Archive of SID



# مطالعه آزمایشگاهی فرآیند تزریق آب به نمونه سنگ مخزن ماسه‌ای با رویکرد اثر شکاف بر اندازه‌گیری آسیب‌دیدگی سازند

سعید عباسی*، عباس شهرآبادی، محمد حشمتی و علی اصغر قره‌شیخلو

پژوهشکده مهندسی نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پردیس پژوهش بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۲

**چکیده**

طبیعت برخی فرآیندهای انجام شـــده در ســـازند، مانند فرآیندهای تزریق آب به گونه ای است که تا حدودی، آسیب وارده ناشی از آنها به سازند، غیر قابل اجتناب می نماید. یکی از مهمترین مباحث در این موضوع، تخمین و برآورد این آسیب دیدگی در سازند می‌باشد. در این مقاله تکیه اصلی بر روی اثرپذیری پارامترهایی نظیر فشـــار و ذرات معلق در آب تزریقی است که در ادامه سعی می‌گردد اثر شکاف ایجاد شده در نمونه سنگ مخزن بواسطه پارامترهای فوق، در مدل فیزیکی از دیدگاه آسیب‌دیدگی سازند مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق با انتخاب نمونه مغزه‌های ماسه‌ای یکی از میادین نفتی ایران که در حال تزریق آب به آبده مخزن می باشد سعی گردیده مدل فیزیکی مخزن توســـط نمونه های فوق در آزمایشـــگاه شبیه‌سازی گردد. با توجه به عدم کیفیت مناسب آب و وجود املاح و ذرات بالا در آب تزریقی، بر خلاف انتظار آســـیب دیدگی محسوس در نتایج آزمایشگاهی مشاهده نگردید. هر چند کاهش نفوذپذیری نامحسوس در نمونه‌های بدون شـــکاف مشاهده شـــد اما نکته قابل توجه تغییر ساختار سنگ در هنگام تزریق و عدم افزایش فشار تزریق در نمونه‌های دارای شکاف بود. به عبارتی وجود شکافها و تغییر ساختار سنگ، به خصوص در سنگ‌های ماسه‌ای با سیمان شدگی ضعیف می تواند عاملی جهت حرکت ذرات و یا انتقال آســـیب‌دیدگی به عمق مخزن و یا اطراف چاه تولیدی باشد. از طرفی عدم یکپارچگی سنگ مخزن و نیروهای جریانی بر ذرات، جدا شدن ذرات و تغییر ساختار سنگ را به دنبال خواهد داشت که افزایش فشار تزریق را جبران نموده و شرایط یکسانی را با تغییر جریان تزریقی به همراه خواهد داشـــت. این موضوع می‌تواند تفاوت مشـــاهدات میدانی را با نتایج آزمایشگاه به همراه داشته باشد. لذا در این تحقیق با فراهم سازی شرایط اطراف چاه و ایجاد مدل فیزیکی مشابه سعی گردید به طور کیفی نیز به منشاء این تفاوت‌ها اشاره شود.

**واژه‌های کلیدی: آسیب‌دیدگی سازند، تزریق آب، کاهش نفوذپذیری، توزیع اندازه حفرات، مخزن شکاف‌دار، توزیع اندازه ذرات**

**مقدمه**

آسیب دیدگی سازند فرآیندی است که باعث کاهش توان تولید در چاه‌های تولیدی و کاهش تزریق پذیری در چاه‌های تزریقی خواهد شـــد. وجود محیط متخلخل مورد نظر که صدها تـــا چندین هزار متر زیرزمین می‌باشـــد، پیچیدگی تخمین مقدار این پارامتر را بیشـــتر نمایان می سازد، لذا در برآورد آن، از پارامترهای دیگری نظیر تغییرات نفوذپذیری، فشـــار تولیدی و یا فشار تزریقی استفاده می‌گردد. بنابراین آسیب دیدگی ســـازند معمولا بر اساس تغییر کارآیی چاه اندازه‌گیری و بررسی می‌شود.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی abbasis@ripi.ir

www.SID.ir

Archive of SID



ایـــن کار بـــا اســـتفاده از نتایـــج آنالیـــز فشـــار گـــذرا (Pressure Transient) کـــه میتواند شـــاخصی برای تغییر تراوایی دهانه چاه باشد و یا با استفاده از نتایج انواع مختلفی از آنالیز ویـــژه مغـــزه (Special Core Analysis - SCAL) که برای شبیه ســـازی فرآیند آسیب دیدگی سازند استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد.

آسیب دیدگی ســـازند می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله دلایل مکانیکی، شـــیمیایی و یا به دلایل بیولوژیکی ایجاد گردد. آنچه که در این تحقیق مورد نظر قرار گرفته شده بود آسیب دیدگی ناشـــی از یک پدیده غیر شیمیایی است که ممکن اســـت تراوایی مفید در نزدیکی دهانه چاه را کاهش دهد و می‌توان آن را به مکانیسم‌های جزئی‌تر تقسیم نمود. از جمله: مهاجرت فیزیکی و حرکت آهســـته ذرات ریزی که به صورت طبیعی در داخل مخزن تشـــکیل می‌شـــوند، انســـداد تخلخل‌ها بـــه دلیل ورود ذرات ریـــز خارجی به داخل ســـازند، جدا شدن ذرات به دلیل مقاومت پایین آنها و حرکت در محیط متخلخل، تشکیل لعاب، خمیر شدگی سنگ مخزن، اعمال فشارهای ژئومکانیکی، صدمات ناشی از مشبک‌کاری، فروریختگی و بسته شدن دهانه چاه نیز از موارد دیگر می‌باشد. یکی از مکانیسم‌های مؤثر که می‌تواند در آســـیب‌دیدگی سازند نقش مهمی داشته باشد مهاجرت ذرات ریز می‌باشد این پدیده به دلیل حرکت ذرات ریز در داخل محیط متخلخل ناشـــی از جریان سیال اتفاق می‌افتد. جریان ســـیال در داخل خلل و فرج محیط متخلخل نیروی برشـــی[1] قوی را ایجـــاد می‌کند. این نیرو باعث می‌شـــود ذرات ریـــزی که به صورت طبیعی به دیواره داخلی محیط متخلخل چســـبیده اند از جای خود کنده شوند و درحین حرکت، در گلوگاه‌های تخلخل‌ها مســـتقر شـــوند و با سد کردن این گلوگاه‌ها و بســـتن آنهـــا، باعث کاهش تراوایی شوند. همچنین ذرات ریز می‌توانند ذراتی باشند که به طور ذاتی در آب وجود دارند و یا به دلیل برهم کنش‌های شیمیایی در آب ایجاد شده باشند.

پدیـــده مهمی که در مـــورد این ذرات ریز بایســـتی به آن اشـــاره کرد این اســـت که اندازه ذرات مهاجرت کننده که باعث مســـدود کردن خلل و فرج می‌شوند و کاهش قابل ملاحظـــه‌ای در تراوایی ایجاد می‌کنند، معمـــولا از اندازه دهانه گلوگاه‌ها کمتر اســـت. مطالعات انجام شده بر روی مهاجرت ذرات ریز در داخل محیط متخلخل نشان می‌دهد. ذراتی که انـــدازه آنها حدودا ۳۰٪ بیش از اندازه گلوگاهی است که قصد گذر از آن را دارند، می‌توانند پلهای مسدود کننده پایداری را در گلوگاه مذکور ایجاد کرده و تراوایی را کاهش دهند. تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر نشان داده است که بسته به سرعت داخلی جریان سیال (خصوصا در ســـرعت‌های پایین و آرام)، ذرات با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر ۷ تا ۱۰٪ می‌توانند کمتر از قطر گلوگاه تخلخل نیز، پتانســـیل تشـــکیل پل‌های پایدار و کاهش تراوایی را داشته باشند [۱].

Liu در سال ۱۹۹٤ نشـــان داد که فشار حاصل از لایه‌های بالایـــی[2] چگونه بر مهاجرت ذرات تاثیر می‌گذارد و این‌که بســـته به قابلیت ارتجاع گلوگاه تخلخل و افزایش فشار[3]، مهاجرت ذرات در نمونه با فشـــار زیاد، نسبت به نمونه با فشار کم، شدت بیشتری به خود می‌گیرد. این مساله اغلب در ســـازندهای با تراوایی کمتر، با شدت بیشتری مشاهده می‌شود. دلیل آن هم این است که در محیط‌های با تراوایی کمتـــر، گلوگاه‌هایی با اندازه کوچک‌تـــر، فراوان‌ترند و در نهایت این سیستم‌ها تمایل بیشـــتری برای انسداد مسیرها از خود نشان می‌دهند. هر چند، مشکلات جدی و اساسی کـــه در نتیجه مهاجـــرت ذرات به وجود مـــی آیند، برای مخزن‌هایی با تراوایی بالا نیز گزارش شده است [۲].

آزمایشـــات تحت کنترلی که توســـط Selby و همکارانش انجام شد، نشـــان داد که حرکت ذرات در محیط متخلخل تحـــت تاثیر عواملی همچون، مقدار اولیه ذرات موجود در محیط متخلخل، دبی ســـیال، اندازه و شکل دانه‌های ماسه، اندازه و چگالی ذرات و مقدار فشـــار اعمال شده می‌باشد [۳].

یکی دیگر از مکانیســـم‌های موثر که محققین زیادی نیز در مورد آن مطالعاتی انجام داده‌اند ورود ذرات جامد به محیط متخلخل است.

1. Shear Force
2. Overburden Pressure
3. Stress

www.SID.ir

Archive of SID



آنچه که توسط بسیاری از محققین به آن اشاره می‌شود این است که، مکانیسم ورود ذرات جامد موجود در سازند و همچنین ذرات خارجی به محیط متخلخل را میتوان شبیه به بخشی از سازند دانست که بلافاصله بعد از دهانه چاه قرار گرفته است و مانند یک فیلتر بزرگ عمل میکند. در بسیاری از مواقع و برای سازندهایی با تخلخل و تراوایی متوسط، بخش عمده ذراتی که به سازند وارد می‌شوند، در ناحیه‌ای نزدیک به نقطه ورودی که معمولاً دورتر از ۱ cm نیست، فیلتر می‌شوند. این پدیده به طور مفصل توسط مطالعات آزمایشگاهی و عملیاتی بسیار زیادی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است. ازجمله محققینی که دراین مورد تحقیق کرده‌اند افرادی همچون Davidson [٤]، Rochon [٤]، Francis [٤]، Zhang [٤] و Eleri [٤] را می‌توان نام برد [٤-٩]. اما آنچه که در این تحقیق نیز به آن می‌پردازیم این است که ورود ذرات خارجی یا ذراتی که به‌صورت طبیعی در سازند وجود دارند، در سازندهایی با تراوایی بسیار بالا میتواند مشکل سازتر بوده و تا عمق بیشتری نفوذ کنند که البته در نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده نبوده و یا نتایج ممکن است تحلیل نادرستی را برای محقق به همراه داشته باشد. برای مثال سازندهایی با نواحی‌های ترک خورده زیاد، سازندهای دارای حفرات و ماسه سنگ‌های سیمانی نشده، از جمله سازندهایی هستند که با این مشکل روبرو می‌باشند.

از دیگر عواملی که باعث نفوذ بیشتر ذرات می‌شود اعمال فشار بیش از مقدار تعادل[1] به لایه‌ای با تراوایی کم و همگون است. معمولاً اگر تراوایی سازند از مقدار mD ۷۵۰ یا فشار بیش از مقدار تعادل از Mpa ۷ بیشتر شود، پتانسیل لازم برای هجوم عمیق‌تر ذرات به وجود می‌آید [۱۰-۱۲] چنان‌که در این تحقیق و در نتایج آزمایشگاهی، افت نفوذپذیری محسوسی در آزمایشات مشاهده نگردید و یکی از دلایل این موضوع نفوذپذیری بالا در نمونه‌ها می‌باشد. نکته اصلی که در اینجا مفصلاً مورد بحث قرار می‌گیرد، تاثیر شکاف‌ها در انتقال ذرات می‌باشد به طوری‌که شکاف‌های موجود درون مخزن می‌توانند ذرات را به اعماق مخزن انتقال دهند. Kwan و همکاران تلاش کردند که کاهش تراوایی که توسط مهاجرت ذرات ریز[2] صورت می‌پذیرد را در نمونه مغزه‌ای که از سازند Clearwater میدان Cold Lake واقع در ایالت Alberta کشور کانادا تهیه شده بود، به صورت کمی بیان کنند. آنها مشاهده کردند که با تزریق متناوب یون NaCl یا $CaCl_2$ و آب، تراوایی مطلق این مغزه‌ها (که عموما بین ۱ تا D ۳ بود)، تقریبا تغییر نمی‌کند [۱۳] .

در مقابل این تحقیقات می‌توان به مطالعات جامی الاحمدی و همکارانش در فوریه ۲۰۰۲ اشاره داشت. هدف این مطالعه، بررسی جنبه‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی آسیب‌هایی است که به دلیل حرکت و به دام افتادن ذرات معلق و تشکیل رسوب به سازند وارد می‌شود. این مطالعه، کاهش تراوایی را نتیجه پارامترهای غلظت ذرات جامد، دبی جریان و تراوایی اولیه محیط متخلخل دانسته است. مضاف بر این که محیط‌هایی با تراوایی پایین در برابر هجوم ذرات جامد حساس‌ترند و آسیب بیشتری در نتیجه وجود این ذرات به آنها وارد می‌شود. آنها در ادامه تحقیقاتشان آسیب‌های وارد شده به سازندهای ایران را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نکته مهم دیگری که از نتایج آنها به دست آمد این است که کاهش تراوایی و آسیب به سازند در نواحی مجاور به نقطه تزریق بیشتر اتفاق می‌افتد و این مساله در نواحی دور از نقطه تزریق از اهمیت کمتری برخوردار است. این در حالی است که آنها اثر شکاف و یا تغییر ساختار محیط متخلخل را که بیشتر در محل تزریق به وجود می‌آید را در نظر نگرفته و برای محیط‌های بدون شکاف این موضوع را مورد بررسی قرار دادند [١٤ و ١٥].

در ادامه می‌توان به نتایج قابل توجه Todd و همکارانش اشاره داشت. آنها آزمایشات خود را بر روی سه جنس مختلف سنگ مخزن انجام دادند و نتایج آنها نشان داد که حتی در سیستم‌های خیلی رقیق نیز ذرات غیر آلی می‌توانند صدمات قابل توجهی به تراوایی سازند وارد سازند. آنها همچنین مشاهده کردند که کاهش تزریق‌پذیری که با آزمایش بر روی مغزه پیش‌بینی شده بود، در مقیاس میدانی دیده نشد، که این امر ممکن است به دلیل وجود شکاف‌ها در سطح دهانه چاه باشد.

1. Overbalance Pressure
2. Fine Migration

www.SID.ir

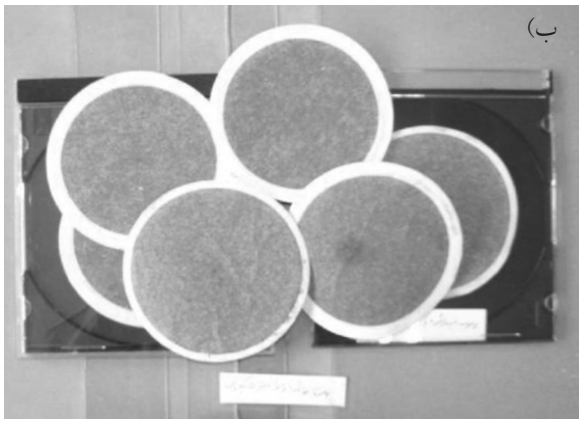
Archive of SID



آنها در تحقیقات دیگری دریافتند که: (۱) آسیب کلی به اندازه متوسط گلوگاه‌های خلل و فرج محیط متخلخل بستگی دارد؛ (۲) ذرات با اندازه کمتر به کل مسیر پیموده شده آسیب می‌رسانند؛ (۳) هر چه اندازه ذرات افزایش می‌یابد، آسیب وارده به مرور به قسمت‌های بیرونی مغزه منتقل شده و به شکل تشکیل لایه رسوب می‌باشد [۱۶]. هر چند Todd و همکارانش اثر شکاف را محتمل فرض نمودند اما در این مطالعه ما با انتخاب مغز ه‌های واقعی در شرایط مخزن و همراه با شکاف‌های ریز، عدم کاهش نفوذپذیری و عدم افزایش فشار تزریق را کاملا مشاهده نمودیم که میتواند معرف حالت تزریق در دهانه چاه باشد.

**نمونه آب تزریقی:** در این آزمایشات از نمونه آب تزریقی یکی از میادین نفتی کشورمان ایران استفاده شده است. نمونه آب تزریقی شامل آب تولیدی و جداشده از نفت بوده و در خروجی از واحد نمک‌زدایی میدان مورد نظر گرفته شده است. چنان‌که در شکل ۱ نشان داده شده، نمونه آب فیلتر شده توسط فیلترهای ۵ و ۱۰ میکرونی با آب فیلتر نشده با هم مقایسه شده و رسوبات روی فیلتر، بالا بودن ذرات در آب را نشان می‌دهند که البته نشان دهنده آن است که عمده ذرات، قطری بیشتر از ۱۰ μm دارند. آنچه که انتظار می‌رود آن است که آب مورد نظر می‌تواند باعث گرفتگی شدید حفرات شده و آسیب سازند را ایجاد و تشدید نماید. نتایج میدانی تزریق در چند چاه نشان می‌دهد که بر خلاف انتظار افزایش شدیدی را در فشار تزریق پذیری نشان نداده و گرفتگی حفرات در اطراف چاه‌های تزریق، مسئله حادی را ایجاد نکرده است. در ادامه آنالیز آب تزریقی نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه آب تزریقی دارای pH برابر ۵/۵ است. چنان‌که مشخص است میزان ب‌الای ذرات نشان دهنده کیفیت نامطلوب آب است که در تعدادی از نمونه ها مقدار TSS[1] مقادیر بالاتری را نشان داد. بنابراین کیفیت نامطلوب آب تزریقی در نمونه‌ها کاملا مشخص است. بالا بودن آهن نیز به دلیل محصولات خوردگی در سیستم بوده است. لازم به ذکر است بالا بودن سولفید هیدروژن می‌تواند تولید سولفید آهن نموده که به عنوان یکی از املاح در آب میتواند برای چاه تزریقی مشکل رسوب و در نتیجه کاهش تزریق‌پذیری را به دنبال داشته باشد.

شکل ۲ تاریخچه تزریق در یکی از چاه‌های این میدان را نشان می‌دهد همان‌گونه‌که در شکل مشخص شده است درسال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با وجود افزایش جریان تزریق، فشار تزریق افزایشی را نشان نداده و در این حالت می‌توان گفت تزریق پذیری چاه بهبود یافته است. حتی در این حالت فشار تزریقی نسبت به سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ مقادیر کمتری را نشان می‌دهد این در حالی است که جریان تزریقی بیش از دو برابر شده است.




**شکل ۱**- الف) سه نوع آب مورد استفاده در این مقاله که به ترتیب از راست به چپ، آب فیلتر شده، آب فیلتر شده با صافی ۵ μ و آب فیلتر شده با صافی ۱۰ μ ب) فیلترهای استفاده شده و ذرات جدا شده بر روی آنها

1. Total Suspended Solids

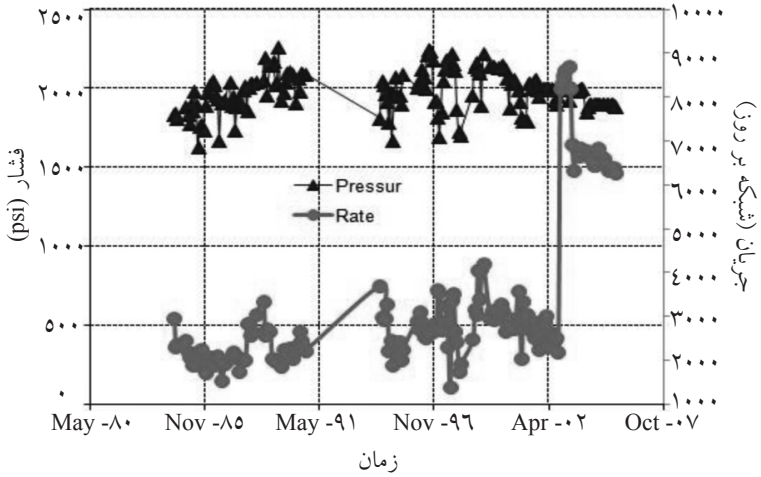
www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۱**- ترکیب آب تزریقی

| ترکیب | غلظت (mg/lit) |
|---|---|
| اکسیژن محلول | < ۱ |
| TDS | ۱۲۷۲٤۰ |
| TSS | ۱۳۰۰ |
| قلیائیت | ۱۷۰ |
| سولفات | ۲۲۳ |
| سولفیت | < ۲ |
| سولفید | ۸/٤ |
| کلسیم | ۸۰۰۰ |
| باریم | ۱/٦ |
| استرانسیم | ٤۱۰ |
| آهن | ۲۳ |
| سدیم | ۳٦۰۰۰ |
| لیتیم | ۷/۵ |




**شکل۲** – تاریخچه آب تزریقی در یکی از چاه‌های تزریقی میدان مورد نظر

سئوالی که در این قسمت با آن مواجه می‌شویم این است که آیا شرایط فوق می‌تواند برای چاه‌های تزریق ادامه یابد و عدم آسیب دیدگی را در میدان و یا چاه‌های تولیدی به دنبال نخواهد داشت؟ نکته دوم دلیل عدم پاسخ چاه به کیفیت پایین آب بوده و آیا صرفا این موضوع برای همیشه ادامه خواهد داشت و مشکلی را در تزریق پذیری چاه ایجاد نخواهد کرد؟

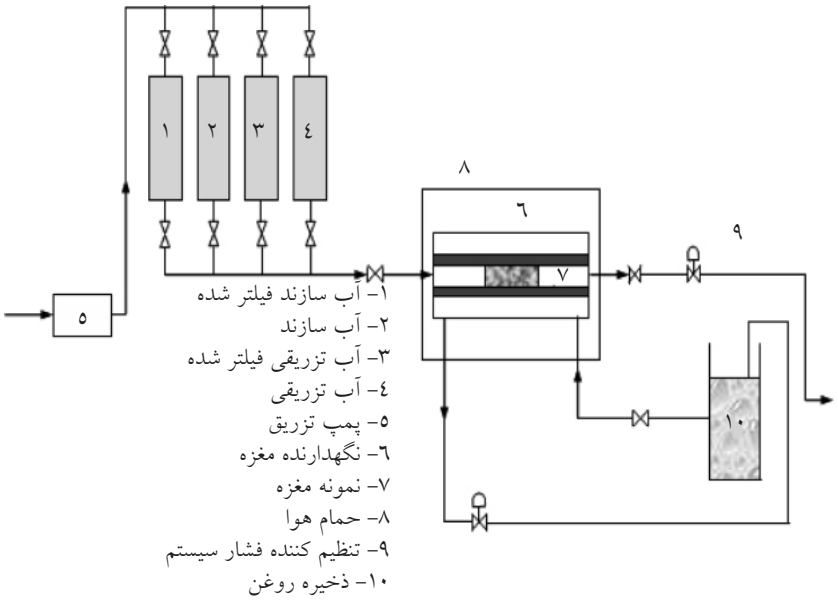
**سیستم تزریق به مغزه**

برای بررسی دقیق‌تر اثر آب تزریقی بر روی نمونه مغزه‌های مورد نظر سعی گردیده اثر ساختار سنگ مخزن و وجود شکاف در سنگ مورد بررسی قرار بگیرد. دراین تحقیق بااستفاده ازسیستم تزریق، آزمایشات تزریق به مغزه‌ها انجام شد. این دستگاه دارای مشخصات بارزی است که می‌تواند تحت شرایط مخزن از نظر درجه حرارت و فشار، عمل تزریق سیال را انجام دهد. با توجه به طراحی دستگاه، می‌توان در آزمایشگاه به روش‌ها و مدل‌های مختلف سیلابزنی روی مدل‌های فیزیکی (سنگ آهک ـ ماسه سنگی) مختلف پرداخت. به‌طور کلی دستگاه فوق از دو قسمت اصلی پمپ تزریق و مغزه نگهدارنده تشکیل شده است. در شکل ۳ نمای پمپ تزریق همراه با سایر تجهیزات جانبی آن نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل۳**- شماتیک سیستم تزریق آب به درون مدل فیزیکی به همراه وسایل جانبی

پمپ تزریق، سیلندرهای ذخیره سیال تزریقی، سیستم مغزه نگهدار، سیستم اعمال فشار و سایر تجهیزات جانبی از قسمت‌های دیگر سیستم تزریق می‌باشند که در شکل نشان داده شده‌اند.

### آزمایشات تزریق به مغزه

به دلیل عملیات تزریق میدانی لایه ماسه‌ای در این مطالعه نیز سعی شده از لایه ماسه ای مذکور نمونه‌های مناسبی جهت تزریق در آزمایشگاه استفاده می‌شود. خصوصیات نمونه‌های تهیه شده در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه‌که بیان شد عملیات تزریق آب در لایه ماسه‌ای میدان بوده که قسمتی از آبده میدان را تشکیل می‌دهد لذا خصوصیات نمونه سنگ‌ها به عنوان نماینده‌ای از لایه مورد نظر در آزمایشات به کار گرفته می‌شود.

آنچه که تحقیقات و مطالعات نشان داده، آسیب دیدگی سازند به دلیل اثرات مکانیکی و شیمیایی به طور همزمان، باعث پیچیدگی این فرآیند گردیده است. عوامل زیاد، متنوع و بسیار پیچیده‌ای در تشکیل رسوب دخالت دارند. یکی از مسایل قابل توجه در عملکرد فرآیند تزریق آب، شکافهای داخل مخزن می‌باشند. این شکاف‌ها علاوه بر تاثیر بر عملکرد فرآیند جابه‌جایی، می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در چگونگی اثرپذیری آسیب‌دیدگی سازند داشته باشد. هنگامی‌که چاه‌های تزریقی با این شکاف‌ها برخورد داشته و یا دانسیته این شکاف‌ها در اطراف چاه‌های تزریقی زیاد باشد به‌دلیل پاسخ مناسب چاه، تخمین و پیش‌بینی مسئله آسیب دیدگی سازند و کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن پیچیدگی بیشتری پیدا خواهد کرد. این موضوع اهمیت تصفیه[1] آب تزریقی و مطالعه جامع‌تر در زمینه اندازه ذرات و حفرات در مخزن و چگونگی توزیع ذرات و شکافها را بیشتر نشان می‌دهد. در این تحقیق هدف اصلی بررسی میزان اثرپذیری پارامترهای مخزن بر آسیب‌دیدگی سازند در فرآیند تزریق آب می‌باشد. آزمایشات بر روی نمونه سنگ‌های ماسه‌ای یکی از مخازن بزرگ ایران که در حال تزریق آب می‌باشد انجام شد. سیمان شدگی ضعیف در نمونه سنگ‌های لایه مورد نظر و وجود شکاف‌های ریز در نمونه‌ها از یک طرف و کیفیت نامطلوب و بالا بودن املاح در آب تزریقی از طرف دیگر، نتایج جالبی را در پی داشت. همچنین از نمونه آب تزریقی به مخزن فوق نمونه‌گیری به عمل آمد که بتوان به شرایط نزدیکتری به مدل فیزیکی مخزن دست یافت. در این بخش سعی گردیده نتایج این مشاهدات به‌طور جداگانه اشاره و بررسی گردد.

1. Treatment

www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۲**- خواص نمونه‌های مغزه به کار رفته در آزمایشات تزریق آب

| حجم تخلخل (cc) | نفوذپذیری (md) | تخلخل (٪) | وزن (gr) | قطر (cm) | طول (cm) | مغزه شماره. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۲/۱۳ | ۳۸۹ | ۲۲/۰۷ | ۱۱۷/٤۳ | ۳/۷٤۷ | ۵/۳۹۲ | ۱ |
| ٤۲/۱٤ | ۳٤۹ | ۲۵/۰۷ | ۱۱۹/۳٤ | ۳/۷۵۲ | ۵/۲۰۵ | ۲ |
| ۳۵/۱٤ | ۵۱۲ | ۲٦/٤۸ | ۱۱۰/۰۵ | ۳/۷٤۷ | ۵/۱۹۰ | ۳ |
| ۲۷/۱۵ | ۳٤۰ | ۲۷/۰۲ | ۱۱۰/۳٤ | ۳/۷۵٦ | ۵/۱۰۵ | ٤ |
| ۹۰/۱۳ | ٤۵۹ | ۲۳/۸۹ | ۱۱٤/۲۷ | ۳/۷٤٦ | ۵/۲۸۲ | ۵ |

همچنین سناریوی اصلی در این تحقیق مشاهده اثر املاح و ذرات در آب است که می‌تواند بر روی تزریق پذیری چاه تاثیر منفی ایجاد نمایند.

**تاثیر فشار در اطراف چاه تزریقی در لایه‌های ماسه‌ای**

در این قسمت پس از آماده‌سازی مدل فیزیکی با نمونه مغزه شماره ۱ سعی گردید شرایط آزمایش در دمای ۸۰ °C و فشار سیستم ۱۵۰ bar در نظر گرفته شود. در مرحله ابتدایی، پس از تزریق آب سازند فیلتر شده و ایجاد شرایط پایدار، تزریق نمونه آب تزریقی با شدت جریان ۲cc/hr آغاز گردید. نکته قابل توجه افزایش فشار پس از تزریق ۱ تا ۲ PV[1] و افت ناگهانی فشار تزریق و رسیدن به شرایط پایدار بود چنان‌که در شکل ٤ نشان داده شده است این افزایش محسوس اولیه قابل مشاهده است. سپس شدت جریان به ٤ cc/hr و ٦ cc/hr و ۱٦ cc/hr افزایش یافت، چنان‌که نتایج نشان دادند و در شکل ٤ نیز مشخص است هیچ افزایش فشار تزریقی در مراحل بعدی مشاهده نگردید، به‌طوری‌که پس از تزریق ۱۵ PV تغییر چندان محسوسی در نفوذپذیری مغزه مشاهده نشد. پس از توقف و بررسی سیستم، خرد شدگی و تغییر در ساختار سنگ مخصوصا در محل تزریق مشاهده گردید. شکل ۵ قبل از خارج شدن از مغزه نگهدار نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود فشار تزریقی و جریان سیال باعث ایجاد تغییر در ساختار سنگ و ایجاد شکافهای ریز در دهانه سنگ نموده است. شکل ٦ نمونه مغزه شماره ۱ را پس از خارج شدن از مغزه نگهدار نشان می‌دهد. بدون تردید عدم مقاومت سنگ مخزن و سیمان شدگی ضعیف ذرات تشکیل دهنده سنگ مخزن در بروز این پدیده کاملاً مؤثر بوده است. این مدل می‌تواند حرکت سیال در دهانه چاه و هنگام ورود به محیط متخلخل را نشان دهد.

به‌طوری‌که در سنگ‌های ماسه‌ای با سیمان شدگی ضعیف این تغییر می‌تواند به گونه ای انجام گیرد که ورود سیال به محیط متخلخل را آسان نماید و به صورت کانال‌هایی برای حرکت سیال به درون محیط متخلخل باشد. هر چند این موضوع می تواند در مراحل اولیه تزریق باعث عدم افزایش فشار تزریق گردد اما در صورت عدم تصفیه مناسب آب تزریقی و در صورت وجود املاح در درون آن می‌تواند در طولانی مدت باعث افت نفوذپذیری در نقاط دورتری از چاه تزریقی شود. لذا هر چند نتایج فوق نمی‌تواند آسیب دیدگی در محیط متخلخل و در عمق مخزن را نشان دهد اما می‌تواند بازتابی از محیط اطراف چاه در لایه‌های ماسه ای باشد که ناپایداری اطراف چاه تزریق می‌تواند عامل موثری در حرکت ذرات در محیط متخلخل باشد.

**تاثیر شکاف در چگونگی اثر پذیری آسیب دیدگی سازند**

در این آزمایش از نمونه مغزه شماره ۲ استفاده گردید. همان‌گونه‌که در جدول ۲ بیان شده است مقدار نفوذپذیری این نمونه در حدود ۳٤۹ md اندازه‌گیری شده است. در این قسمت پس از آماده‌سازی نمونه سنگ و شستشو و اشباع آن، سیستم در شرایط دمایی ۸۰ °C قرار گرفت.

در ابتدا ۱/۵ PV آب سازند فیلتر شده با شدت جریان ۱/۵ cc/hr در شرایط فشار ۵۰ bar به درون مغزه شماره ۲ تزریق شد. پس از ایجاد شرایط پایدار، آب تزریقی مورد نظر در شدت جریان‌های متفاوت تزریق گردید. نکته قابل توجه عدم افزایش فشار تزریقی و عدم کاهش در نفوذپذیری سنگ می‌باشد. شکل ۷ شکاف ایجاد شده در سنگ مخزن پس از تزریق نشان داده شده است.

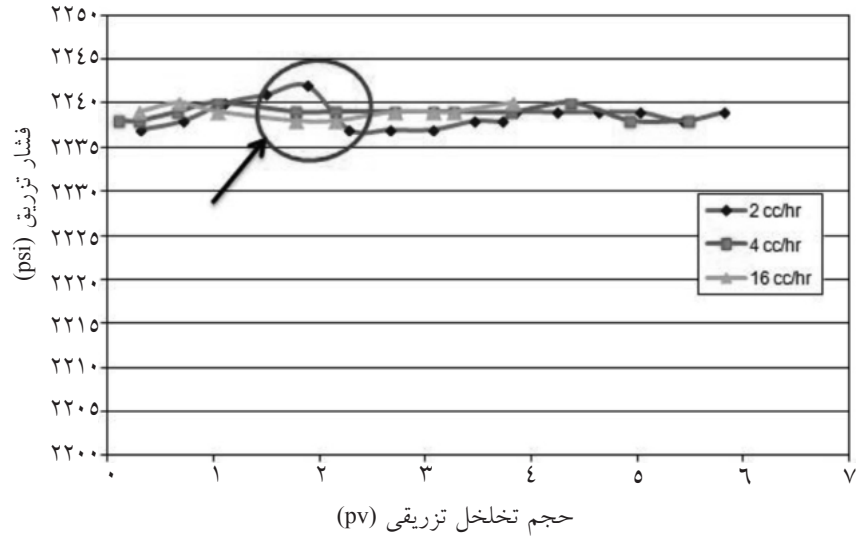
آزمایش دیگری با نمونه مغزه شماره ۳ انجام گرفت. مشخصات این نمونه مغزه در جدول ۲ آمده است.

1. Pore Volume

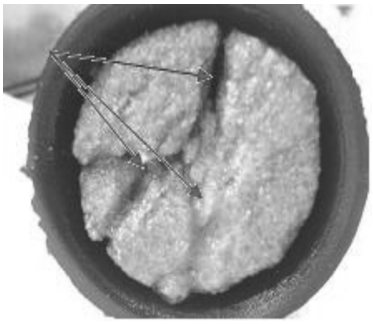
www.SID.ir

Archive of SID

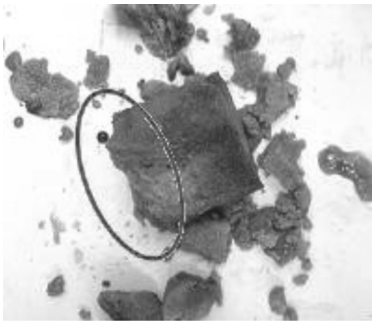




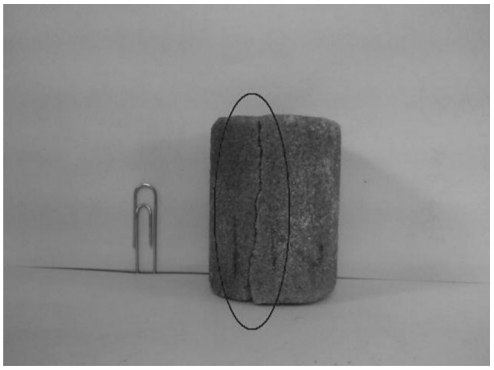

**شکل ٤**- تغییرات فشار تزریق با تزریق آب به درون مغزه شماره ۱



**شکل ٥**- خرد شدگی و تغییر در ساختار سنگ در محل تزریق آب نمونه مغزه شماره ۱



**شکل ٦**- نمونه خارج شده مغزه شماره ۱ پس از انجام عملیات تزریق از درون مغزه نگهدار



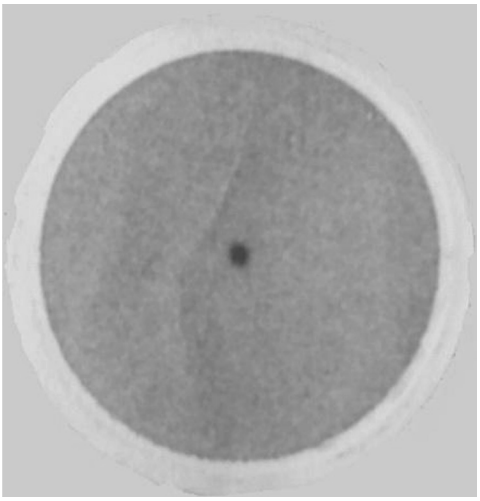
**شکل ۷**- شکاف ایجاد شده در مغزه شماره ۲ بعد از عملیات تزریق آب

در ایـــن آزمایش نیز به دلیل دارا بودن شـــکاف ریز و عدم مقاومت سنگ و همچنین سیمان شدگی ضعیف، علاوه بر شسته شـــدن مغزه در محل ورود آب به درون آن، شکاف ایجاد شـــده بر روی نمونه مغزه عدم کاهش نفوذپذیری را باعث گردیده است. لذا افزایشی در فشار تزریق نیز مشاهده نگردید. شـــکل ۸ شکاف ایجاد شده بر روی نمونه فوق را بعد از عملیات تزریق نشان داده است. نکته قابل توجه در این مشـــاهدات این بود که با ادامه آزمایش و افزایش دبی جریان آب تزریقی، شرایط تزریق‌پذیری برای نمونه بهبود یافته اســـت که شسته شدگی ســـنگ در محل تزریق این موضوع را تایید می‌نماید. شکل ۹ آب تزریقی خارج شده از نمونه سنگ را نشان می‌دهد. چنان که در شکل مشخص شـــده ذرات ته نشین شده نشان می‌دهد ذرات و املاح در آب تزریقی قابلیت حرکت در محیط متخلخل و شـــکاف را داشـــته و آسیبی را نشـــان نمی‌دهند با مقایسه شکل که املاح فیلتر شـــده در خروجی از نمونه سنگ مخزن بوده با فیلتراسیون آب تزریقی در شکل میتوان این موضوع را بیان داشت که عمده ذرات از شکاف و منافذ عبور کرده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID

**شکل ۸**- شکاف ایجاد شده در مغزه شماره ۳ بعد از عملیات تزریق آب درون مغزه نگهدار



**شکل ۹**- سمت چپ: ذرات و املاح ته نشین شده در آب تزریقی خارج شده از نمونه مغزه تحت تزریق قرار گرفته، سمت راست:ذرات و املاح گرفته شده توسط فیلتر پس از فیلتراسیون آب تزریقی

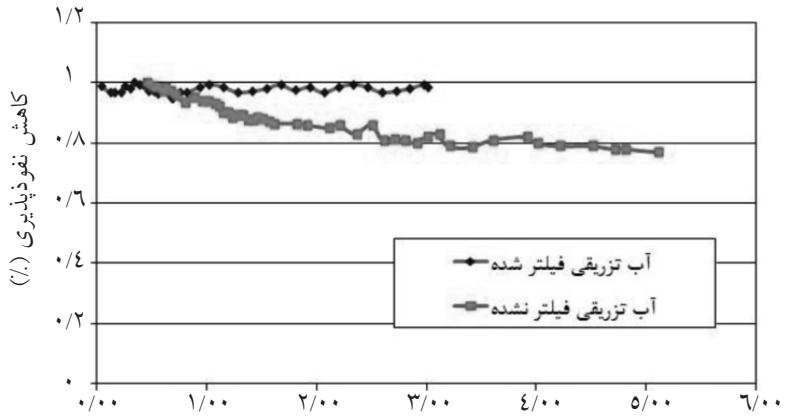
**فرآیند تزریق آب در نمونه مغزه ماسه ای بدون شکاف**

در اینجا سعی گردید مدل فیزیکی ایجاد شده نمایانگر محیط متخلخل در مخزن باشد به‌طوری‌که در مغزه مورد نظر اثری از شکاف مشاهده نگردد. نمونه مغزه شماره ٤ با خصوصیات مطابق جدول ۲، برای آزمایشات تزریق انتخاب گردید. در این قسمت برای حفظ ساختار مغزه و سیمان شدگی بین ذرات ماسه، سیستم تزریق را تحت فشار ۲۰ bar و با شرایط دمایی ۸۰ °C قرا می‌دهیم. در این آزمایش پس از تزریق آب فیلتر شده سازند و ایجاد شرایط پایدار، تصمیم گرفته شد آب تزریقی مورد نظر در دو حالت فیلتر شده و فیلتر نشده با هم مقایسه شده و تاثیر مواد معلق جامد در کاهش نفوذپذیری مورد بررسی قرار گیرد. آن‌چنان‌که پیش بینی شده بود آب فیلتر شده توسط فیلتر ۰/٤٥ µm که با شدت جریان ٤ cc/hr به مغزه تزریق گردید، افت محسوسی را در نفوذپذیری نشان نداد. هرچند تغییرات اندکی در شرایط پایدار مشاهده شد، اما می‌توان در مقایسه با آب فیلتر نشده این تغییرات را ناچیز فرض نمود. درادامه نیز آب تزریقی فیلتر نشده با شدت جریان ٤ cc/hr به مقدار بیش از ۵ PV به مغزه تزریق گردید که اندازه‌گیری نفوذپذیری ۲۰٪ کاهش را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ کاهش نفوذپذیری و مقایسه آب‌های تزریقی فیلتر شده و فیلتر نشده در آزمایش فوق را می‌توان مشاهده نمود. این کاهش با توجه به نوع سنگ مخزن که تفاوت آن در لایه‌های آسماری کاملا مشاهده می‌گردد و همچنین نوع سیال تزریقی از نظر تعداد و بزرگی ذرات می‌تواند متفاوت باشد. در نهایت به طور کلی فیلتراسیون آب‌های تزریقی تاثیر زیادی را در کاهش ذرات معلق جامد و مواد نفتی و یا مواد آلی جامد نشان می‌دهند. هم‌چنان‌که در شکل ۱۰ مشخص است با ادامه تزریق کاهش نفوذپذیری با شیب کمتر ادامه پیدا خواهد کرد و این به دلیل گرفتگی حفرات کوچک‌تر در ابتدای فرآیند است.

www.SID.ir

Archive of SID

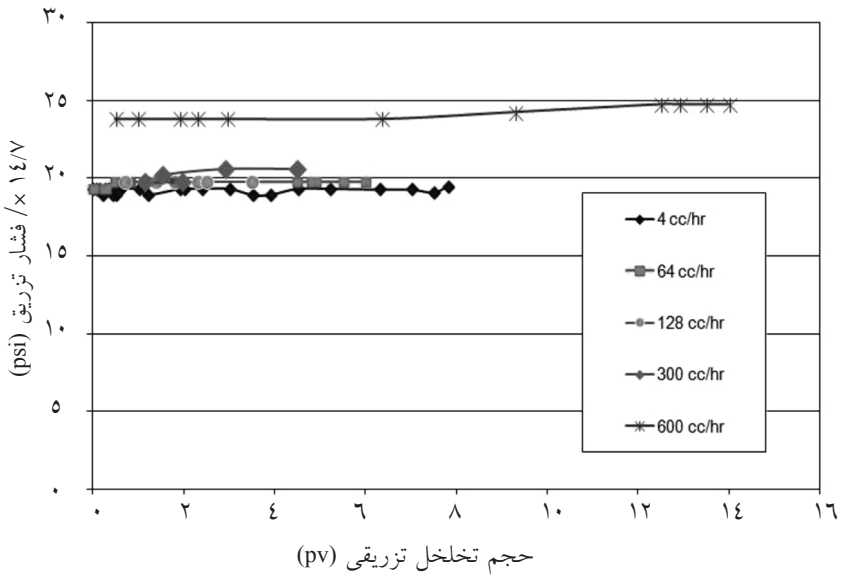





**شکل ۱۰**- مقایسه اثر آب تزریقی با آب فیلتر شده توسط فیلتر ۰/٤٥ میکرونی بر کاهش نفوذپذیری بر روی مغزه شماره ٤ با شدت جریان ٤ cc/hr

**اثر شدت جریان‌های زیاد در نمونه مغزه به‌همراه شکاف**

در ایـــن بخش، مغزه نمونه ۵ با خصوصیاتی مطابق جدول ۲ برای آزمایش تزریق انتخاب گردید. دراین تست پس از آماده سازی مغزه شـــماره ۵، تزریق اولیه آب سازند فیلتر شـــده برای ۲ hr با شدت جریان ٤ cc/hr انجام شد. سپس فرآیند تزریق نمونه آب تزریقی از شـــدت جریان ٤ cc/hr آغاز گردید و با افزایش شدت جریان سعی گردید تغییرات نفوذپذیری ســـنگ مخزن مورد ارزیابی قرار گیرد. در این آزمایش به دلیل پایین بودن مقاومت سنگ و سیمان شدگی ضعیف آن علاوه بر شســـته شـــدن سنگ درمحل تزریق و بهم خوردگی ساختار سنگ در محل تزریق، اثر شکاف در همان مراحل اولیه تزریق خود را نشـــان داد هم‌چنان‌که در شکل ۱۱ نشان داده شده است تاثیر این شکاف به صورتی بود که تا ٦۰۰ cc/hr اثر محسوسی در تغییر نفوذپذیری و یا فشار تزریقی مشاهده نگردید. باید توجه نمود که افزایش در شدت جریان ٦۰۰ مطابق رابطه دارسی می‌بایست بسیار بالاتر از مقدار در شـــکل ۱۱ باشـــد. شکل ۱۲ نمونه مغزه را بعـــد از فرآیند تزریق و در محل تزریق نشـــان می‌دهد. همچنین در شـــکل ۱۳ شکاف ایجاد شده در بعد از فرآیند تزریق را نشان می‌دهد.

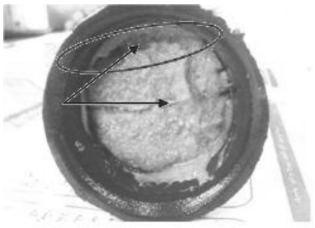



**شکل ۱۱**- تاثیر افزایش شدت جریان آب تزریقی بر تغییرات فشار تزریق

www.SID.ir

Archive of SID





**شکل۱۲**- نمونه مغزه شماره ۵ بعد از عملیات تزریق در محل تزریق

**شکل۱۳**- نمونه مغزه شماره ۵ بعد از عملیات تزریق خارج شده از مغزه نگهدار

با توجه به مشـــاهدات اولیه بر روی ســـنگ و عدم تغییر در فشـــار تزریقی احتمال وجود شـــکاف در سنگ کاملاً مشخص می‌باشد. اما آنچه که در این بخش می‌توان به آن اشاره داشت این است که وجود شکاف‌ها در محل تقاطع با چاه‌های تزریقی، مخصوصاً در لایه‌هایی با نفوذپذیری و تخلخل بالا، باعـــث می‌گردد کاهش نفوذپذیری و افزایش تزریق در مراحل اولیه تزریق نشان داده نشود و این موضوع برای بســـیاری از مهندســـین به معنای عدم آسیب‌دیدگی ســـازند و تزریق‌پذیری مناســـب آب و یا ســـازگاری آب تزریقی با مخزن به شـــمار برود، که می‌تواند این فرضیات باعث پیش‌بینی‌های نادرستی در فرآیند تزریق آب گردد.

## نتیجه‌گیری

بر اســـاس مطالعات انجام گرفته و مشاهدات آزمایشگاهی می توان نکات زیر را عنوان داشت:

- بـــالا بودن نفوذپذیـــری و تخلخل در ســـنگ مخزن از عواملی اســـت که می‌تواند تاثیر عمده‌ای در حرکت ذرات جامد و املاح در محیط متخلخل داشـــته باشد به‌طوری‌که کاهش نفوذپذیری محسوسی مشاهده نگردد. این موضوع می‌تواند بســـتگی به اندازه حفرات جامـــد و توزیع اندازه حفرات داخل سنگ مخزن داشته باشد.

- افزایـــش فشـــار تزریق و شـــدت جریـــان تزریقی در سازندهای ماسه ای با مقاومت سیمان پذیری کم می‌تواند باعث بهم خوردگی ســـاختار سنگ در محل تزریق شده و با ایجاد شکاف‌های ریز و کانال‌هایی موجب حرکت املاح در محیـــط متخلخل گردد. بدون تردید ذرات با حرکت در محیط متخلخل در مکان‌هایی دورتر از چاه تزریقی توانایی ته‌نشینی و کاهش نفوذپذیری سازند را خواهند داشت که البته در صورت ارتباط با چاه‌هـــای تولیدی احتمال ایجاد مشکلاتی را برای تولید ایجاد می‌نماید.

- به‌طور کلی در فرآیند تزریق، در موارد مشابه فوق جهت تخمین نفوذپذیـــری دو پدیده در تقابل خواهند بود، یکی تغییر ســـاختار محیط متخلخل (ایجاد شـــکاف، جدا شدن ذرات، بهم خوردگی محیط متخلخل و ...) که باعث بهبود تزریق‌پذیری میگردد و دیگری آسیب فیزیکی و یا شیمیایی آب تزریقی در ســـنگ مخزن است که کاهش نفوذپذیری را به همراه دارد. در نهایت در شـــرایط مشـــابه که در این تحقیق به آن اشاره شد علی رغم کیفیت نامناسب آب، عدم آسیب سازند در اطراف چاه پیش بینی خواهد شد و این به دلیل مقاومت پایین سنگ در مقابل پدیده تغییر فیزیکی در محیط متخلخل است.

- به‌دلیل فشـــار تزریق و بهم خوردگـــی[1] در محل تزریق بیشترین نیروهای وارد (نیروهای درگ) بر ذرات که باعث جدا شـــدن ذرات و تغییر ساختار سازند می‌گردد در محل تزریق و به عبارتی اطراف چاه تزریق ایجاد می‌گردد.

- مقایسه نتایج مغزه شماره ۲ و ٤ که از لحاظ خصوصیات مشـــابه می‌باشـــد نشـــان می‌دهد اکثر املاح عبور کرده از مغزه شـــماره ۲ از میان شـــکاف ایجاد شـــده بوده چرا که در مغزه شـــماره ٤ که بدون شـــکاف بود آب فیلتر نشده کاهش محسوسی را در نفوذپذیری نشان داد. لذا وجود شـــکاف‌ها در محل چاه‌های تزریقی یکی از عوامل موثر در انتقال ذرات و املاح درون آب به عمق مخزن می‌باشد. ایـــن پدیده باعـــث می‌گردد در ســـال‌های اولیـــه تزریق، تزریق‌پذیری مطلوبی در چاه مشاهده گردد. اما در صورت

1. Turbulency

www.SID.ir

Archive of SID



عدم جداسازی املاح و رسوبات درون آب و عدم تصفیه صحیح آب تزریقی، این املاح در نقاط غیر قابل دسترس در مخزن رسوب کرده و افت نفوذپذیری در مخزن را ایجاد خواهند کرد. این مسئله با افزایش ناهمگونی مخزن حادتر خواهد شد که در طولانی مدت اثر خود را نشان خواهد داد.

– در صورت عمیق بودن شکاف‌های داخل مخزن و نفوذپذیری مناسب سنگ مخزن، به همراه ارتباط شکاف‌های چاه‌های تزریقی با چاههای تولیدی، املاح و یونها توانایی نزدیک شدن به چاه‌های تولیدی را داشته و با ایجاد رسوب نزدیک چاه تولیدی افت فشار در این چاه‌ها را ایجاد خواهند کرد. حرکت این املاح در نقاط مختلف مخزن می تواند باعث تغییر ساختار یونی آب گردد و با افت فشار در چاه تولیدی احتمال رسوب در این چاه‌ها را نیز افزایش دهد. بدون تردید شکاف‌های داخل مخزن کمک شایانی در ارتباط چاههای تزریقی و تولیدی خواهد داشت و پدیده رسوب گذاری در چاه‌های تولیدی را سریع‌تر نشان خواهد داد.

با توجه به نکات عنوان شده بررسی ارتباط شکاف‌ها در مخزن و ارتباط آنها با چاههای تزریقی و تراکم شکاف‌ها در اطراف چاه تزریقی، از نکات مهمی می‌باشد که در هنگام فرآیند تزریق باید به آن توجه نمود. در این میان توزیع اندازه حفرات داخل مخزن و املاح و ذرات در آب تزریقی به همراه ناسازگاری آب تزریقی و آب سازند و همچنین شدت جریان مناسب تزریق با توجه به مقاومت سنگ و نوع ساختار آن، از جمله پارامترهای محدود کننده می‌باشد که نقش موثری در چگونگی فرآیند تزریق آب خواهد داشت.

## مراجع


[1]. Bennion D.B. and Thomas F. 8., *Injection water quality - a key factor to successful water flooding*, JCPT, June 1998.

[2]. Liu X. and Civan F: "*Formation damage and filter cake buildup in laboratory core tests: Modeling and Model Assisted Analysis*", SPEFE, Mar, 1999 (SPE 25215 - P).

[3]. Selby R. J. and A1i, S. M. F, *Mechanics of sand production and the flow of fines in porous media*, JCPT, May 1988.

[4]. Davidson D Fi, *Invasion and impairment of formations by particulates*, Unsolicited Manuscript, Jan 6, 1979 (SPE 8022).

[5]. Eleri O. O. and Ursin J. R, "*Physical aspects of formation damage in linear flooding experiments*", Lafayette, LA, Feb. 26-27, 1992, (SPE 23784).

[6]. Zhang N. S., "*An experimental investigation of the formation damage caused by produced oily water injection*", Aberdeen, UK, Sept pp. 7-10, 1993 (SPE 26702).

[7]. Francis P, "*Dominating effects controlling the extent of drilling induced damage*", The Hague, Netherlands, June, pp. 2-3, (SPE 38182), 1997.

[8]. Rochon J, "*Water quality for injection wells*", Lafayette, LA, Feb. pp. 14-16, 1996 (SPE 31122).

[9]. Francis P: "*Dominating effects controlling the extent of drilling induced damage*", The Hague, Netherlands, June, pp. 2-3, 1997 (SPE 38182).

10. Tovar, J, "*Formation damage studies on reservoir rocks using water base and oil base muds*", Lafayette, LA, Feb. pp. 7-10, 1994 (SPE 27349).


www.SID.ir

Archive of SID



[11]. Jiao D., and Sharma M. M, *"Mud Induced Formation Damage in Fractured Reservoirs", The Hague, Netherlands*, May, pp. 15-16, 1995 (SPE 30107).

[12]. Warren B. K, *«Development of the Pekisko Dolomite in the Bigoray Field. Issues in Formation Damage Mechanisms, Drilling Fluid Selection and Well Stimulation»,* Denver, CO, Apr. pp. 5-8, (SPE 39921), 1998.

[13]. Kwan M. Y., Cullen M. P., Jamieson P. R. and Fortier R. A., "*A Laboratory Study of Permeability Damage to Cold Lake Tar Sands Cores*", Journal of Canadian Petroleum Technology, 28 (1), pp. 56 – 62, (Jan. – Feb. 1989).

[14]. Jamiahahmadi M., Moghadasi J., Muller-Steinhagen H., Sharif A. and Izadpanah M. R., "*Formation Damage in Iranian Oil Fields*", SPE Paper 73781, presented at SPE Intl. Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Louisiana, pp. 20 – 21 Feb., 2002.

[15]. Jamiahahmadi M., Moghadasi J., Muller-Steinhagen H. and Sharif A.: "Scale Formation in Oil Reservoir and Production Equipment during Water Injection", SPE Paper 73781, presented at SPE Intl. Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Louisiana, pp. 20 – 21, Feb. 2002.

[16]. Todd A. C., et al., "*Review of Permeability Damage Studies and Related North Sea Water Injection*", paper SPE 7883 presented at the 1979 SPE Intl. Symposium on Oil Field and Geothermal Chemistry, Dallas, pp. 22 – 24 January, 1979.

www.SID.ir