

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 پذیرش: ۹۳/۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۲۹

چکیده

طبیعت برخی فرآیندهای انجام شده در سازند، 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 می باشد. در این مقاله تکیه اصلی بر روی اثرپذیری پارامترهایی نظیر فشار و ذرات معلق در آب تزریقی است که در ادامه سعی می گردد 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 میداین نفتی ایران که در حال تزریق آب به آبد مخزن می باشد سعی گردیده مدل فیزیکی مخزن توسط نمونه های فوق در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردد. با توجه به عدم کیفیت مناسب آب و وجود املاح و ذرات بالا در آب تزریقی، بر خلاف انتظار آسیب دیدگی محسوس در نتایج آزمایشگاهی مشاهده نگردید. هر چند کاهش نفوذپذیری نامحسوس در نمونه‌های بدون شکاف مشاهده شد 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 آسیب‌دیدگی 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 داشت. این موضوع می تواند تفاوت مشاهدات 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

صدها تا چندین هزار متر زیرزمین می باشد، پدیدگی تخمین مقدار این پارامتر را بیشتر نمایان می سازد، لذا در برآورد آن، از پارامترهای دیگری نظیر تغییرات نفوذپذیری، فشار تولیدی و یا فشار تزریقی استفاده می گردد. بنابراین آسیب دیدگی سازند معمولا بر اساس تغییر کارایی چاه اندازه‌گیری و بررسی می شود.

آسیب دیدگی سازند فرآیندی است که باعث کاهش توان تولید در چاه‌های تولیدی و کاهش تزریق پذیری در چاه‌های تزریقی خواهد شد. وجود محیط متخلخل مورد نظر که

ملاحظه‌ای در تراوایی ایجاد می‌کنند، معمولاً از اندازه دهانه گلوگاه‌ها کمتر است. مطالعات انجام شده بر روی مهاجرت ذرات ریز در داخل محیط متخلخل نشان می‌دهد. ذراتی که اندازه آنها حدوداً 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 (خصوصاً در سرعت‌های پایین و آرام)، ذرات با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر ۷ تا ۱۰٪ می‌توانند کمتر از قطر گلوگاه متخلخل نیز، پتانسیل تشکیل پلهای پایدار و کاهش تراوایی را داشته باشند [۱].

Liu در سال ۱۹۹۴ نشان داد که فشار حاصل از لایه‌های بالایی^۱ چگونه بر مهاجرت ذرات تاثیر می‌گذارد و این که بسته به قابلیت ارتجاع گلوگاه متخلخل و افزایش فشار^۲، مهاجرت ذرات در نمونه با فشار زیاد، نسبت به نمونه با فشار کم، شدت بیشتری به خود می‌گیرد. این مساله اغلب در سازندهای با تراوایی کمتر، با شدت بیشتری مشاهده می‌شود. دلیل آن هم این است که در محیط‌های با تراوایی کمتر، گلوگاه‌هایی با اندازه کوچک‌تر، فراوان‌ترند و در نهایت این سیستم‌ها تمایل بیشتری برای انسداد مسیرها از خود نشان می‌دهند. هر چند، مشکلات جدی و اساسی که در نتیجه مهاجرت ذرات به وجود می‌آیند، برای مخزن‌هایی با تراوایی بالا نیز گزارش شده است [۲].

آزمایشات تحت کنترلی که توسط Selby و همکارانش انجام شد، نشان داد که حرکت ذرات در محیط متخلخل تحت تاثیر عواملی همچون، مقدار اولیه ذرات موجود در محیط متخلخل، دبی سیال، اندازه و شکل دانه‌های ماسه، اندازه و چگالی ذرات و مقدار فشار اعمال شده می‌باشد [۳].

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

این کار با استفاده از نتایج آنالیز فشار گذرا (Pressure Transient) که میتواند شاخصی برای تغییر تراوایی دهانه چاه باشد و یا با استفاده از نتایج انواع مختلفی از آنالیز ویژه مغزه (Special Core Analysis - SCAL) که برای شبیه سازی فرآیند آسیب دیدگی سازند استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد.

آسیب دیدگی سازند می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله دلایل مکانیکی، شیمیایی و یا به دلایل بیولوژیکی ایجاد گردد. آنچه که در این تحقیق مورد نظر قرار گرفته شده بود آسیب دیدگی ناشی از یک پدیده غیر شیمیایی است که ممکن است تراوایی مفید در نزدیکی دهانه چاه را کاهش دهد و می‌توان آن را به مکانیسم‌های جزئی‌تر تقسیم نمود. از جمله: مهاجرت فیزیکی و حرکت آهسته ذرات ریزی که به صورت طبیعی در داخل مخزن تشکیل می‌شوند، انسداد متخلخل‌ها به دلیل ورود ذرات ریز خارجی به داخل سازند، 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 موثر که می‌تواند در آسیب دیدگی سازند نقش مهمی داشته باشد مهاجرت ذرات ریز می‌باشد این پدیده به دلیل حرکت ذرات ریز در داخل محیط متخلخل ناشی از جریان سیال اتفاق می‌افتد. جریان سیال در داخل خلل و فرج محیط متخلخل نیروی برشی^۱ قوی را ایجاد می‌کند. این نیرو باعث می‌شود ذرات ریزی که به صورت طبیعی به دیواره داخلی محیط متخلخل چسبیده اند از جای خود کنده شوند و در حین حرکت، در گلوگاه‌های متخلخل‌ها مستقر شوند و با سد کردن این گلوگاه‌ها و بستن آنها، 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.

پدیده مهمی که در مورد این ذرات ریز بایستی به آن اشاره کرد این است که اندازه ذرات مهاجرت کننده که باعث مسدود کردن خلل و فرج می‌شوند و کاهش قابل

1. Shear Force
2. Overburden Pressure
3. Stress

ذرات ریز^۲ 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 CaCl₂ و آب، تراوایی مطلق این مغزه‌ها (که عموماً بین ۱ تا ۳ D بود)، تقریباً 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 [۱۴ و ۱۵].

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.

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. از جمله محققینی که در این مورد تحقیق کرده‌اند افرادی همچون Davidson [۴]، Rochon [۴]، Francis [۴]، Zhang [۴] و Eleri [۴] را می‌توان نام برد [۴-۹]. اما آنچه که در این تحقیق نیز به آن می‌پردازیم این است که ورود ذرات خارجی یا ذراتی که به صورت 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^۱ به لایه‌ای با تراوایی کم و همگون است. معمولاً اگر تراوایی سازند از مقدار ۷۵۰ mD یا فشار بیش از مقدار تعادل از ۷ Mpa 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 طوری که شکاف‌های موجود درون مخزن می‌توانند ذرات را به اعماق مخزن انتقال دهند. Kwan و همکاران تلاش کردند که کاهش تراوایی که توسط مهاجرت

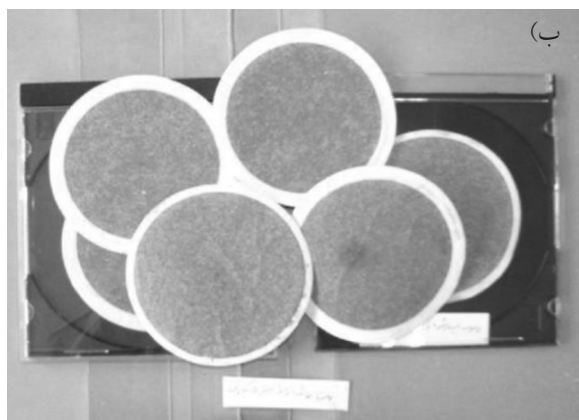
1. Overbalance Pressure

2. Fine Migration

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. چنان‌که مشخص است میزان بالای pH برابر ۵/۵ است. چنان‌که مشخص است میزان بالای ذرات نشان دهنده کیفیت نامطلوب آب است که در تعدادی از نمونه‌ها مقدار TSS^۱ مقادیر بالاتری را نشان داد. بنابراین کیفیت نامطلوب آب تزریقی در نمونه‌ها کاملاً 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 همان‌گونه که در شکل مشخص شده است در سال‌های 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.

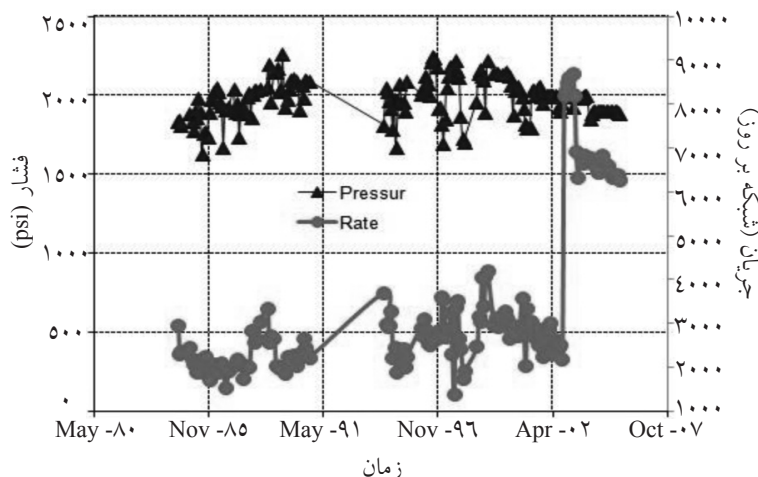
آنها در تحقیقات دیگری دریافتند که: (۱) آسیب کلی به اندازه متوسط گلوگاه‌های خلل و فرج محیط متخلخل بستگی دارد؛ (۲) ذرات با اندازه کمتر به کل مسیر پیچیده شده آسیب می‌رسانند؛ (۳) هر چه اندازه ذرات افزایش می‌یابد، آسیب وارده به مرور به قسمت‌های بیرونی مغزه منتقل شده و به شکل تشکیل لایه رسوب می‌باشد [۱۶]. هر چند Todd و همکارانش اثر شکاف را محتمل فرض نمودند اما در این مطالعه ما با انتخاب مغزه‌های واقعی در شرایط مخزن و همراه با شکاف‌های ریز، عدم کاهش نفوذپذیری و عدم افزایش فشار تزریق را کاملاً مشاهده نمودیم که میتواند معرف حالت تزریق در دهانه چاه باشد. **نمونه آب تزریقی:** در این آزمایشات از نمونه آب تزریقی یکی از میدانی 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 $10 \mu m$ 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



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 5μ و آب فیلتر شده با صافی 10μ (ب) فیلترهای استفاده شده و ذرات جدا شده بر روی آنها

جدول ۱- ترکیب آب تزریقی

ترکیب	غلظت (mg/lit)
اکسیژن محلول	< ۱
TDS	۱۲۷۲۴۰
TSS	۱۳۰۰
قلیائیت	۱۷۰
سولفات	۲۲۳
سولفیت	< ۲
سولفید	۸/۴
کلسیم	۸۰۰۰
باریم	۱/۶
استرانسیم	۴۱۰
آهن	۲۳
سدیم	۳۶۰۰۰
لیتیم	۷/۵



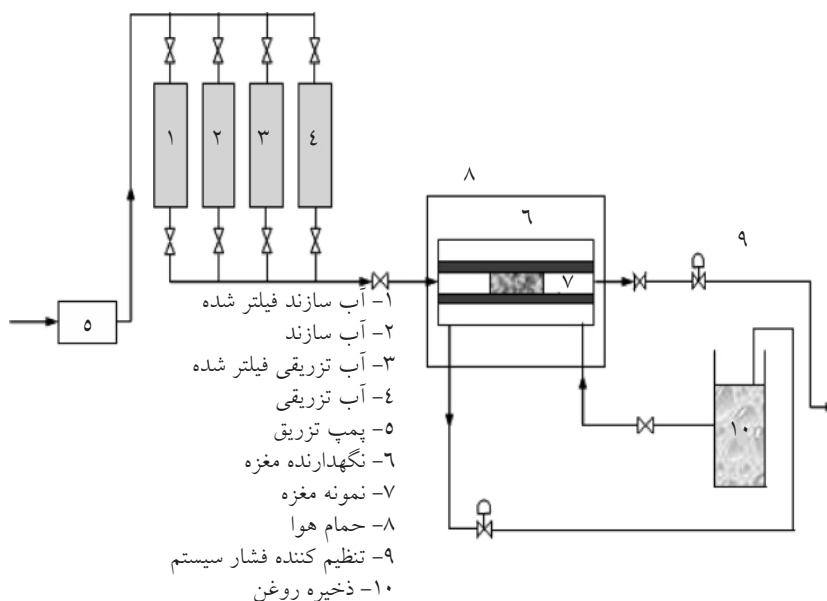
شکل ۲- تاریخچه آب تزریقی در یکی از چاه‌های تزریقی میدان مورد نظر

شکاف در سنگ مورد بررسی قرار بگیرد. در این تحقیق با استفاده از سیستم 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 - 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.

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 صرفاً 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



شکل ۳- شماتیک سیستم تزریق آب به درون مدل فیزیکی به همراه وسایل جانبی

در چگونگی اثرپذیری آسیب دیدگی سازند داشته باشد. هنگامی که چاه‌های تزریقی با این شکاف‌ها برخورد داشته و یا دانسیته این شکاف‌ها در اطراف چاه‌های تزریقی زیاد باشد به دلیل پاسخ مناسب چاه، تخمین و پیش‌بینی مسئله آسیب دیدگی سازند و کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن پیچیدگی بیشتری پیدا خواهد کرد. این موضوع اهمیت تصفیه 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 آسیب دیدگی 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.

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 ماسه‌ای مذکور نمونه‌های مناسبی جهت تزریق در آزمایشگاه استفاده می‌شود. خصوصیات نمونه‌های تهیه شده در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که بیان شد عملیات تزریق آب در لایه ماسه‌ای میدان بوده که قسمتی از آبد 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

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

مغزه شماره.	طول (cm)	قطر (cm)	وزن (gr)	تخلخل (%)	نفوذپذیری (md)	حجم تخلخل (cc)
۱	۵/۳۹۲	۳/۷۴۷	۱۱۷/۴۳	۲۲/۰۷	۳۸۹	۱۲/۱۳
۲	۵/۲۰۵	۳/۷۵۲	۱۱۹/۳۴	۲۵/۰۷	۳۴۹	۴۲/۱۴
۳	۵/۱۹۰	۳/۷۴۷	۱۱۰/۰۵	۲۶/۴۸	۵۱۲	۳۵/۱۴
۴	۵/۱۰۵	۳/۷۵۶	۱۱۰/۳۴	۲۷/۰۲	۳۴۰	۲۷/۱۵
۵	۵/۲۸۲	۳/۷۴۶	۱۱۴/۲۷	۲۳/۸۹	۴۵۹	۹۰/۱۳

به طوری که 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 می‌تواند 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. همان‌گونه که در جدول ۲ بیان شده است مقدار نفوذپذیری این نمونه در حدود ۳۴۹ md اندازه‌گیری شده است. در این قسمت پس از آماده‌سازی نمونه سنگ و شستشو و اشباع آن، سیستم در شرایط دمایی 80°C قرار گرفت.

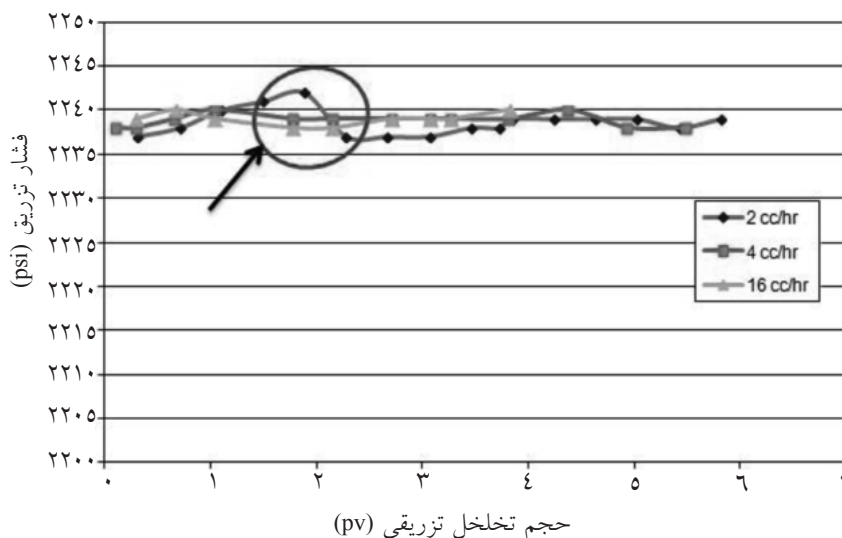
در ابتدا $1/5\text{PV}$ آب سازند فیلتر شده با شدت جریان $1/5\text{cc/hr}$ در شرایط فشار ۵۰ bar به درون مغزه شماره ۲ تزریق شد. پس از ایجاد شرایط پایدار، آب تزریقی مورد نظر در شدت جریان‌های متفاوت تزریق گردید. نکته قابل توجه عدم افزایش فشار تزریقی و عدم کاهش در نفوذپذیری سنگ می‌باشد. شکل ۷ شکاف ایجاد شده 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.

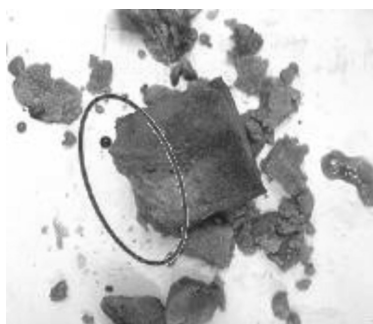
همچنین سناریوی اصلی در این تحقیق مشاهده اثر املاح و ذرات در آب است که می‌تواند بر روی تزریق پذیری چاه تاثیر منفی ایجاد نمایند.

تاثیر فشار در اطراف چاه تزریقی در لایه‌های ماسه‌ای

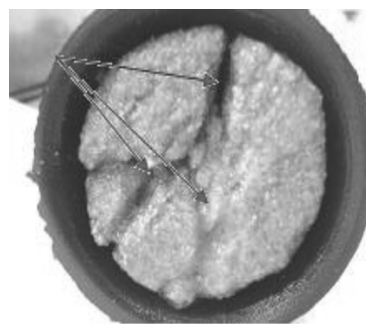
در این قسمت پس از آماده‌سازی مدل فیزیکی با نمونه مغزه شماره ۱ سعی گردید شرایط آزمایش در دمای 80°C و فشار سیستم ۱۵۰ bar در نظر گرفته شود. در مرحله ابتدایی، پس از تزریق آب سازند فیلتر شده و ایجاد شرایط پایدار، تزریق نمونه آب تزریقی با شدت جریان 2cc/hr آغاز گردید. نکته قابل توجه افزایش فشار پس از تزریق ۱ تا 2PV و افت ناگهانی فشار تزریق و رسیدن به شرایط پایدار بود چنان‌که در شکل ۴ نشان داده شده است این افزایش محسوس اولیه قابل مشاهده است. سپس شدت جریان به 4cc/hr و 6cc/hr و در 16cc/hr افزایش یافت، چنان‌که نتایج نشان دادند و در شکل ۴ نیز مشخص است هیچ افزایش فشار تزریقی در مراحل بعدی مشاهده نگردید، به طوری که پس از تزریق 15PV تغییر چندان محسوسی در نفوذپذیری مغزه مشاهده نشد. پس از توقف و بررسی سیستم، خرد شدگی و تغییر در ساختار سنگ مخصوصاً 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 ۶ 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.



شکل ۴- تغییرات فشار تزریق با تزریق آب به درون مغزه شماره ۱

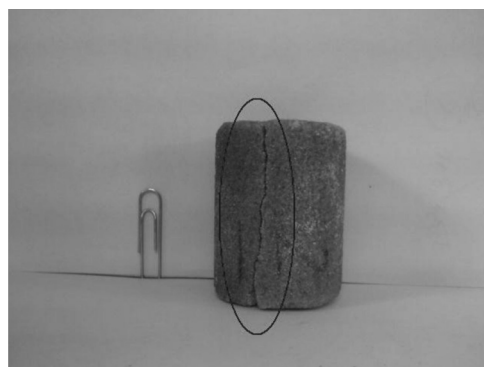


شکل ۶- نمونه خارج شده مغزه شماره ۱ پس از انجام عملیات تزریق از درون مغزه نگهدار



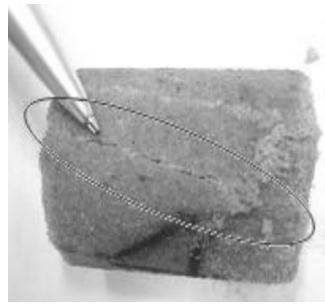
شکل ۵- خرد شدگی و تغییر در ساختار سنگ در محل تزریق آب نمونه مغزه شماره ۱

نگردید. شکل ۸ شکاف ایجاد شده بر روی نمونه فوق را بعد از عملیات تزریق نشان داده است. نکته قابل توجه در این مشاهدات این بود که با ادامه آزمایش و افزایش دبی جریان آب تزریقی، شرایط تزریق پذیری برای نمونه بهبود یافته است که شسته شدگی سنگ در محل تزریق این موضوع را تایید می نماید. شکل ۹ آب تزریقی خارج شده از نمونه سنگ را نشان می دهد. چنان که در شکل مشخص شده ذرات ته نشین شده نشان می دهد ذرات و املاح در آب تزریقی قابلیت حرکت در محیط متخلخل و شکاف را داشته و آسیبی را نشان نمی دهند با مقایسه شکل که املاح فیلتر شده 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 کرده اند.

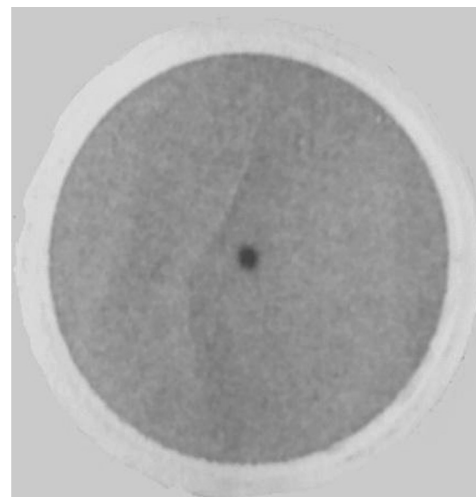


شکل ۷- شکاف ایجاد شده در مغزه شماره ۲ بعد از عملیات تزریق آب

در این آزمایش نیز به دلیل دارا بودن شکاف ریز و عدم مقاومت سنگ و همچنین سیمان شدگی ضعیف، علاوه بر شسته شدن مغزه در محل ورود آب به درون آن، شکاف ایجاد شده بر روی نمونه مغزه عدم کاهش نفوذپذیری را باعث گردیده است. لذا افزایشی در فشار تزریق نیز مشاهده



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

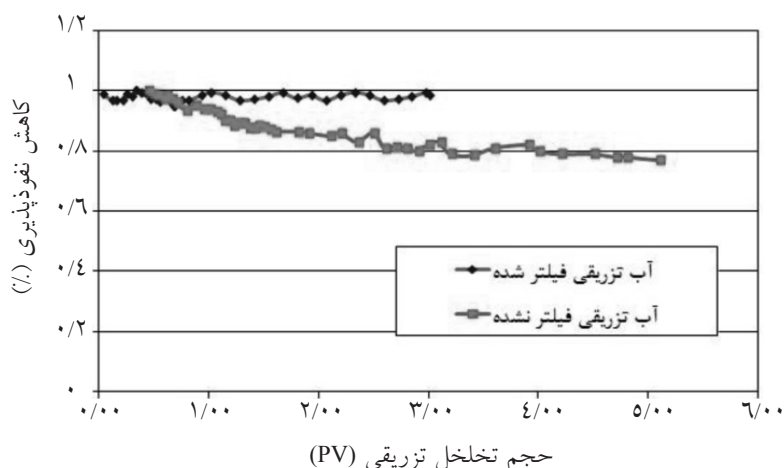


شکل ۹- سمت چپ: ذرات و املاح ته نشین شده در آب تزریقی خارج شده از نمونه مغزه تحت تزریق قرار گرفته، سمت راست: ذرات و املاح گرفته شده توسط فیلتر پس از فیلتراسیون آب تزریقی

در مقایسه با آب فیلتر نشده این تغییرات را ناچیز فرض نمود. در ادامه نیز آب تزریقی فیلتر نشده با شدت جریان 4 cc/hr به مقدار بیش از 5 PV به مغزه تزریق گردید که اندازه‌گیری نفوذپذیری 20% 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 کاملاً 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.

فرآیند تزریق آب در نمونه مغزه ماسه ای بدون شکاف

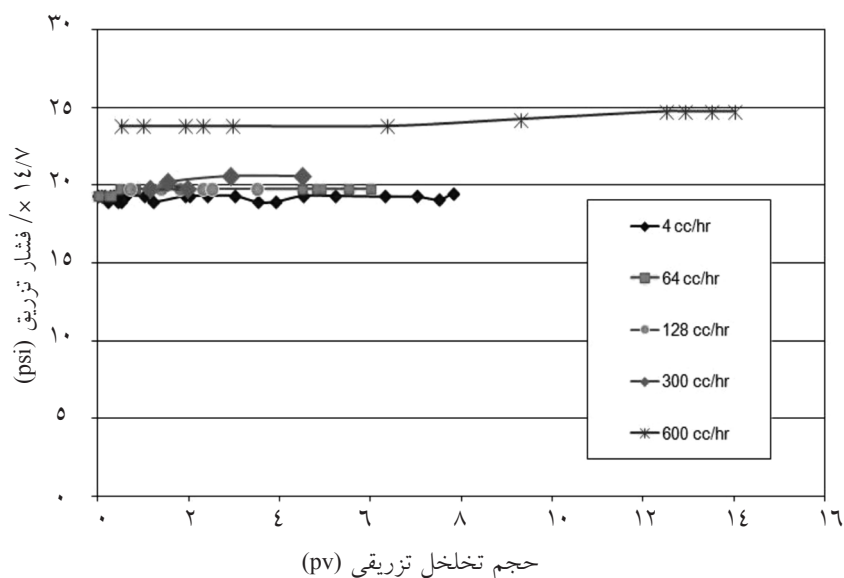
در اینجا سعی گردید مدل فیزیکی ایجاد شده نمایانگر محیط متخلخل در مخزن باشد به طوری که در مغزه مورد نظر اثری از شکاف مشاهده نگردد. نمونه مغزه شماره ۴ با خصوصیات مطابق جدول ۲، برای آزمایشات تزریق انتخاب گردید. در این قسمت برای حفظ ساختار مغزه و سیمان شدگی بین ذرات ماسه، سیستم تزریق را تحت فشار 20 bar و با شرایط دمایی 80°C قرار 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 $0.45 \mu\text{m}$ که با شدت جریان 4 cc/hr به مغزه تزریق گردید، افت محسوسی را در نفوذپذیری نشان نداد. هر چند تغییرات اندکی در شرایط پایدار مشاهده شد، اما می‌توان



شکل ۱۰- مقایسه اثر آب تزریقی با آب فیلتر شده توسط فیلتر ۰/۴۵ میکرونی بر کاهش نفوذپذیری بر روی مغزه شماره ۴ با شدت جریان ۴ cc/hr

بهم خوردگی ساختار سنگ در محل تزریق، اثر شکاف در همان مراحل اولیه تزریق خود را نشان داد هم چنان که در شکل ۱۱ نشان داده شده است تاثیر این شکاف به صورتی بود که تا ۶۰۰ cc/hr اثر محسوسی در تغییر نفوذپذیری و یا فشار تزریقی مشاهده نگردید. باید توجه نمود که افزایش در شدت جریان ۶۰۰ مطابق رابطه داری می بایست بسیار بالاتر از مقدار در شکل ۱۱ باشد. شکل ۱۲ نمونه مغزه را بعد از فرآیند تزریق و در محل تزریق نشان می دهد. همچنین در شکل ۱۳ شکاف ایجاد شده در بعد از فرآیند تزریق را نشان می دهد.

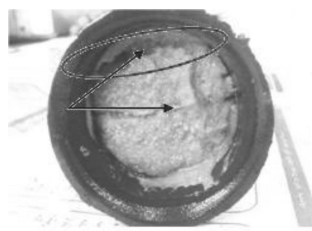
اثر شدت جریان های زیاد در نمونه مغزه به همراه شکاف در این بخش، مغزه نمونه ۵ با خصوصیتی مطابق جدول ۲ برای آزمایش تزریق انتخاب گردید. در این تست پس از آماده سازی مغزه شماره ۵، تزریق اولیه آب سازند فیلتر شده برای ۲ hr با شدت جریان ۴ cc/hr انجام شد. سپس فرآیند تزریق نمونه آب تزریقی از شدت جریان ۴ cc/hr آغاز گردید و با افزایش شدت جریان سعی گردید تغییرات نفوذپذیری سنگ مخزن مورد ارزیابی قرار گیرد. در این آزمایش به دلیل پایین بودن مقاومت سنگ و سیمان شدگی ضعیف آن علاوه بر شسته شدن سنگ در محل تزریق و



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



شکل ۱۳- نمونه مغزه شماره ۵ بعد از عملیات تزریق خارج شده از مغزه نگهدار



شکل ۱۲- نمونه مغزه شماره ۵ بعد از عملیات تزریق در محل تزریق

البته در صورت ارتباط با چاه‌های تولیدی احتمال ایجاد مشکلاتی را برای تولید ایجاد می‌نماید.

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

- به‌دلیل فشار تزریق و بهم خوردگی^۱ در محل تزریق بیشترین نیروهای وارد (نیروهای درگ) بر ذرات که باعث جدا شدن ذرات و تغییر ساختار سازند می‌گردد در محل تزریق و به عبارتی اطراف چاه تزریق ایجاد می‌گردد.

- مقایسه نتایج مغزه شماره ۲ و ۴ که از لحاظ خصوصیات مشابه می‌باشد نشان می‌دهد اکثر املاح عبور کرده از مغزه شماره ۲ از میان شکاف ایجاد شده بوده چرا که در مغزه شماره ۴ که بدون شکاف بود آب فیلتر نشده کاهش محسوسی را در نفوذپذیری نشان داد. لذا وجود شکاف‌ها در محل چاه‌های تزریقی یکی از عوامل موثر در انتقال ذرات و املاح درون آب به عمق مخزن می‌باشد. این پدیده باعث می‌گردد در سال‌های اولیه تزریق، تزریق‌پذیری مطلوبی در چاه مشاهده گردد. اما در صورت

با توجه به مشاهدات اولیه بر روی سنگ و عدم تغییر در فشار تزریقی احتمال وجود شکاف 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، باعث می‌گردد کاهش نفوذپذیری و افزایش تزریق در مراحل اولیه تزریق نشان داده نشود و این موضوع برای بسیاری از مهندسی‌ها به معنای عدم آسیب‌دیدگی سازند و تزریق‌پذیری مناسب آب و یا سازگاری آب تزریقی با مخزن به شمار برود، که می‌تواند این فرضیات باعث پیش‌بینی‌های نادرستی در فرآیند تزریق آب گردد.

نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات انجام گرفته و مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان نکات زیر را عنوان داشت:

- بالا بودن نفوذپذیری و تخلخل در سنگ مخزن از عواملی است که می‌تواند تاثیر عمده‌ای در حرکت ذرات جامد و املاح در محیط متخلخل داشته باشد به‌طوری‌که کاهش نفوذپذیری محسوسی مشاهده نگردد. این موضوع می‌تواند بستگی به اندازه حفرات جامد و توزیع اندازه حفرات داخل سنگ مخزن داشته باشد.

- افزایش فشار تزریق و شدت جریان تزریقی در سازندهای ماسه‌ای با مقاومت سیمان‌پذیری کم می‌تواند باعث بهم خوردگی ساختار سنگ در محل تزریق شده و با ایجاد شکاف‌های ریز و کانال‌هایی موجب حرکت املاح در محیط 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

1. Turbulency

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 سریع تر 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 می باشد 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 می باشد که نقش موثری در چگونگی فرآیند تزریق آب خواهد داشت.

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 حادث تر 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

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).

- [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.