج درستی از مدل سازی دست یافت (Fjar et al. 2008). به صورت کلی می توان شرایط فشار سیال در اعماق را به سه زون، فشار هیدرواستاتیک، فشار هیدرودینامیک و فشار زمین تقسیم بندی نمود. در زون فشار هیدرواستاتیک، فشار منفذی برابر با فشار آب تا عمق مد نظر بوده و به سادگی از طریق انتگرال گیری

---

<sup>1</sup> plumb

از ضرب چگالی آب، عمق (ضخامت) و شتاب جاذبه قابل تعیین است. زون هیدرودینامیک نیز زون عبوری از شرایط هیدرواستاتیک به زون فشار زمین است. در این راستا، مطالعات بسیاری صورت گرفته و روابط بسیاری ارائه گردیده است.

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه‌ها از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا و گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه زیر می‌توان فشار منفذی را محاسبه کرد (Zhang 2011).

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_2 - z_1) \quad (4-27)$$

در این رابطه  $p_1$  سیال در عمق  $z_1$ ،  $p_2$  فشار سیال سازند در عمق  $z_2$ ،  $\rho$  چگالی سیال و  $g$  شتاب جاذبه زمین است (Zhang 2011).

#### ۴-۹ تنش‌های برجا

یکی از موارد کلیدی در مطالعات ژئومکانیکی بررسی شرایط تنش‌های برجا در زمین است. به‌طوری‌که یکی از راه‌های مقایسه شرایط حاکم بر برخی مطالعات، مقایسه شرایط تنش حاکم است تعیین مقدار و جهت این تنش‌ها در تحلیل پایداری چاه، عملیات شکست هیدرولیکی و سایر مسایل مرتبط، از اهمیت بسزایی برخوردار است اندرسون<sup>۱</sup> بر اساس مقدار تنش، رژیم‌های حاکم بر تنش را با توجه به رفتار گسل‌ها تعریف طبقه‌بندی کرد. بر اساس این طبقه‌بندی، رژیم تنش به سه دسته کلی نرمال<sup>۲</sup>، امتداد لغز<sup>۳</sup> و معکوس<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. (Zoback 2010).

طبقه بندی رژیم‌های مختلف تنش در شکل ۴-۶ آورده شده است. مطابق این شکل، اگر مقدار

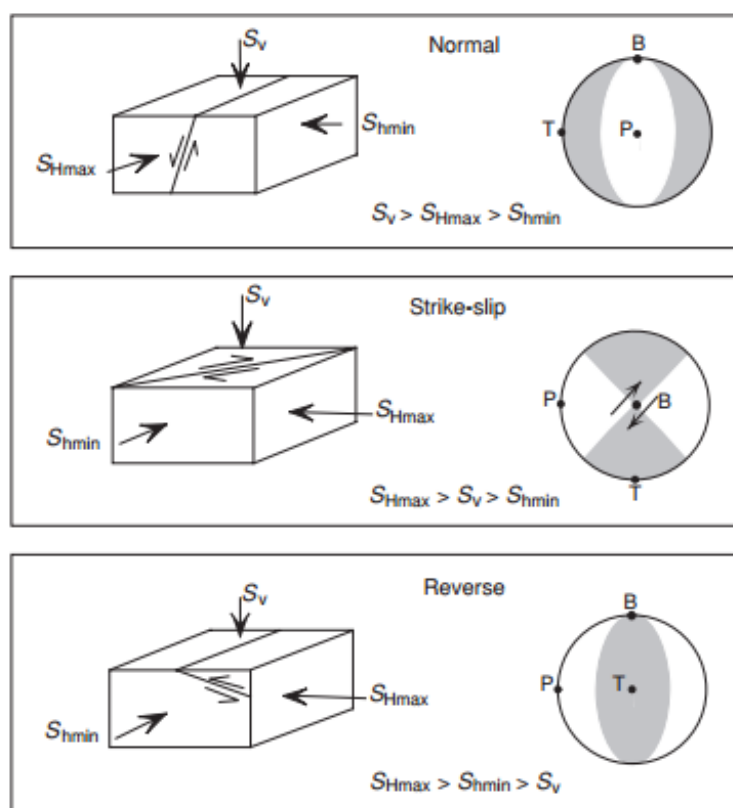
<sup>1</sup>Anderson

<sup>2</sup>Normal

<sup>3</sup>Strike-slip

<sup>4</sup>Reverse

تنش عمودی از هر دو تنش افقی بیشتر باشد، رژیم تنش نرمال خواهد بود. در صورتی که مقدار تنش افقی حداکثر از تنش عمودی بزرگ‌تر باشد، صفحات گسل در امتداد یکدیگر لغزیده اما به بالا یا پایین جابه‌جا نشده و در این حالت رژیم تنش امتدادلغز خواهد بود. در نهایت چنانچه که هر دو تنش افقی بزرگ‌تر از تنش عمودی باشند، صفحات گسل در امتداد آزمون شیب گسل بر روی یکدیگر لغزیده رژیم تنش معکوس است (Zoback et al. 2003)



شکل ۴-۶ طبقه‌بندی رژیم تنش اندرسون (Zoback 2010)

$S_{Hmax}$  و  $S_{Hmin}$  به ترتیب تنش عمودی، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر است.

#### ۴-۹-۱ تنش قائم

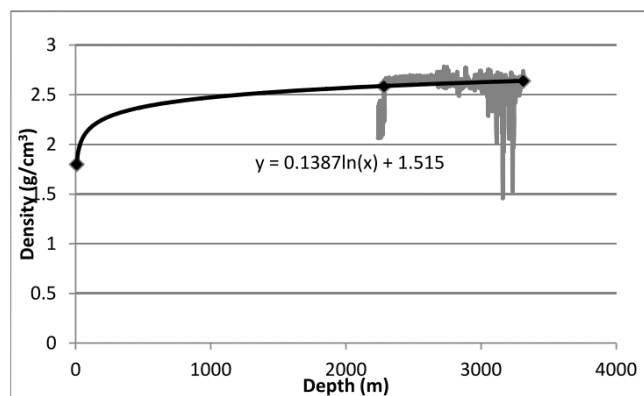
تنش قائم ناشی از وزن طبقات فوقانی است. این بدان معناست که میتوان مقدار تنش قائم برابر با

وزن روباره در نظر گرفته شود. بزرگی تنش قائم معادل با انتگرال تغییرات چگالی سنگ از سطح تا عمق موردنظر، در شتاب گرانش زمین به عبارت دیگر:

$$S_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \quad (28-4)$$

$S_v$  تنش عمودی مگا پاسکال،  $\rho$  چگالی سنگ gm/cc و  $z$  عمق بر حسب متر است (Zoback 2010).

در بخش پوش سنگ، نگار چگالی عمدتاً وجود نداشته و تنها در بخش مخزنی اندازه گیری می شود. آرچر و رسولی در سال ۲۰۱۲ به این نتیجه رسیدند که تغییرات چگالی سنگ ها در عمق از یک برازش لگاریتمی تبعیت می کند. راهکار آن ها به منظور تخمین بدین شکل است که نقطه ای در عمق یک متری زمین انتخاب و محیط آن خاک در نظر گرفته شده و چگالی ۱.۸ به آن اختصاص داده می شود. در ادامه با استفاده از نقاطی که چگالی آن در بخش مخزنی اندازه گیری شده، برازش لگاریتمی انجام شده و رابطه ای به منظور محاسبه چگالی در بخش پوش سنگ بدست می آید. برآورد چگالی پوش سنگ با توجه به این رابطه است. (Archer & Rasouli 2012)



شکل ۴-۷ برون یابی چگالی (Archer & Rasouli 2012)

#### ۴-۹-۲ تنش‌های افقی

تنش حداقل افقی به صورت مستقیم می‌تواند از طریق انجام آزمایش‌های نشت<sup>۱</sup>، مینی فرکچر<sup>۲</sup>، میکرو فرکچر<sup>۳</sup> و تا حدودی توسط داده‌های هرز روی گل<sup>۴</sup> برای نقاط خاصی از چاه و به صورت گسسته تعیین گردد (Archer & Rasouli 2012). به دلیل هزینه بالای این آزمایش‌های، عموماً از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. نکته جالب در مورد تنش افقی حداکثر این است که هیچ روش مستقیمی برای تعیین آن وجود ندارد. بنابراین روابط تجربی تنها روش موجود خواهد بود (Zoback et al. 2003).

یکی دیگر از روابط بسیار رایج برای محاسبه مقدار تنش افقی حداقل، رابطه پوروالاستیک<sup>۵</sup> است. این رابطه از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیکی جهت تخمین تنش افقی حداقل استفاده می‌کند.

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} (s_v - \alpha p_p) + \alpha p_p + \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (۴-۲۹)$$

$$S_H = \frac{\nu}{1-\nu} (s_v - \alpha p_p) + \alpha p_p + \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (۴-۳۰)$$

در این روابط  $\nu$  ضریب پواسون،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $P_p$  فشار منفذی و  $S_v$  تنش عمودی بر حسب مگا پاسکال،  $E_{sta}$  مدول الاستیسیته استاتیک بر حسب گیگا پاسکال،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  ب ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است. (Zoback 2010)

روش کار به منظور تخمین تنش با روابط فوق بدین شکل است که با جاگذاری تمام مقادیر به- جزمقادیر مجهول کرنش‌های تکتونیکی، مقادیر تنش افقی حداقل و حداکثر بر حسب کرنش تکتونیکی به

<sup>1</sup> Leak off – Test

<sup>2</sup> Mini fracture test

<sup>3</sup> Micro fracture test

<sup>4</sup> Mud loss

<sup>5</sup> Poroelastic

دست می‌آید. با عددگذاری انتخابی برای مقادیر کرنش تکتونیکی، مقادیر تنش را آنقدر جابه‌جا کرده تا با شرایط شکستگی‌های کششی و برشی ثبت‌شده در نگار تصویری و گزارش حفاری تطابق داشته باشد. در صورت عدم انطباق، این فرایند با مقادیر دیگری از کرنش تکتونیکی آزموده شده و این چرخه تا رسیدن به انطباق مناسب، تکرار خواهد شد. به همین منظور نیازمند استفاده از معیار شکست مناسب برای این فرآیند وجود دارد.

#### ۳-۹-۴ تنش مماسی و شعاعی در چاه قائم

به منظور بررسی نقش تنش در مطالعات ژئومکانیکی، نیازمند تبدیل تنش از مختصات کارتزین به استوانه‌ای وجود دارد. برای تبدیل تنش به مختصات استوانه‌ای روابط زیر قابل استفاده است ( Fjar et al. 2008):

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (31-4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (32-4)$$

$$\sigma_z = \sigma_z \quad (33-4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \quad (34-4)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{xz}\cos\theta + \tau_{yz}\sin\theta \quad (35-4)$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{yz}\cos\theta - \tau_{xz}\sin\theta \quad (36-4)$$

و در یک چاه قائم:

$$\sigma_r = P_w \quad (37-4)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w \quad (38-4)$$

$$\sigma_z = \sigma_V - 2g(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (39-4)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{rz} \quad (40-4)$$

مطابق با رابطه (38-4) مقادیر بیشینه و کمینه تنش مماسی از روابط زیر قابل تعیین است (Fjar et

al. 2008):

$$\sigma_{\theta, \max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \quad (41-4)$$

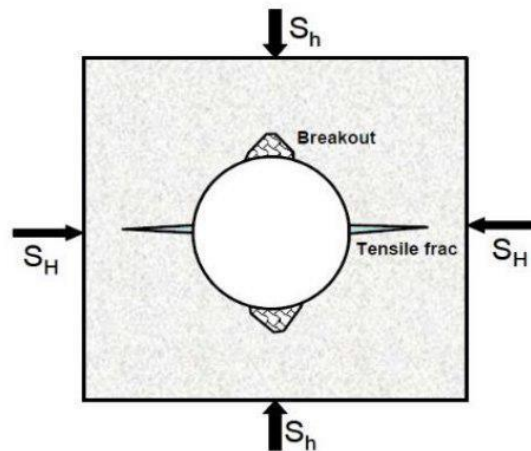
$$\sigma_{\theta, \min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \quad (42-4)$$

در این روابط  $\sigma_r$  تنش شعاعی و  $\sigma_\theta$  تنش مماسی بر حسب مگا پاسکال است.

#### ۴-۱۰ معیار شکست

حفظ پایداری چاه طی حفاری و بهره‌برداری یکی از مهم‌ترین مسائلی است که همراه مورد توجه بوده است. طی حفاری دو مشکل اساسی که منجر به ناپایداری چاه می‌شوند، خردشدگی و شکستگی دیواره چاه بوده که می‌توانند موجبات گیرکردن رشته لوله‌های حفاری، هرزروی گل و مسدود شدن چاه را فراهم آورند. مشکلات مربوط به پایداری در خلال حفاری با انتخاب صحیح وزن گل حفاری از بین خواهد رفت. به‌طور کلی دو مکانیسم شکست برشی و کششی برای وقوع ناپایداری در دیواره چاه قابل مشاهده

است. اگر فشار گل حفاری بیشتر از فشار سازند به علاوه مقاومت سنگ باشد، سیال حفاری باعث ایجاد شکست کششی در دیواره چاه می‌شود. و در صورتی که فشار گل کمتر باشد، شکست برشی رخ می‌دهد (Al-ajmi 2006).



شکل ۴-۸ مکانیسم شکست‌های برشی و کششی در چاه (Al-ajmi 2006)

#### ۴-۱۰-۱ معیار شکست موهر-کلمب

یکی از ساده‌ترین معیارهای شکست و در عین حال موثر برای تخمین مقاومت برشی سنگ، معیار موهر-کلمب است. بر طبق این معیار، پارامترهایی مانند تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقاومت برشی سنگ موثر هستند. این معیار به صورت زیر ارائه می‌گردد (Al-ajmi 2006):

$$\sigma_1 = C_o + q\sigma_3 \quad (4-43)$$

در این رابطه  $C_o$  مقدار مقاومت فشاری تک محوره سنگ است.  $q$  نیز پارامتری ثابت است که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4-44)$$

مقدار مقاومت فشاری تک محوره نیز از طریق رابطه ۴-۴۵ قابل محاسبه است:

$$C_o = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۴۵-۴)$$

براساس شرایط موجود بین تنش‌های القایی حد پایین فشار گل از طریق روابط جدول زیر قابل تعیین است:

جدول ۴-۵ محاسبه حد پایین فشار گل با استفاده از معیار موهر-کلمب (Al-ajmi 2006)

| شرایط تنش                                                               | حد پایین فشار گل                |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$                             | $P_{wb1} = (B - C_o) / q$       |
| $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$                             | $P_{wb2} = (A - C_o) / (1 + q)$ |
| $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$                             | $P_{wb3} = A - C_o - qB$        |
| $A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad B = \sigma_v + 2g(\sigma_H - \sigma_h)$ |                                 |

در جدول ۴-۵  $p_{wb}$  حد پایین فشار گل بر حسب Mpa است.

۴-۱۰-۲ معیار شکست موگی-کلمب<sup>۱</sup>

با توجه به اینکه معیار موهر-کلمب تاثیر تنش میانی را در نظر نگرفته و دو بعدی است، لذا انتظار می‌رود که نتایج محافظه کارانه‌تری را ارائه کرده و مقادیر وزن گل را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. موگی با انجام آزمایش‌های سه‌محوره بر روی سنگ‌ها نشان داد که تنش اصلی میانی بر روی مقاومت سنگ تأثیر بسزایی دارد. بر این اساس معیار خود را به صورت زیر بیان کرد (Al-ajmi 2006):

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (۴۶-۴)$$

<sup>1</sup> Mogi- Coulomb

که در این رابطه  $\tau_{oct}$  تنش برشی هشت وجهی<sup>۱</sup> بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (47-4)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi \quad (48-4)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (49-4)$$

در روابط فوق،  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به ترتیب مقادیر تنش های اصلی بیشینه، میانی و کمینه و C چسبندگی سنگ بر حسب مگا پاسکال،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه است. بر اساس این معیار حد پایین فشار گل با استفاده از روابط موجود در جدول ۴-۶ به دست می آید. (Al-Ajmi 2006)

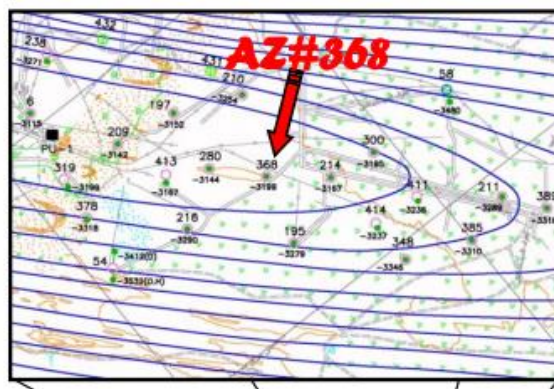
جدول ۴-۶ محاسبه حد پایین فشار گل با استفاده از معیار مویی-کلومب (Al-Ajmi 2006)

| شرایط تنش                                                                                                                                                                                                                 | حد پایین فشار گل                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$                                                                                                                                                                               | $P_{wb1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$ |
| $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$                                                                                                                                                                               | $P_{wb2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(A - 2P_o)]^2 - 3(A - 2B)^2}$    |
| $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$                                                                                                                                                                               | $P_{wb1} = \frac{1}{6 - 2b'^2} \left[ (3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 + b'AG)} \right]$ |
| $A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad B = \sigma_v + 2g(\sigma_H - \sigma_h) \quad H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12)$<br>$K = a' + b'(B - 2P_o) \quad G = K + b'A \quad a' = 2c \cos \varphi \quad b' = \sin \varphi$ |                                                                                        |

<sup>1</sup> Octahedral

#### ۴-۱ مدل ژئومکانیکی چاه شماره ۳۶۸

چاه اهواز ۳۶۸ با موقعیت شر ۰۳۸ جنوب (ب) و ارتفاع میز دوار برابر با ۲۸.۷ متر نسبت به سطح دریا، به منظور توسعه و تولید نفت مجاز روزانه از مخزن سروک پایینی در یال جنوبی مخازن اهواز جهت تغذیه واحد بهره برداری شماره یک این میدان حفاری گردیده است (محمدیان ۱۳۸۹).



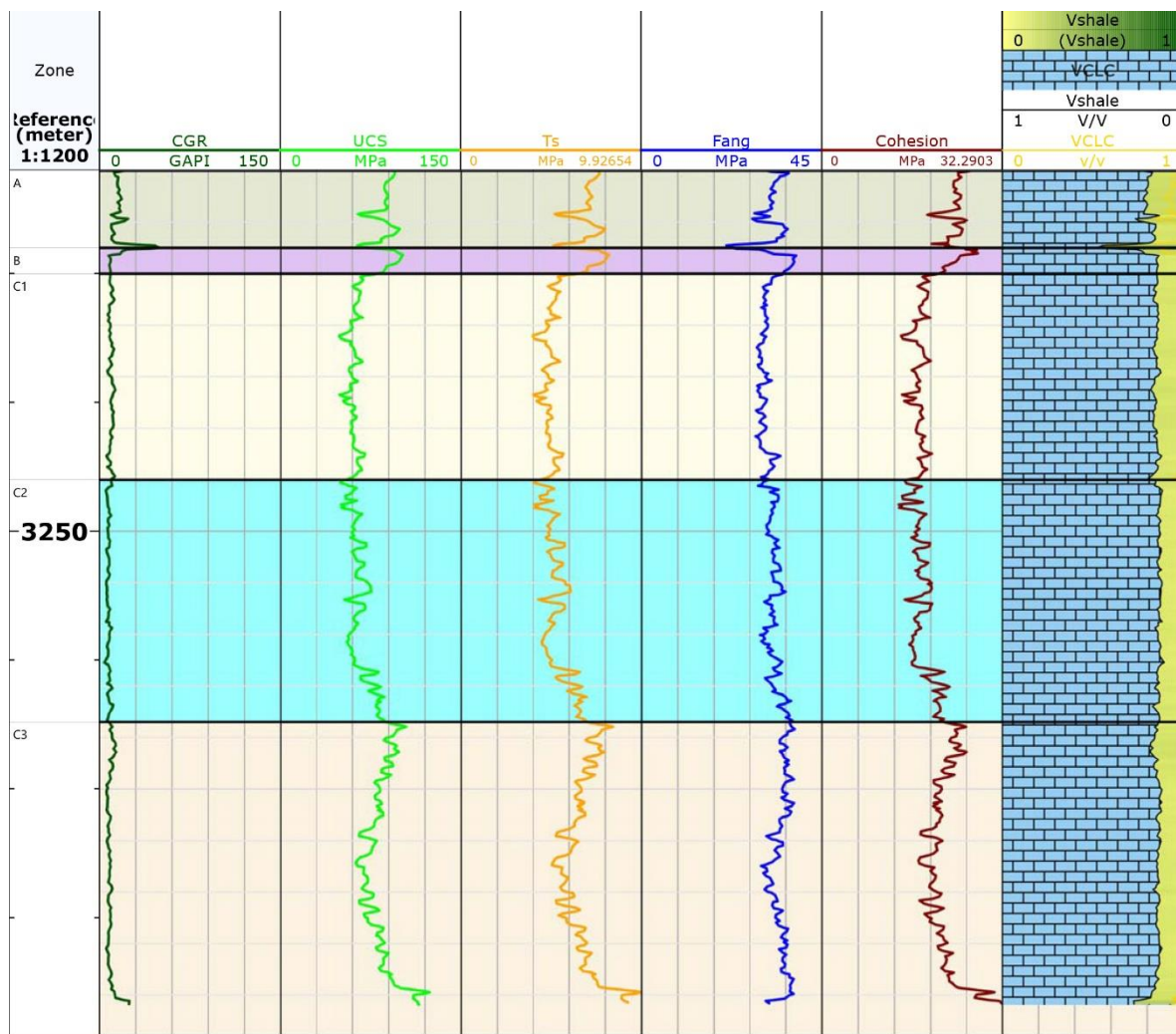
شکل ۴-۹ موقعیت چاه ۳۶۸ میدان اهواز (نقشه UGC) (محمدیان ۱۳۸۹)

مدل ژئومکانیکی چاه ۳۶۸ میدان اهواز مطابق به روند ساخت مدل براساس توضیحاتی که در بخش‌های قبلی اراده شده، ساخته شده است. ابتدا مقدار سرعت موج برشی تخمین زده شده سپس بر-اساس روابط ۴-۹، ۴-۱۰، ۴-۱۱ و ۴-۱۲ مقادیر پارامترهای الاستیک سنگ مخزن محاسبه شدند. در این چاه همچنین آزمایش تعیین فشار نقطه‌ای (RFT) در این چاه انجام نشده است، به همین دلیل که فشار منفذی حدود ۲ مگا پاسکال کمتر از فشار گل حفاری در نظر گرفته شود. چرا که در حفاری‌های تعادلی معمولاً وزن گل طوری انتخاب می‌شود که فشار گل ۲ مگا پاسکال بیشتر از فشار منفذی سازند باشد. وزن گل حفاری در این چاه در گزارش‌های روزانه حفاری است.

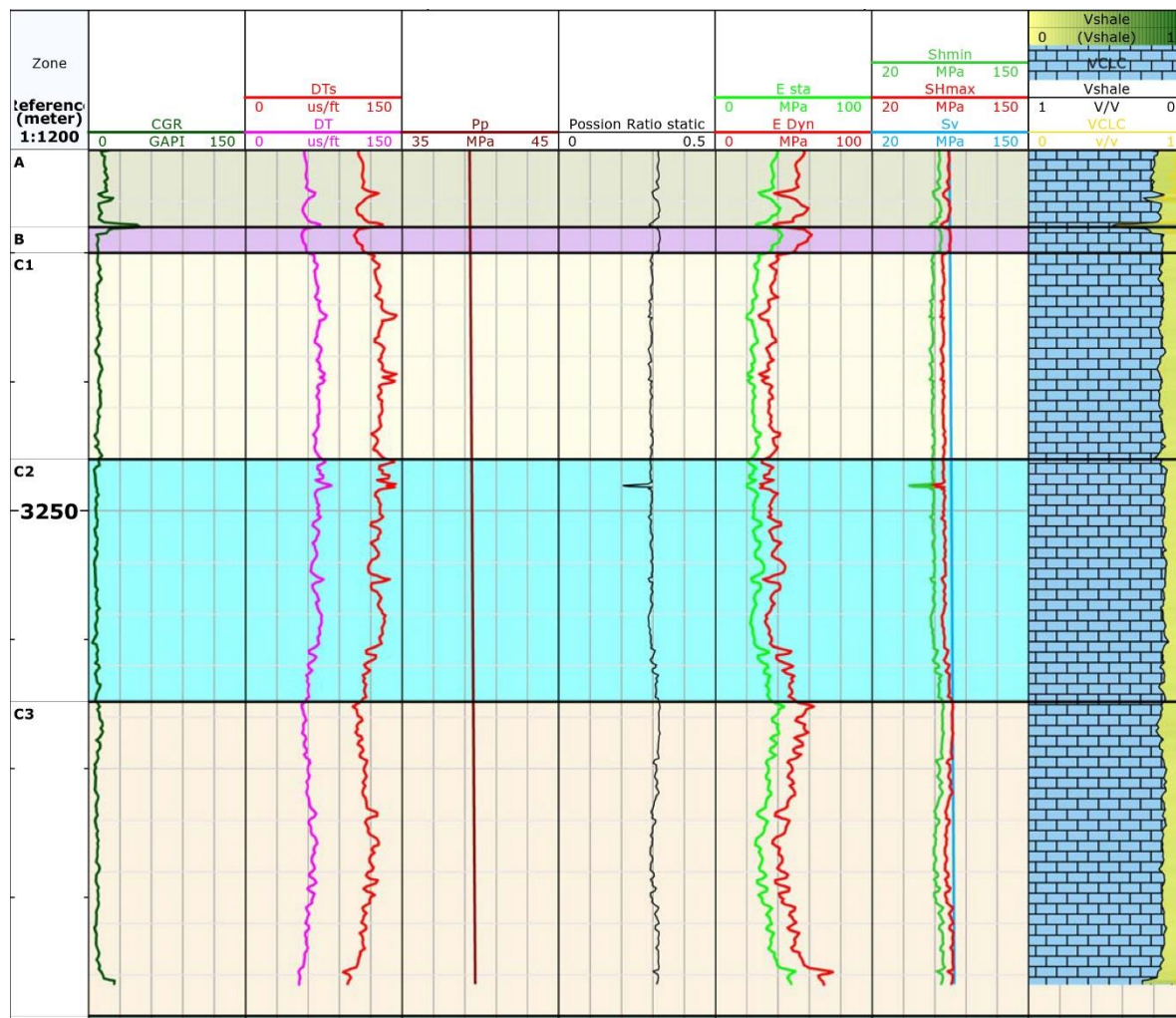
تنش‌های برجا طبق روابط ۴-۳۱ و ۴-۳۲ محاسبه شده‌اند. ابتدا مقادیر محاسبه شده پارامترهای الاستیک و فشار منفذی در رابطه قرار داده شده است. سپس با تغییر مقادیر کرنش‌های تکتونیکی به

مقادیر تنش‌های منطقه با استفاده از معیار شکست موهر-کلومب و مقایسه با شکستگی‌های مشاهده شده،

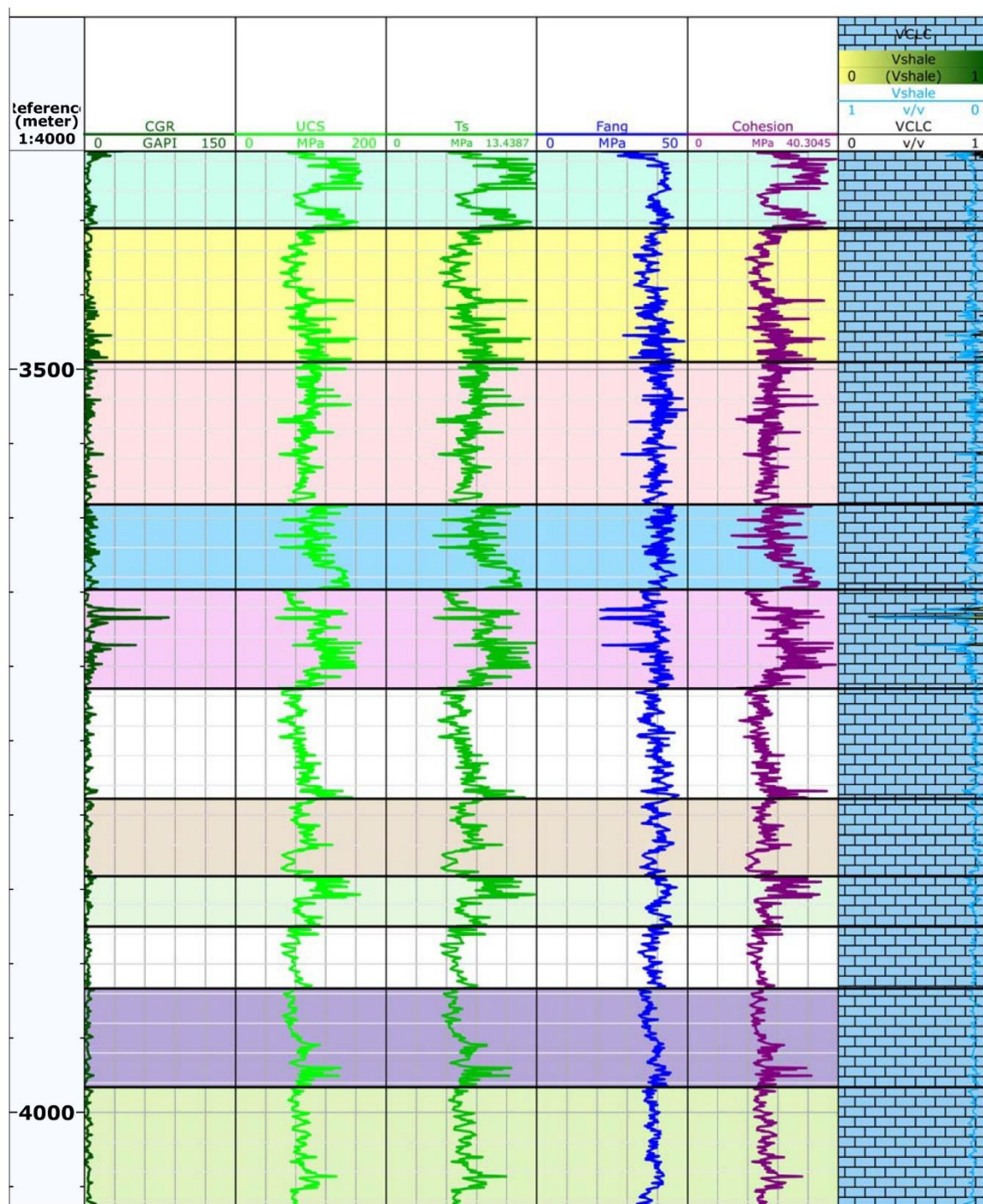
محاسبه خواهند شد. نتایج نشان می‌دهد رژیم تنش در این ناحیه نرمال است. ( شکل ۴-۱۱ ، ۴-۱۳ )



شکل ۴-۱۰ پارامترهای مقاومتی سنگ در سازند ایلام، چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز



شکل ۴-۱۱ پارامترهای الاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا در سازند ایلام، چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز



شکل ۴-۱۲ پارامترهای مقاومتی سنگ در سازند سروک، چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز



#### ۴-۱۲ جمع‌بندی

مدل ژئومکانیکی زمین یکی از روش‌های متداول در تعیین تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی و تنش حاکم بر منطقه است که از نگارهای متداول چاه برای مدل‌سازی استفاده می‌نماید. مطالعات پیش امکان‌سنجی میدان، تعیین پنجره گل حفاری، نشست زمین و طراحی شکست هیدرولیکی از جمله کاربردهای استفاده از این مدل است.

در ابتدای این فصل رابطه رگرسیونی بین سرعت موج‌برشی و فشاری در یکی از چاه‌هایی که اندازه‌گیری شده، با استفاده از شبکه MLP به‌دست‌آمده است. سپس مقادیر موج‌برشی در چاه ۳۶۸ تخمین زده شد. در ادامه با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی و تصویری مدل ژئومکانیکی زمین در چاه شماره ۳۶۸ میدان ساخته‌شده و درنهایت رژیم حاکم تنش بر منطقه تعیین گردید.

## **مقایسه زون‌های مخزنی بر اساس شکستگی‌های طبیعی به هنگام شکست هیدرولیکی**

## ۵-۱ پیشگفتار

همان طور که گفته شد، وجود شکستگی های طبیعی در مخزن، می توانند شرایط ایجاد شکست هیدرولیکی را با محدودیت روبه رو کرده و به عنوان یک چالش مطرح شوند. افزایش روزافزون استفاده از شکست هیدرولیکی به منظور بالا رفتن تولید در مخازن هیدروکربوری و هزینه تمام شده آن، پژوهش گران را بر این واداشت تا طراحی دقیق تری را پیش از اجرای فرآیند به انجام برسانند. پارامترهای ژئومکانیکی، شرایط حوزه تنش، سیال تزریقی و نوع پروپانت انتخابی و شکستگی های طبیعی از جمله عواملی هستند که می توانند محدودکننده باشند.

در این فصل با توجه به هدف پژوهش، تنها به بررسی پاسخ شکست هیدرولیکی به شکستگی های طبیعی در بخش هایی از چاه های ۳۸۳ و ۳۶۸ مخزن بنگستان اهواز پرداخته خواهد شد.

## ۵-۲ عوامل موثر در طراحی شکست هیدرولیکی

با توجه به پیچیدگی سازوکارهای درگیر و تعدد پارامترهای موثر بر شکاف هیدرولیکی در مخزن، گاهی مشاهده شده است که نحوه ایجاد و گسترش ترک ها در مخزن و الگوی ترک های ایجاد شده در پایان عملیات با آنچه انتظار می رفت متفاوت است. لحاظ کردن همه پارامترها و در نظر گرفتن برهم کنش پدیده های فیزیکی، مکانیکی، و شیمیایی موجود در مسئله، مستلزم دقت نظر بیشتر در حل تحلیلی یا عددی مساله است. سازوکارهای مختلف که بر ایجاد و گسترش شکستگی هیدرولیکی در مخزن مؤثرند، این سازوکارها را می توان به چند دسته زیر تقسیم کرد (پاک ۱۳۹۵):

- عوامل مربوط به چاه
- عوامل مربوط به سازند مخزن
- عوامل مربوط به ژئومکانیک
- عوامل مربوط به سیال تزریقی

• عوامل مربوط به پروپانت

در جدول ۵-۱ به برخی از این عوامل اشاره شده است:

جدول ۵-۱ عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری (پاک ۱۳۹۵)

| شماره | عامل مؤثر                  | تنوع حالت‌ها در تحلیل شکست هیدرولیکی                                      |
|-------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ۱     | مخزن                       | یک لایه - چند لایه                                                        |
| ۲     | مخزن                       | وجود یا عدم وجود شکستگی طبیعی                                             |
| ۳     | مشخصات مکانیکی سنگ<br>مخزن | ناهمسان - همسان                                                           |
| ۴     | میدان تنش                  | یکنواخت - غیر یکنواخت - متغیر با روند تولید یا تخلیه مخزن                 |
| ۵     | رفتار سنگ                  | الاستیک - الاستو پلاستیک - خزشی                                           |
| ۶     | جهت چاه                    | چاه قائم - چاه افقی                                                       |
| ۷     | سیال                       | تراکم ناپذیر - تراکم پذیر، نیوتونی - غیر نیوتونی                          |
| ۸     | نرخ تزریق                  | ثابت یا متغیر                                                             |
| ۹     | نفوذپذیری                  | بانفوذ پذیری کم - بانفوذپذیری زیاد                                        |
| ۱۰    | نحوه باز نگه داشتن ترک     | استفاده از پروپانت، استفاده از اسید برای شستن جداره ترک                   |
| ۱۱    | ارتباط چاه‌ها              | ارتباط و تاثیر متقابل چاه‌ها بر یکدیگر - بدون تاثیر                       |
| ۱۲    | مراحل عملیات               | در نظر گرفتن یکی از مراحل برای مدل سازی - مدل سازی همه مراحل عملیات تزریق |

آخرین زون بندی بر اساس مطالعه انجام شده در سال ۱۳۸۸ مطالعه جامع بنگستان اهواز با اعمال تصحیحات لازم برای کلیه چاه‌ها مطابق با شکل ۵-۱ انجام گردید.

|              |  |            |            |  |      |              |
|--------------|--|------------|------------|--|------|--------------|
|              |  |            | زون A      |  | انچہ | مکھن پنکستان |
|              |  |            | زون B      |  |      |              |
|              |  |            | زون C      |  |      |              |
|              |  |            |            |  |      |              |
| زیر زون C2   |  |            |            |  |      |              |
|              |  |            | زیر زون C3 |  |      |              |
|              |  |            | زون D      |  | سروک |              |
| زیر زون E1   |  |            | زون E      |  |      |              |
|              |  |            |            |  |      |              |
| زیر زون F1   |  |            | زون F      |  |      |              |
|              |  |            |            |  |      | زیر زون F2   |
| زیر زون G1   |  |            | زون G      |  |      |              |
|              |  |            |            |  |      | زیر زون G2   |
|              |  |            | زون H      |  |      |              |
| زیر زون I1-1 |  | زیر زون I1 | زون I      |  |      |              |
| زیر زون I1-2 |  |            |            |  |      |              |
|              |  | زیر زون I2 |            |  |      |              |
|              |  |            | زون J      |  |      |              |

در این مخزن که شامل دو سازند ایلام و سروک می‌شود، زون‌های A ، B ، D ، F<sup>+</sup> و H و J مخزنی نبوده و باقی زون‌ها مخزنی هستند. (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹)

شکستگی های برداشت شده از طریق نمودارهای تصویرگر به سه دسته‌ی انواع شکستگی های باز، شکستگی های بسته و شکستگی های احتمالی (باز یا بسته) تقسیم می‌شوند. با توجه به نقش شکستگی - های باز در تولید، این نوع از شکستگی ها در تفسیر و تحلیل و دسته بندی شکستگی های اصلی در

مخزن استفاده گردید. (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹)

اطلاعات استحصال شده از شکستگی‌ها از چاه‌های دارای نمودار تصویرگر، در جدول ۵-۲ ذکر شده است. در این جدول مطابق با زون‌های موجود، اطلاعات مربوط به جهت‌داری شکستگی‌های باز ارائه شده است. (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹)

جدول ۵-۲ خلاصه‌ای از ویژگی‌های شکستگی‌های باز برداشت شده از نمودار تصویرگر (نفت خیز

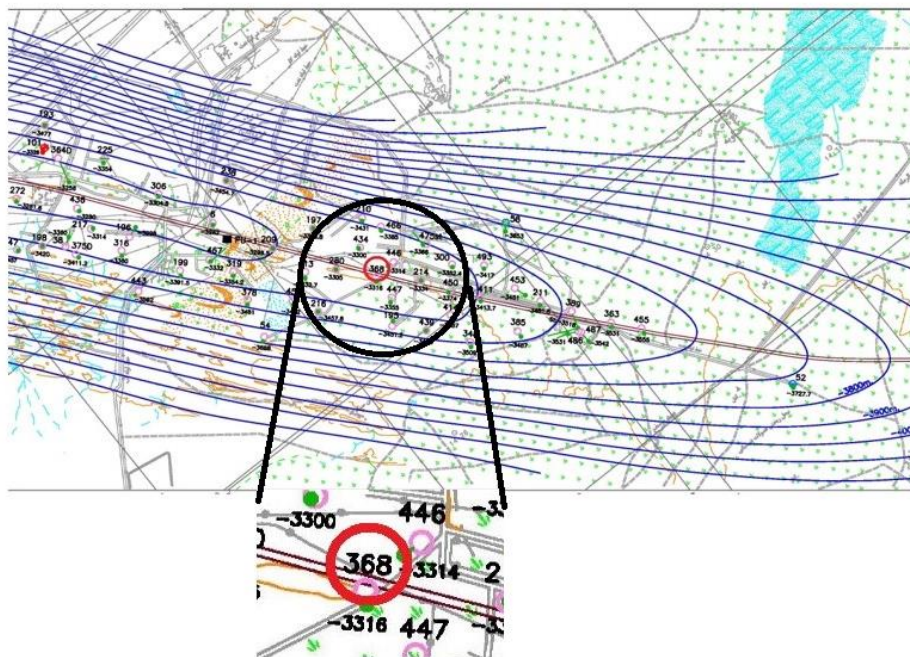
جنوب ۱۳۸۹)

| Ahvaz Field                                               |           |     |     |      |     |               |          |               |       |           |          |       |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|-----|-----|------|-----|---------------|----------|---------------|-------|-----------|----------|-------|-----------|
| Bangestan Fractures & Bedding Mean Geometrical Parameters |           |     |     |      |     |               |          |               |       |           |          |       |           |
| well                                                      | Image Log |     |     |      |     | Interval (M.) | Zone     | Open Fracture |       |           | Bedding  |       |           |
|                                                           | FMI       | FMS | UBI | OBMI | EMI |               |          | Strike °      | Dip ° | Dip Az. ° | Strike ° | Dip ° | Dip Az. ° |
| 360                                                       |           |     | *   |      |     | 3525-3710     | A,,,,C3  | 73            | 63    | 343       | 132      | 11    | 222       |
| 367                                                       |           |     | *   |      |     | 3664-3960     | A,,,,C3  | 124           | 44    | 34        | 75       | 9     | 165       |
| 368                                                       | *         |     | *   | *    |     | 3364-3863     | A,,,,H   | 164           | 77    | 74        | 164      | 9     | 236       |
| 383                                                       | *         |     |     |      |     | 3417-4167     | D,,,,I2  | 130           | 71    | 40        | 73       | 4     | 343       |
| 389                                                       | *         |     |     |      |     | 3619-3889     | D,,,,F2  | 116           | 58    | 26        | 87       | 7     | 177       |
| 397                                                       | *         |     |     |      |     | 3552-3835     | D,,,,F1  | 31            | 52    | 301       | 144      | 8     | 234       |
| 415                                                       | *         |     |     |      |     | 3375-3846     | D,,,,G2  | 5             | 61    | 95        | 132      | 8     | 222       |
| 440                                                       |           |     | *   | *    |     | 3160-3332     | A,,,,D   | 136           | 64    | 46        | 144      | 10    | 234       |
| 443                                                       |           |     | *   | *    |     | 3450-4370     | A,,,,I12 | 34            | 81    | 124       | 140      | 22    | 230       |
| 460                                                       |           |     | *   | *    |     | 3400-4067     | D,,,,I2  | 150           | 74    | 240       | 119      | 13    | 29        |

۵-۵ چاه شماره ۳۶۸

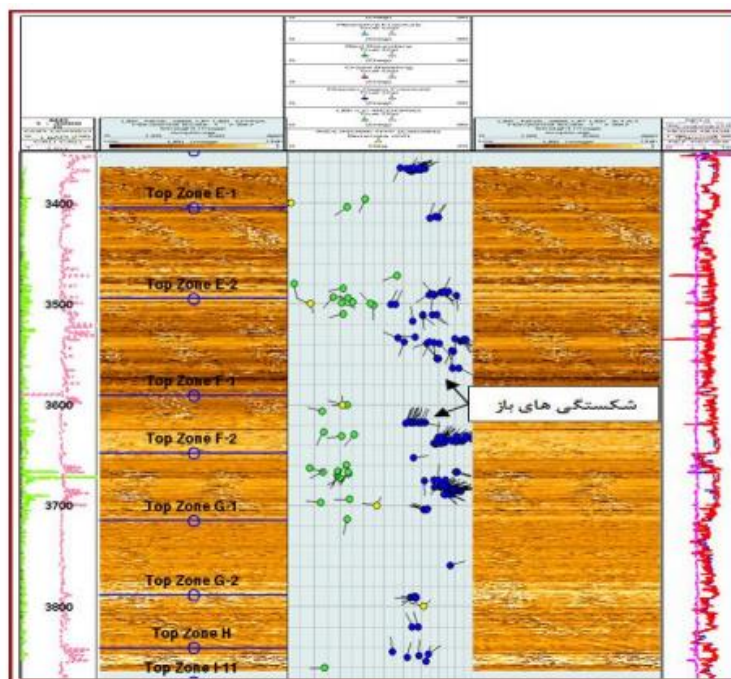
این چاه در قسمت شرقی میدان اهواز و کمی متمایل به یال جنوبی قرار دارد. در این چاه نمودار تصویرگر در فاصله عمقی ۳۳۱۴ تا ۳۸۱۳ متری رانده شده که شامل سازند ایلام و سروک تا زون H است.

شکل ۵-۲ موقعیت این چاه را در میدان اهواز نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲ موقعیت چاه شماره ۳۶۸ در میدان اهواز (نفت خیز جنوب)

شرایط شکستگی‌ها در این چاه بدین صورت است که از تعداد ۳۴۸ شکستگی باز تشخیص داده شده در این چاه تعداد ۲۲۳ شکستگی در محدوده‌ی غیر مخزنی متراکم، تعداد ۱۷۱ شکستگی در محدوده‌ی متخلخل و تعداد ۱۹ شکستگی در محدوده‌ی با تخلخل کم قرار دارند. اگر به توزیع شکستگی‌های موجود در این چاه مطابق با شکل ۵-۳ دقت شود، زون‌های  $F_1$ ,  $F_2$  و  $D$  که بیشترین تعداد شکستگی را در بین سایر زون‌های این چاه دارند. به طور عمده در محدوده‌ی رخساره متراکم غیر مخزنی قرار دارند. بنابراین می‌توان گفت که توزیع شکستگی‌های باز در قسمت‌های غیرمخزنی بیشتر دیده می‌شوند (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹)



شکل ۳-۵ شکستگی‌های برداشت شده از نمودار تصویرگر چاه ۳۶۸ میدان اهواز (نفت خیز جنوب

(۱۳۸۹)

تعداد شکستگی ها به ازای هر متر، برای زون های سازند ایلام و سروک در این چاه مطابق با جدول

۳-۵ عبارتند از (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹):

جدول ۳-۵ تراکم شکستگی‌ها در زون‌های مختلف چاه ۳۶۸ میدان اهواز (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹)

| تراکم شکستگی | زون            | تراکم شکستگی | زون            |
|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 0.29         | E <sub>2</sub> | 0.06         | A              |
| 0.8          | F <sub>1</sub> | 0.4          | B              |
| 0.79         | F <sub>2</sub> | 0.1          | C <sub>1</sub> |
| 0.05         | G <sub>1</sub> | 0            | C <sub>2</sub> |
| 0.13         | G <sub>2</sub> | 0.27         | C <sub>3</sub> |
| 0.17         | H              | 0.77         | D              |
|              |                | 0.14         | E <sub>1</sub> |

## ۵-۶ انتخاب اولیه لایه

همانطور که در جدول ۵-۱۱ اشاره شد، عوامل مختلفی در طراحی فرآیند شکست هیدرولیکی می-توانند مورد ارزیابی قرار گرفته و به نحوی موثر هستند. از جمله این موارد می-توان به شرایط ژئومکانیکی ناحیه، عوامل مربوط به سازند نظیر وجود شکستگی‌های طبیعی و سیال تزریقی را اشاره کرد.

یکی از عواملی که بسیار می-تواند تاثیر گذار بوده و نحوه تاثیر آن در فصل چهارم نیز مورد بررسی قرار گرفت، هندسه شکستگی‌های طبیعی در مخزن است. که می-تواند طراحی فرآیند شکست را با چالش رو به رو سازد؛ به همین سبب معیار مقایسه در لایه‌ها از نقطه نظر فرآیند شکست، هندسه شکستگی‌های طبیعی خواهد بود. در مجموعه گزارش‌های شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب در دسترس، اطلاعات مربوط به شکستگی‌های سازند سروک به مراتب کامل‌تر از سازند ایلام است. لذا بررسی‌ها بر روی این سازند انجام خواهد شد. از طرفی محدوده برداشت نمودار تصویرگر تا زون H است؛ بنابراین زون‌های که در بازه ابتدای سازند تا زون H قرار دارند، انتخاب می-شوند. زون‌های D، F<sub>1</sub>، F<sub>2</sub> و H زون‌های غیرمخزنی بوده و مسلماً از دایره بررسی خارج و زون G<sub>1</sub> به دلیل شکستگی پایین بررسی نخواهد شد.

### ۵-۶-۱ زون E<sub>1</sub>

این زون اولین زون مخزنی در سازند سروک است. (شکل ۵-۱۱) متوسط ضخامت این زون ۱۰۴ متر، متوسط تخلخل این زون ۵/۵ درصد بوده و تا حداکثر ۱۰ درصد در مرکز و غرب میدان نیز می-رسد. همچنین متوسط اشباع آب و ضخامت خالص به ناخالص (NTG)<sup>۱</sup> این زون به ترتیب ۳۶ و ۲۲ درصد است.

### ۵-۶-۲ زون E<sub>2</sub>

ضخامت متوسط این زون در حدود ۸۰ متر و از حداقل ۶۰ تا ۱۲۵ متر متغیر است. متوسط

---

<sup>1</sup> Net to gross

تخلخل این زون ۸ درصد بوده که تا حداکثر ۱۳ درصد نیز می‌رسد. متوسط اشباع آب در این زون حدود ۳۵ درصد است و با متوسط ضخامت خالص به ناخالص ۰.۹ خصوصیات خوبی را از لحاظ مخزنی نشان می‌دهد.

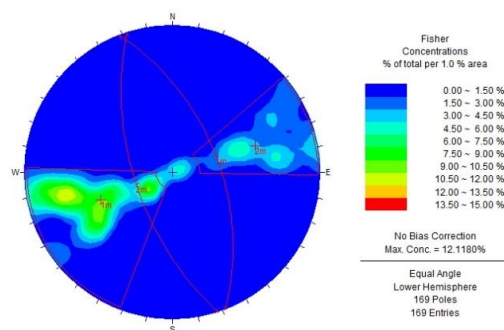
#### ۵-۶-۳ زون $G_2$

مقدار ضخامت متوسط این زون ۶۰ متر بوده و تخلخل متوسط آن ۱۰ درصد بوده که تا حداکثر ۲۰ درصد می‌رسد. اشباع آب متوسط و نسبت ضخامت خالص به ناخالص آن به ترتیب ۳۷ و ۳۴ درصد است.

#### ۵-۷ انتخاب لایه براساس خواص شکستگی‌ها

همانطور که در فصل چهارم بررسی شد، خواص هندسی شکستگی‌های طبیعی می‌توانند در طراحی شکست هیدرولیکی اثر بخش باشند؛ ازین رو بررسی هندسی شکستگی‌ها مهم به شمار می‌رود.

در گزارش نمودار تصویری رسیده از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب اطلاعاتی از شرایط جهت‌گیری شکستگی‌ها موجود است، به همین سبب تنها به بررسی شرایط جهت‌داری شکستگی‌ها اکتفا نموده و معیار مقایسه سه زون  $E_1$ ،  $E_2$  و  $G_2$  تنها جهت‌داری شکستگی‌ها خواهد بود. از طرفی مقدار ثابت فیشر در دو دسته درزه مشاهده شده تقریباً برابر بوده و شرایط تغییرات شیب به عنوان پارامتر موثر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۴ نمایش توزیع شکستگی‌ها در استریونت

جدول ۴-۵ ثابت فیشر برای دسته درزه‌های چاه ۳۶۸ میدان اهواز

| دسته درزه اول | دسته درزه دوم |
|---------------|---------------|
| K= 14.1642    | K=16.4325     |

باتوجه به گزارش‌های موجود، خواص شکستگی‌های موجود در زون‌های مورد بررسی، مطابق جدول

زیر است:

جدول ۵-۵ خواص شکستگی‌های موجود در زون‌های مورد مطالعه

| زون            | میانگین شیب | میانگین جهت شیب | میانگین طول شکستگی | تراکم شکستگی | میانگین ثابت فیشر |
|----------------|-------------|-----------------|--------------------|--------------|-------------------|
| E <sub>1</sub> | ۸۷.۷        | ۱۵۷.۶           | ۲۵                 | ۰.۱۴         | ۱۵                |
| E <sub>2</sub> | ۸۵          | ۱۴۲.۶           | ۲۵                 | ۰.۲۹         | ۱۵                |
| G <sub>2</sub> | ۴۹.۶        | ۲۷۷             | ۲۵                 | ۰.۱۳         | ۱۵                |

در فصل پنجم به بررسی هندسه شکستگی‌ها پرداخته و نشان داده شد که هریک از پارامترهای

هندسی شکستگی‌های طبیعی چگونه قادر به تاثیرگذاری بر فرآیند شکست هیدرولیکی خواهند بود.

با توجه به محدودیت اطلاعات تنها بر اساس شیب شکستگی‌ها ارزشیابی خواهد شد.

## ۵-۸ ساخت مدل عددی لایه‌های انتخابی

مدل عددی لایه‌ها متناسب با توضیحاتی که در فصل چهارم ارائه شد، ساخته شده‌اند. براساس گزارش شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب (نفت خیز جنوب ۱۳۸۹) حداکثر ابعاد بلوک ایجاد شده شامل شکستگی  $5 \times 6 \times 20$  است. لذا ابعاد بلوک به منظور ساخت مدل نیز همین مقدار انتخاب شده است. پارامترهای الاستیک سنگ و توزیع تنش‌ها در فصل چهارم تعیین شده‌اند. با توجه به در نظر گرفتن شرایط یکنواخت برای آن‌ها، از مقدار میانگین استفاده شده و مطابق جدول ۵-۶ وارد مدل می‌شوند.

جدول ۵-۶ خواص سنگ بکر

| مدول یانگ<br>(Gpa) | مدول برشی<br>(Gpa) | مدول بالک<br>(Gpa) | نسبت<br>پواسون | چگالی<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|-------------------------------|
| ۳۹.۹۷              | ۱۵.۳۲              | ۳۴.۶۹              | ۰.۲            | ۲۶۰۰                          |

رژیم تنش حاکم نرمال بوده و نسبت تنش افقی حداکثر به تنش قائم و تنش افقی حداقل به تنش قائم به ترتیب برابر با ۰.۹۵ و ۰.۸۵ در نظر گرفته می‌شود. سیال با نرخ تزریق  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$  و گرانیوی 1 cp همانند مطالعه پارامتری در فصل سوم تزریق می‌شود.

خواص هندسی شکستگی‌ها براساس گزارش شرکت مناطق نفت خیز جنوب و تفسیر نمودار تصویرگر استخراج شده که خلاصه‌ای از آن در جدول ۵-۵ ذکر شده است، مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۷-۵ خواص هندسی دسته درزه اول

| دسته درزه اول |               |                  |                  |
|---------------|---------------|------------------|------------------|
| جهت داری      | ثابت فیشر (k) | شیب              | جهت شیب          |
| اندازه شکستگی | ۱۵            | مطابق جدول ۵-۶   | ۶۹ درجه          |
|               | A             | کوچک ترین اندازه | بزرگ ترین اندازه |
|               | ۴             | ۲۰متر            | ۳۰ متر           |

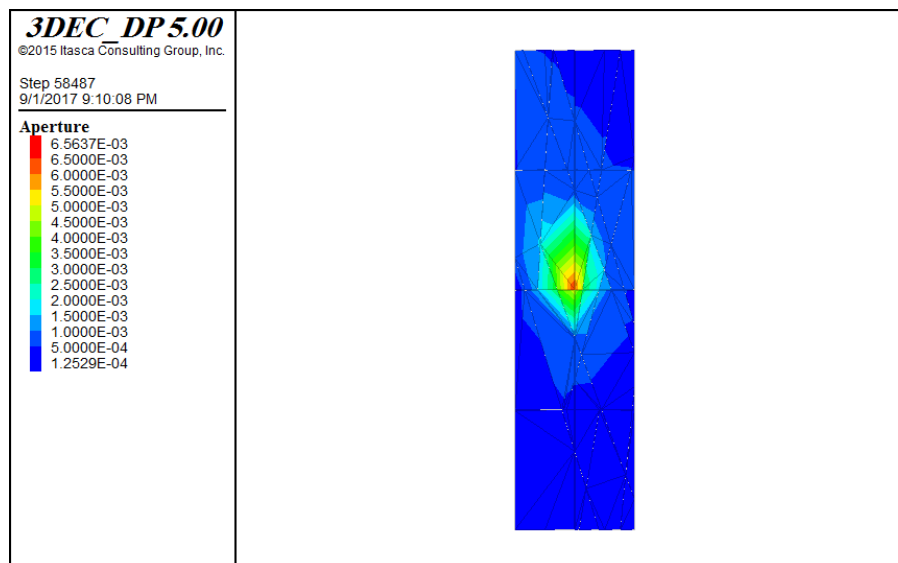
جدول ۸-۵ خواص هندسی دسته درزه دوم

| دسته درزه دوم |               |                  |                  |
|---------------|---------------|------------------|------------------|
| جهت داری      | ثابت فیشر (k) | شیب              | جهت شیب          |
| اندازه شکستگی | ۱۵            | مطابق جدول ۵-۶   | ۲۵۲ درجه         |
|               | $\alpha$      | کوچک ترین اندازه | بزرگ ترین اندازه |
|               | ۴             | ۲۰ متر           | ۳۰متر            |

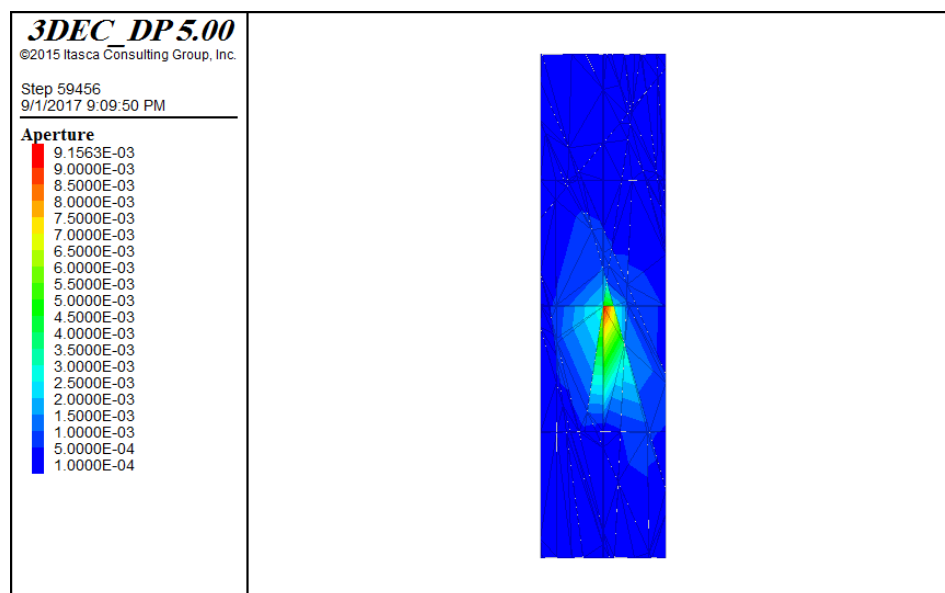
جدول ۹-۵ خواص مکانیکی شکستگی ها

| سختی نرمال | سختی برشی | چسبندگی | زاویه اصطحاک | مقاوت کششی |
|------------|-----------|---------|--------------|------------|
| 5e10       | 5e10      | 0       | 20           | 0          |

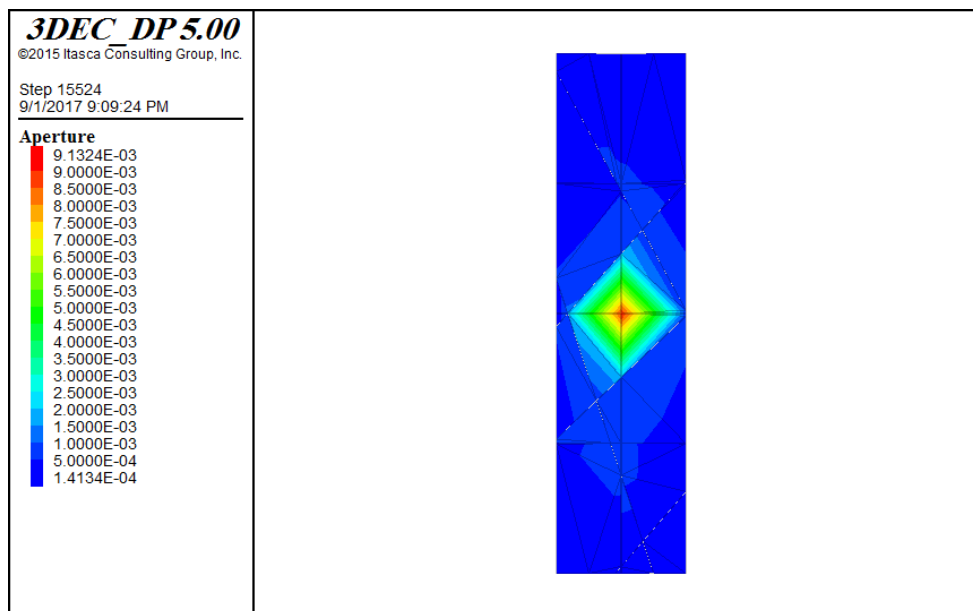
در شکل‌های ۵-۵، ۶-۵ و ۷-۵ نتایج مربوط به مدل‌سازی تزریق در زون‌های  $E_1$ ،  $E_2$  و  $G_2$  آورده شده است. مقادیر بازشدگی بدست آمده در این سه زون با شرایط پیش‌بینی شده مطالعات پارامتری فصل سوم مقایسه شده است.



شکل ۵-۵ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون  $E_1$



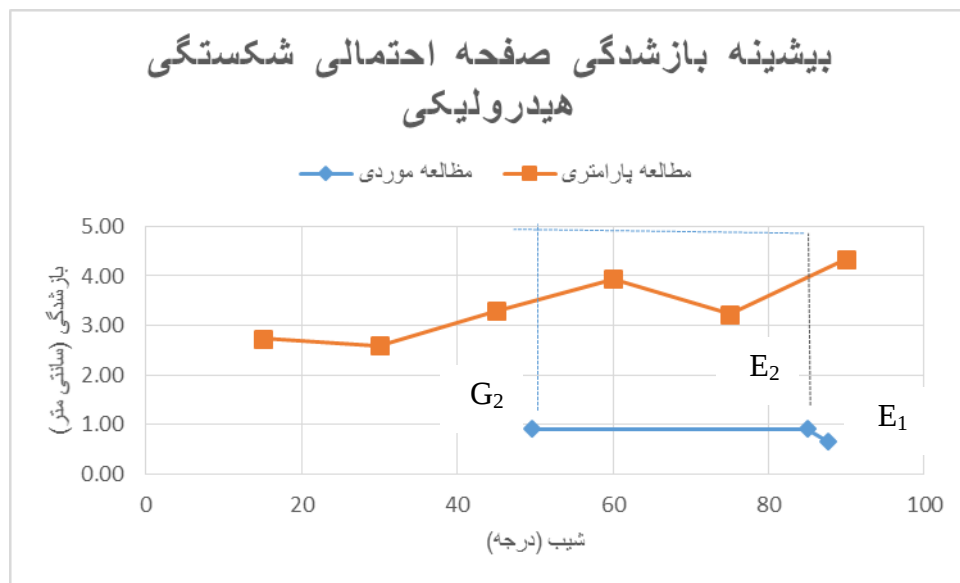
شکل ۶-۵ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون  $E_2$



شکل ۵-۷ تغییرات بازشدگی (متر) در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی در زون G2

زون‌های مورد بررسی از لحاظ شکستگی دارای تراکم پایین به شمار می‌روند؛ به همین علت می‌توان نتایج آن را با نمودار تغییرات بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی ارائه شده در فصل سوم نسبت به تغییرات شیب در حالت تراکم پایین مقایسه کرد.

شکل ۵-۸ مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی را در سه زون مورد بررسی نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت و بر اساس مطالعه پارامتری انجام شده، بازشدگی در دو زون G2 و E-2 مقادیر یکسانی را تجربه می‌کنند. با توجه به نمودار تحلیل پارامتری انتظار می‌رفت مقدار بازشدگی در زون E1 نسبت به زون E2 بیشتر باشد اما به دلیل تراکم کمتر شکستگی‌های زون E1 نسبت به E2 این مقدار کاهش یافته است.



شکل ۵-۸ مقایسه پیشینه بازشدگی زون‌های  $G_2, E_1, E_2$

با این اوصاف و طبق بررسی انجام شده و نتایج خروجی مدل عددی و تنها با در نظر گرفتن شرایط هندسی شکستگی‌ها می‌توان گفت زون‌های  $G_2$  و  $E_2$  شرایط بهتری برای اجرای عملیات شکست هیدرولیکی دارند.

## ۵-۹ جمع‌بندی

با توجه به اهمیت شکستگی‌های طبیعی، بر مبنای وجود شکستگی‌ها به بررسی شرایط شکست هیدرولیکی پرداخته شد. در این فصل به بررسی نحوه شکست هیدرولیکی زون‌های سازند سروک چاه شماره ۳۶۸ میدان اهواز پرداخته شد. ابتدا خصوصیات هندسی شکستگی‌ها مطابق با گزارش‌های رسیده از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب استخراج شد. پارامترهای ژئومکانیکی و شرایط تنش نیز از مدل ژئومکانیکی ساخته شده در فصل پنجم برداشت شده و مدل عددی ساخته شد. نتایج قرابت نزدیکی با تحلیل پارامتری در فصل چهارم را نشان می‌دهد. با اتکا به نتایج و با تصمیم‌گیری بر مبنای تنها

شکستگی‌های سازند، زون‌های  $E_2$  و  $G_2$  شرایط بهتری برای عملیات شکست هیدرولیکی دارا هستند.

---

## ۶ فصل ششم

---

### نتایج و پیشنهادات

## ۶-۱ نتیجه گیری و پیشنهادها

با توجه به آنچه در فصول گذشته درباره تاثیر شکستگی‌های طبیعی بر عملیات شکست هیدرولیکی ارائه گردید، نشان داده شد که شرایط هندسی شکستگی‌های طبیعی می‌تواند بر شکستگی هیدرولیکی اثر گذاشته و ایجاد محدودیت کند. در این فصل پس از ارائه خلاصه جمع‌بندی مطالعات انجام شده در این پایان نامه، مهم‌ترین نتایج بدست آمده و پیشنهاداتی برای مطالعه در آینده نیز ارائه خواهد شد.

به منظور رسیدن به یک نتیجه دلخواه در عملیات شکست هیدرولیکی، نیاز به امکان‌سنجی پیش از اجرای عملیات دیده می‌شود. شناخت پارامترهای موثر در فرآیند شکست هیدرولیکی می‌تواند یکی از مهم‌ترین بخش‌های این مطالعه را در برگیرد. یکی از پارامترهای موثر در نحوه اجرای شکست هیدرولیکی، شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند است.

هندس شکستگی‌های سازند بر مبنای برخی پارامترهای معرف آن نظیر جهت‌داری، اندازه شکستگی، چگالی و ... تعریف می‌شوند. از طرفی برداشت شکستگی‌ها در اعماق زمین بسیار مشکل بوده و عدم قطعیتی بالا با نتایج همراه خواهد بود. هریک از پارامترهای معرف خواص هندسی شکستگی‌ها از یک نوع تابع توزیع احتمالاتی تبعیت می‌کنند. ازین رو می‌توان با استفاده از یک رویکرد تصادفی و شبکه شکستگی‌های مجزا برای مدل‌سازی شکستگی‌ها از عدم قطعیت در نتایج کاست.

با استفاده از شبکه شکستگی مجزا و مدل اجزا مجزا به بررسی نقش شکستگی‌های طبیعی در فرآیند شکست هیدرولیکی پرداخته شد. استفاده از مطالعه پارامتری به منظور بررسی تاثیر آن در دستور کار قرا گرفت. پارامترهای معرف هندسه شکستگی نظیر جهت‌داری، طول شکستگی و چگالی با تغییر در پارامترهای توابع توزیع حاکم بر آن‌ها مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار گرفتند.

میدان اهواز یکی از بزرگترین میادین نفتی جنوب غربی ایران است. شرایط انجام شکست هیدرولیکی تنها با بررسی معیار هندسه شکستگی‌ها در زون‌های سازند مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامتر-های ورودی به منظور بررسی آن به جز هندسه شکستگی‌ها، از طریق ساخت مدل ژئومکانیکی که ابزار قدرتمندی در تعیین خواص ژئومکانیکی سازند دارد، تعیین گردید

با توجه به بررسی‌های انجام شده نتایج زیر ارائه می‌شود:

- در تحلیل پارامتری ک، انجام شد، نتایج نشان می‌دهد ثابت فیشر در مقادیر پایین خود به دلیل ایجاد یک بی‌نظمی در توزیع مقادیر شیب و جهت شیب شکستگی‌ها در حوالی یک مقدار میانگین، مقادیر بازشدگی شکستگی هیدرولیکی دارای نوسان بوده و در مقدار برابر ۵ دارای کمینه است.
- با تغییر جهتداری شکستگی، موقعیت شکستگی طبیعی نسبت به جهت تنش‌های افقی تغییر می‌کند. به گونه ای که با قرار گرفتن شکستگی در جهت تنش افقی حداقل، احتمال بازشدن آن بسیار کم می‌شود. این تغییرات می‌تواند موجب تاثیر در شرایط شکستگی هیدرولیکی شود.
- وجود شکستگی‌های بزرگ مقیاس می‌تواند باعث محلی شدن جریان شود و باعث کاهش فشار به منظور ایجاد شکست هیدرولیکی شود. همین امر موجب می‌شود مقادیر بازشدگی شکستگی هیدرولیکی دستخوش تغییر شود. همانطور که نشان هم داده شد، با افزایش طول شکستگی‌های طبیعی، از مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی کاسته می‌شود.
- $\alpha$  پارامتری است که نسبت حضور شکستگی‌های بزرگ مقیاس نسبت به شکستگی‌های کوچک مقیاس را تعیین می‌کند. با افزایش این پارامتر مقدار

بازشدگی شکستگی هیدرولیکی به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس کاهش می‌یابد. بیشنه مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در نقطه برابر با ۳ به وقوع می‌پیوندد.

- زون‌های  $G_1$ ،  $E_1$  و  $E_2$  به منظور بررسی نهایی در سازند سروک چاه ۳۶۸ انتخاب شدند. مطالعه و بررسی‌ها تنها با بررسی شرایط شکستگی‌ها نشان می‌دهد، زون-های  $G_2$  و  $E_2$  شرایط بهتری نسبت به زون  $E_1$  به منظور انجام عملیات شکست دارند.

## ۶-۲ پیشنهادات

- توابع توزیع حاکم بر جهت‌داری و اندازه شکستگی معمولاً فیشر و نمایی منفی هستند. پیشنهاد می‌شود در زمینه تغییرات این دو پارامتر با استفاده از توابع توزیع دیگری نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- در طراحی شکستگی هیدرولیکی دو پارامتر گسترش شکستگی و بازشدگی شکستگی ارزیابی می‌شود. با توجه به محدودیت نرم‌افزار 3DEC، گسترش شکستگی مورد بررسی واقع نشد. لذا می‌توان در مطالعات بعدی با استفاده از نرم‌افزار PFC یا PFC3D با همین رویکرد این مطالعه، به بررسی گسترش شکستگی نیز پرداخته و با نتایج این مطالعه مقایسه شود.
- یکی از عوامل مهم در اجرای فرآیند شکست هیدرولیکی طراحی پروپانت است. اخیراً در ورژن جدید نرم‌افزار 3DEC این قابلیت اضافه شده است. می‌توان با رویکرد موجود در همین مطالعه به بررسی نقش و شرایط پروپانت نیز پرداخته شود.

## مراجع

- پاک, علی. (۱۳۹۵). مدلسازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری، مروری بر کارهای انجام شده و تحقیقات آتی تهران
- حسین میرزایی نصیر آباد. (۱۳۹۱). تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه شکستگی مجزای توده سنگ درزه دار. کرمان: اولین همایش زمین شناسی فلات ایران.
- محمدیان, ر. ا. (۱۳۸۹). تفسیر نمودار تصویری UBI چاه های ۳۶۷ و ۳۶۸ میدان اهواز (سازندهای ایلام و سروک)
- نفت خیز جنوب. (۱۳۸۹). مطالعه کیفیت مخزنی بنگستان اهواز. اهواز.
- نوروزی, سینا. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر پارامترهای مکانیکی سنگ مخزن بر روی نرخ نفوذ حفاری در یکی از میادین نفتی شرکت مهندسی توسعه نفت (متن). دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Afsari, M. et al., 2009. Mechanical Earth Model (MEM): an effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (Case Study). In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers, pp. 1–12.
- Ahn, C.H., 2016. *Development of hydraulic fracture network propagation model in shale gas reservoirs: 2d, single-phase and 3d, multi-phase model development, parametric studies, and verification*. The Pennsylvania State University.
- Al-ajmi, A., 2006. *Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion*, KTH.
- Al-Muntasheri, G.A., 2014. A critical review of hydraulic fracturing fluids over the last decade. In *SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting*. Society of Petroleum Engineers, pp. 16–18. Available at: <http://www.onepetro.org/doi/10.2118/169552-MS>.
- 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. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 81, pp.163–174.

- Baghbanan, A. & Jing, L., 2007. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), pp.704–719.
- Bhide, R.J. et al., 2012. Modeling hydraulic fracture propagation in low permeability reservoirs. In *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- C.Detournay & J.Lemos, 2016. development of proppant transport logic in 3dec. In *4th itasca symposium on applird numerical modeling*. Itasca international inc.
- Castagna, J.P., 1993. Petrophysical imaging using AVO. *The Leading Edge*, 12(3), pp.172–178.
- Chang, C., Zoback, M.D. & Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3), pp.223–237. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410506000167>.
- Clark, J.B. et al., 1949. A hydraulic process for increasing the productivity of wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1(1), pp.1–8.
- Damjanac, B. & Cundall, P., 2016. Application of distinct element methods to simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured reservoirs. *Computers and Geotechnics*, 71, pp.283–294. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X15001354>.
- Donze, F.V. et al., 2016. Discrete Element Modeling of the Role of In Situ Stress on the Interactions Between Hydraulic and Natural Fractures BT - New Frontiers in Oil and Gas Exploration. In C. Jin & G. Cusatis, eds. *New Frontiers in Oil and Gas Exploration*. Cham: Springer International Publishing, pp. 113–136. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-40124-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-40124-9_3).
- Economides, M., Oligney, R. & Valkó, P., 2002. *Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice*, Alvin, Texas: Orsa Press.
- Eskandari, H. et al., 2003. Shear wave velocity estimation utilizing wireline logs for a carbonate reservoir, South-West Iran. *Iranian International Journal of Science*, 4(2), pp.209–221.
- Fjar, E. et al., 2008. *Petroleum related rock mechanics* 2nd Editio., Elsevier.
- Gallegos, T.J. & Varela, B.A., 2015. *Trends in hydraulic fracturing distributions and treatment fluids, additives, proppants, and water volumes applied to wells drilled in the United States from 1947 through 2010: Data analysis and comparison to the literature*, US Geological Survey.
- Gu, H. et al., 2011. Hydraulic Fracture Crossing Natural Fracture at Non-Orthogonal Angles, a Criterion, Its Validation and Applications. Paper SPE 139984 presented at

- the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, 24–26 January. *Soc. of Pet. Eng., The Woodlands, Tex.*, doi, 10.
- Hubbert, M.K. & Willis, D.G., 1954. Mechanics Of Hydraulic Fracturing.
- Hudson, J.A. & Harrison, J.P., 2000. *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*, Elsevier.
- Itasca Consulting Group inc, 2013. 3DEC User's guide ver 5.
- Jeffrey, R.G., Vandamme, L. & Roegiers, J.-C., 1987. Mechanical Interactions in Branched or Subparallel Hydraulic Fractures. , (1).
- Jing, L. & Stephansson, O., 2007. Discrete Fracture Network (DFN) Method. *Developments in Geotechnical Engineering*, 85, pp.365–398. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165125007850103>.
- Katsaga, T., Riahi, A. & Damjanac, B., 2015. Three-Dimensional Investigation of Hydraulic Treatment in Naturally Fractured Reservoirs. , pp.1–10.
- Keshavarzi, R., Club, Y.R. & Mohammadi, S., 2012. A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs. In *SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition-From Potential to Production*.
- King, M., 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(5), pp.237–241.
- Leung, C.T.O. & Zimmerman, R.W., 2012. Estimating the hydraulic conductivity of two-dimensional fracture networks using network geometric properties. *Transport in porous media*, 93(3), pp.777–797.
- Liang, F. et al., 2016. A comprehensive review on proppant technologies. *Petroleum*, 2(1), pp.26–39. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405656115000693>.
- McClure, M.W. & Horne, R.N., 2013. *Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation: Coupling flow and geomechanics* 1st ed., Springer International Publishing.
- Montgomery, C.T. et al., 2010. Hydraulic fracturing: history of an enduring technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62(12), pp.26–40. Available at: <http://www.spe.org/jpt/print/archives/2010/12/10Hydraulic.pdf>.
- Nolen-hoeksema, R., 2013. Defining Hydraulic Fracturing: Elements of Hydraulic Fracturing. *Oilfield Review Schlumberger*, (2), pp.51–52.
- De Pater, C.J. & Beugelsdijk, L.J.L., 2005. Experiments and numerical simulation of

hydraulic fracturing in naturally fractured rock.

- Peng, S. & Zhang, J., 2007. *Engineering geology for underground rocks*, Springer Science & Business Media.
- Riahi, A. & Damjanac, B., 2013. Numerical study of hydro-shearing in geothermal reservoirs with a pre-existing discrete fracture network. In *Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA*. pp. 11–13.
- Settari, A. & Cleary, M.P., 1984. Three-dimensional simulation of hydraulic fracturing. *Journal of petroleum technology*, 36(7), pp.1–177.
- Shahid, A.S.A., Fokker, P.A. & Rocca, V., 2016. A Review of Numerical Simulation Strategies for Hydraulic Fracturing, Natural Fracture Reactivation and Induced Microseismicity Prediction. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 9(Suppl-1, M5), pp.72–91. Available at: <http://benthamopen.com/ABSTRACT/TOPEJ-9-72>.
- Taleghani, A.D., 2009. *Analysis of hydraulic fracture propagation in fractured reservoirs: an improved model for the interaction between induced and natural fractures*, The University of Texas at Austin.
- Technip, E. & Nauroy, J.-F., 2011. *Geomechanics applied to the petroleum industry*, Paris: Editions Technip.
- Xiang, J., 2011. *A PKN Hydraulic Fracture Model Study and Formation Permeability Determination*. Texas A&M University. Available at: <http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-2011-12-10212/XIANG-THESIS.pdf?sequence=2>.
- Yew, C.H. & Weng, X., 2014. *Mechanics of hydraulic fracturing*, Gulf Professional Publishing.
- Zhang, J., 2011. Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1), pp.50–63.
- Zhang, X., Jeffrey, R.G. & Thiercelin, M., 2007. Deflection and propagation of fluid-driven fractures at frictional bedding interfaces: a numerical investigation. *Journal of Structural Geology*, 29(3), pp.396–410.
- Zoback, M.D. et al., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7), pp.1049–1076.
- Zoback, M.D., 2010. *Reservoir geomechanics*, Cambridge University Press.

## **Abstract**

According to increasing in the need for energy and due to the dependence of various industries on fossil fuels, makes artisans in the oil and gas field to think about increasing production from current fields. These conditions required new methods to be introduced, among which the most important are hydraulic fracturing. This method includes injection of fluid with pressure inside the formation to create a fracture and its propagation inside the formation. Several factors can be effective in terms of creating fractures and their geometries, which can be considered as a major factor in the existence of natural fractures. Differences in fractures in geometric properties can creates new conditions for the operation and the type of hydraulic fracture. Therefore, the study of their behavior before the operation is inevitable. In this study, natural fractures were investigated using separate fracture network and hydraulic fracture process using numerical method of discrete element method. In this study, the geometric properties of fractures such as density, fracture length and orientation and its effect on hydraulic fractures have been studied. The results indicate that the characteristics of the fracture network and the fracture geometry can affect the hydraulic fracture tratment and control the results, and in most cases provide promising results in estimating the reservoir's response to fluid injections. At the end, in one of the wells of Bangestan reservoir of Ahwaz, the conditions of hydraulic fracture were studied solely based on fracture geometry in the Sarvak Formation zones. Comparing the results with a parametric study indicates the proportion between them.

**Keywords:** Hydraulic fracture, Natural fractures, Discrete fracture network, discrete element method, 1D geomechanical model





Shahrood University of Technology

Faculty of mining, petroleum and geophysics engineering

**MSc Thesis in Rock Mechanics Engineering**

**Investigation of Natural Fractures Effect on Hydraulic Fracture  
Treatment in Fractured Reservoirs by Using Discrete Fracture Network  
(DFN) & Discrete Element Method**

By: Ali Kazemi Kiyasari

Supervisors:

Dr Majid Nikkhah

Dr Ahmad Ramezanzadeh

Adviser

Dr Nadia Shafie Zadeh

Jan 2018