

بررسی آزمایشگاهی اثرهای تزریق آب به مخازن در آسیب دیدگی سازند و تغییر ساختار محیط متخلخل

سعید عباسی*⁺، محسن توکلیان

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده اکتشاف و تولید، مرکز مطالعات ازدیاد برداشت از مخازن

جمشید رودساز

تهران، شرکت ملی نفت ایران، معاونت برنامه ریزی مخازن هیدروکربوری

چکیده: در این پژوهش با نمونه گیری از آب سازند و آب تزریقی در یکی از میادین ایران و تهیه نمونه سنگ مخزن، سعی شد پارامترهای موثر در فرآیند تزریق همچون شدت جریان و لیتولوژی سنگ مخزن در مدل فیزیکی در آزمایشگاه، تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با فرآیند فیلتراسیون آب تزریقی و مقایسه با آب صاف نشده، اثرهای ذره‌های معلق و حرکت این ذره‌ها در محیط متخلخل به صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار گرفتند. در سنگ‌های ماسه‌ای با سیمان شدگی ضعیف، افزایش شدت جریان باعث به هم خوردگی ساختار محیط متخلخل شده و در موردهایی با توجه به وجود شکاف‌های ریز، باعث ایجاد مسیرهای جریانی از داخل آنها می‌شود. در مشاهده‌های آزمایشگاهی مشخص شد که شکاف ایجاد شده در نمونه سنگ می‌تواند باعث کاهش فشار تزریق در مراحل ابتدایی تزریق شود. اما در مقابل، این شکاف می‌تواند به صورت کانالی باشد که باعث انتقال ذره‌های معلق و یا جدا شدن ذره‌ها از بدنه سنگ شود و مکان‌های دیگر ممکن است باعث گرفتگی در حفره‌ها سنگ شود. این گرفتگی‌ها در صورت نزدیک شدن به چاه‌های تولیدی باعث افت فشار و در نتیجه کاهش تولید خواهد شد. هر چند افزایش شدت جریان در نمونه‌های ماسه‌ای مورد نظر، افزایش محسوس در فشار تزریق به دنبال نداشت، اما نتیجه‌ها و مشاهده‌ها حکایت از آن دارد که در صورت حرکت ذره‌ها در محیط متخلخل با طولانی‌تر شدن مسیر حرکت و گذشت زمان بیشتر، تجمع ذره‌ها در حفره‌ها می‌تواند باعث گرفتگی و در نتیجه کاهش نفوذ پذیری در محیط متخلخل شوند.

واژه‌های کلیدی: تزریق آب، آب همراه نفت، آب سازند، آبد، افت نفوذ پذیری، آسیب دیدگی سازند، تخلخل، حرکت ذرات، سازند ماسه‌ای، آب غیر سازندی

KEY WORDS: Water injection, Produced water, Aquifer, Permeability reduction, Formation damage, Porosity, Sandstone, Particle movement, Fine migration, Filtration.

مقدمه

یکی از پدیده‌های اثر گذار در فرآیند تزریق آب که باعث کاهش بازده در فرآیند تزریق می‌گردد و همچنین افزایش هزینه‌های

تزریق را به دنبال خواهد داشت، آسیب دیدگی^(۱) در سازند می‌باشد. آسیب دیدگی سازند به هر فرآیندی گفته می‌شود که باعث

*عهده دار مکاتبات

+ E-mail: abbasis@ripi.ir

(1) Formation Damage

ترشوندگی سنگ مخزن دارد. ترشوندگی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که تعیین کننده تمایل سنگ به جذب یکی از سیالات عبور کننده نسبت به دیگری در یک جریان چند فاز است [۲]. Liu نشان داد که فشار اضافه^(۲) چگونه بر مهاجرت ذره‌ها تأثیر می‌گذارد و این که بسته به قابلیت ارتجاع گلوگاه تخلخل و افزایش فشار، 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، گلوگاه‌های با اندازه کوچکتر، فراوانترند و در نتیجه این سیستم‌ها تمایل بیشتری برای انسداد مسیره‌ها از خود نشان می‌دهند [۳]. Muecke نتیجه گرفت که، ماسه سنگ‌های سیمانی نشده^(۳)، مقدار زیادی ذرات بسیار ریز جامد و با تنوع در اندازه و ترکیب دارند که در محیط متخلخل به‌طور کامل بدون استحکام می‌باشند [۴]. در این تحقیق نیز با انتخاب نمونه سنگ‌های واقعی از مخزن که دارای سیمان شدگی ضعیفی می‌باشند به وضوح تغییر در ساختار سنگ در محل تزریق مشاهده می‌شود. زمانی که جریان سیال تک فاز بوده و سرعت کافی برای معلق نگهداشتن ذره‌ها وجود داشته باشد، ذره‌های موجود در سازند در داخل خلل و فرج حرکت می‌کنند؛ مگر اینکه توسط مسیره‌های بسته محیط متخلخل از حرکت بازایستند. پل‌های تشکیل شده در گلوگاه‌ها می‌تواند به وسیله اختلالات فشار یا جریان‌های برگشتی سیال از هم پاشیده شود.

کیفیت فیزیکی مهم دیگری که در مورد مهاجرت ذره‌های ریز وجود دارد آنست که برای یک محیط متخلخل خاص، به‌طور معمول یک سرعت بحرانی وجود دارد که برای مقدارهای سرعت کمتر این مقدار، جابه‌جایی ذره‌ها اتفاق نخواهد افتاد. آنها در تحقیقات خود مشاهده کردند که بعضی ذرات در سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی نیز حرکت می‌کنند، اما مقدار آنها به اندازه‌ای نیست که بتوانند پلی تشکیل دهند و یا اگر هم تشکیل دهند، این پل به اندازه کافی محکم و پایدار نیست که باعث کاهش تراوایی شود [۵-۱۰].

ورود ذره‌های جامد

در بسیاری از حالات، مکانیسم ورود ذره‌های جامد موجود در سازند و همچنین ذره‌های خارجی به محیط متخلخل را می‌توان شبیه به بخشی از سازند دانست که بلافاصله بعد از دهانه چاه

ایجاد کاهش در توان تولید نفت، گاز یا آب از سازند تولیدی یا ایجاد کاهش در توان تزریق آب، گاز تزریقی و یا چاه Disposal شود. به دلیل دشواری در تشریح و برآورد دقیق آسیب دیدگی سازند و علت به وجود آمدن آن، تعریف دیگری از آن توسط پژوهشگران ارائه شده است. بر طبق این تعریف، آسیب دیدگی سازند، صدمه‌ای است که به صورت نامحسوس و به دلایل غیر قابل کنترل و غیر قابل اجتناب به سازند وارد شده و باعث کاهش غیرقابل اندازه‌گیری دقیق کارایی سازند می‌شود. آنچه که در این پژوهش مورد نظر قرار گرفته شد آسیب دیدگی ناشی از یک واکنش شیمیایی یا غیر شیمیایی است که ممکن است تراوایی مفید در نزدیکی دهانه چاه را کاهش دهد و می‌توان آنرا به مکانیسم‌های جزئی تر تقسیم نمود، از جمله: مهاجرت فیزیکی و حرکت آهسته ذره‌های ریزی^(۱) که به‌صورت طبیعی در داخل مخزن تشکیل می‌شوند، انسداد تخلخل‌ها به دلیل ورود ذره‌های ریز خارجی به داخل سازند، کنده شدن ذره‌ها به دلیل مقاومت پایین آنها و حرکت در محیط متخلخل، تشکیل لعاب، خمیر شدگی سنگ مخزن، اعمال فشارهای ژئومکانیکی.

مهاجرت ذره‌های ریز

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 قوی را ایجاد می‌کند. این نیرو باعث می‌شود ذره‌های ریزی که به‌صورت طبیعی به دیواره داخلی محیط متخلخل چسبیده‌اند از جای خود کنده شوند و درحین حرکت، در گلوگاه‌های حفره‌ها مستقر شوند و با سد کردن این گلوگاه‌ها و بستن آنها، باعث کاهش تراوایی شوند.

مطالعه‌های انجام شده بر روی مهاجرت ذره‌های ریز در داخل محیط متخلخل نشان می‌دهد ذره‌هایی که اندازه آنها در حدود ۳۰ درصد 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 (به ویژه در سرعت‌های پایین و آرام)، ذرات با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر تا اندازه ۷ تا ۱۰ درصد کمتر از قطر گلوگاه تخلخل نیز، پتانسیل تشکیل پل‌های پایدار و کاهش تراوایی را دارند [۱]. مهاجرت ذره‌های ریز همچنین وابستگی شدیدی به خاصیت

(۱) Fine Migration

(۲) Overburden Pressure

(۳) Unconsolidated

مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. ناهمگونی (هتروژنیته) مخزن از جمله مشکلاتی است که پیش بینی نتایج را مشکل ساز می‌نماید. دوم اینکه وجود پیچیدگی‌های مخازن نفت و گاز از جهت ساختار و خواص فیزیکی و وجود شکافها و همچنین تقابل متفاوت سنگ و سیال، پیش‌بینی نتیجه‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. بر اساس این پیچیدگی‌ها در بسیاری از موردها در پروژه‌های تزریق آب مشکل‌های متعددی پیش می‌آید. در این پژوهش آزمایش‌ها روی یکی از مخزن‌های ایران که در حال تزریق آب می‌باشد انجام شده است. در این بررسی‌ها سعی شد با استفاده از نمونه تهیه شده از آب مخزن و همچنین نمونه سنگ مخزن فرایند تزریق به مغزه در شرایط متفاوت در آزمایشگاه مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین با انتخاب دو نوع جنس متفاوت از سنگ (ماسه‌ای و کربناته) در لایه مورد مطالعه در مخزن و با استناد به تحقیقات انجام گرفته سعی شد با انجام آزمایش‌های لازم اثر تزریق آب در کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های ماسه‌ای و کربناته به طور مجزا مورد بررسی قرار بگیرد. آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شد تا اثر شدت جریان در حرکت ذره‌ها مطالعه شود. پیچیدگی پدیده‌ها در مشاهده‌های آزمایشگاهی آنچنان می‌باشد که بسیاری از محققین اصولی را برای دستیابی به اهداف خود به کار می‌برند و با طراحی سناریوهای مختلف سعی در تخمین پارامترهای مورد نظر می‌باشند [۲۶، ۲۵].

بخش تجربی

انتخاب نمونه سنگ مخزن

در این تحقیق نمونه‌های مورد نظر مربوط به یکی از میدان‌های جنوب ایران می‌باشد. آسماری و بنگستان دو لایه مهم تولیدی از این میدان می‌باشد. سازند آسماری در میدان فوق مرکب از ماسه سنگ و سنگ آهک می‌باشد و مقدار تخلخل متوسط آن ۱۸ درصد است. فرآیند تزریق در این میدان در آبده مخزن توسط چاه‌هایی که در لایه آسماری تکمیل شده‌اند انجام می‌گیرد.

در طول عملیات تزریق بر روی نمونه‌های سنگ مخزن سعی شد با تغییر پارامترهای موثر میزان صدمه دیدگی و همچنین چگونگی تأثیر پارامترهای مورد نظر بررسی شود. در ابتدا تعدادی نمونه ماسه‌ای از لایه آسماری در مخزن فوق انتخاب گردید همچنین برای مقایسه کامل‌تر و بررسی تأثیر لیتولوژی در این نمونه سعی شد این اثر روی نمونه‌های از جنس کربناته در این لایه نیز مشاهده شود.

قرار گرفته است و مانند یک فیلتر بزرگ عمل می‌کند. در بسیاری مواقع و برای سازندهای با تخلخل و تراوایی متوسط، بخش عمده ذره‌هایی که به سازند وارد می‌شوند، در ناحیه‌ای نزدیک به نقطه ورودی که به طور معمول دورتر از ۱ cm نیست، صاف می‌شوند.

این پدیده به طور مفصل توسط مطالعه‌های آزمایشگاهی و عملیاتی بسیار زیادی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است [۱۶-۱۱]. ورود ذره‌های خارجی یا ذره‌هایی که به صورت طبیعی در سازند وجود دارند، در سازندهای با تراوایی بسیار بالا می‌تواند مشکل‌سازتر بوده و تا عمق بیشتری نفوذ کنند. از دیگر عواملی که باعث نفوذ بیشتر ذره‌ها می‌شود اعمال فشار بیش از مقدار تعادل به لایه با تراوایی کم و همگون است. به طور معمول اگر تراوایی سازند از مقدار ۷۵۰ mD یا فشار بیش از مقدار تعادل از ۷ Mpa (۱۰۰۰ psi) بیشتر شود، پتانسیل لازم برای هجوم عمیق‌تر ذره‌ها به وجود می‌آید [۱۹-۱۷]. Kwan و همکارانش تلاش کردند که کاهش تراوایی که توسط مهاجرت ذره‌های ریز صورت می‌پذیرد را در نمونه مغزه‌ای که از سازند Clearwater میدان Cold Lake واقع در ایالت Alberta تهیه شده بود، به صورت کمی بیان کنند [۲۰]. Souto و همکارانش در آزمایش‌های خود کاهش تراوایی را به دلیل مهاجرت رس مشاهده کردند که در زمان جایگزین شدن آب همزاد با آب نمک اتفاق می‌افتد [۲۱]. در مطالعه‌های آزمایشگاهی مشاهده شد که رسوب مجدد ذره‌های ریز باعث افت تولید غیرطبیعی می‌گردد. همچنین نشان داده شده که این پدیده محدود به دهانه چاه است در ادامه گروهی از پژوهشگران، آزمایش‌هایی که بر روی ۱۷ مغزه انجام دادند جنبه‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی فرایندها را که با حرکت و به دام افتادن ذره‌های معلق، باعث صدمه به سازند می‌شوند مورد مطالعه قرار دادند [۲۳، ۲۲].

Todd و همکاران آزمایش‌های خود را بر روی سه جنس مختلف سنگ مخزن انجام دادند آنها مشاهده کردند که کاهش تزریق پذیری که با آزمایش بر روی مغزه پیش بینی شده بود، در مقیاس میدانی دیده نشد که این امر ممکن است به دلیل وجود شکافها در سطح دهانه چاه باشد [۲۴]. در این تحقیق تلاش شده با استناد به شرایط واقعی مخزن تطابقی در جهت شرایط واقعی با شرایط دیده شده در آزمایشگاه به وجود آید. به عبارتی در اینجا بر خلاف مشاهده‌های Todd و همکارانش کاهش نفوذپذیری در آزمایشگاه نیز چندان محسوس نبود که با انجام آزمایش‌های متفاوت از نقطه نظر ساختار سنگ مخزن و وجود شکاف اثرپذیری هر کدام از این پارامترها

پمپ تزریق و مغزه نگهدارنده تشکیل شده است. شمای ساده‌ای از این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.

نحوه آماده سازی مدل

برای کلیه آزمایش‌ها ابتدا مدل برای مدت ۱۰۰ ساعت در دستگاه مخصوص با تولون شسته شد. پس از اطمینان از تمیزی مدل به منظور خشک شدن برای مدت ۲۴ ساعت در داخل آن قرار داده شد. با استفاده از سامانه اشباع، ابتدا برای مدت ۴ ساعت مدل تحت خلاء قرار گرفت. سپس اجازه داده شد تا آب سازند مورد نظر بر روی آن ریخته شود تا زمانی که به طور کامل در داخل آب سازند غوطه‌ور شود. پس از آماده شدن مدل فیزیکی از نظر اشباع سیال، در داخل محفظه نگهدارنده ویژه قرار داده و اتصالات مربوط به ورود و خروج سیال در سیستم سیلابزنی به محفظه وصل شد. در این مرحله به منظور مطالعه عملکرد فرایند تزریق آب روی سنگ مخزن با توجه به سناریوهای طراحی شده مدل فیزیکی تحت فرآیند تزریق قرار گرفت.

اثر فشار در تغییر ساختار سنگ مخزن در دهانه چاه در سازندها با سیمان شدگی ضعیف (آزمایش ۱)

این آزمایش بر روی مغزه شماره ۱ انجام گرفت. همانطور که در جدول ۲ خواص مغزه مورد نظر نشان داده شده این مغزه از جنس ماسه‌ای و با نفوذ پذیری مطلق بیش از ۳۵۰ میلی داری می باشد. در این آزمایش ابتدا نمونه سنگ مخزن تحت تزریق آب سازند با شدت جریان ۲ cc/h قرار گرفت. شرایط آزمایش در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و فشار سیستم ۱۵۰ بار در نظر گرفته شد. آزمایش پس از تزریق ۲ PV از آب سازند در شرایط پایدار قرار گرفت. که با ادامه تزریق نمونه آب تزریقی در چندین مرحله و در شدت جریانهای ۲ cc/h، ۴ cc/h، ۸ cc/h تزریق انجام شد. که با افزایش شدت جریان پس از پایداری در سیستم هیچ گونه افزایش فشار یا کاهش نفوذپذیری نسبت به حالت اولیه مشاهده نشد. پس از توقف و بررسی سیستم، تغییر در ساختار سنگ و خمیرشدگی مغزه مشاهده شد. شکل ۲ نمونه مغزه که در داخل نگهدارنده مغزه قرارداده شده است را بعد از عملیات تزریق و در محل تزریق نشان می‌دهد.

همچنان که مشاهده می‌شود شسته شدن سازند توسط آب تزریقی و فشار تزریقی باعث تغییر شکل ساختار و به هم خوردگی دانه‌های ماسه در محل تزریق می‌شود. این اثر می‌تواند در دهانه

جدول ۱- تجزیه نمونه آب تزریقی و آب سازند.

آب سازند	نمونه آب تزریقی	ترکیبات و خواص آب
۵٫۲	۵٫۵	PH
-	< ۱	اکسیژن محلول (میلی گرم در لیتر)
۲۰۲۰۵۰	۱۲۷۲۴۰	TDS
۲۵۲	۱۳۰۰	TSS
۱۷۷	۱۷۰	قلیائیت (میلی گرم در لیتر کربنات)
۲۹۱	۲۲۳	سولفات (میلی گرم در لیتر)
< ۲	< ۲	سولفیت (میلی گرم در لیتر)
۷٫۲	۸٫۴	سولفید (میلی گرم در لیتر)
۱۲۳۱۰۰	۰٫۰۵	کلر آزاد (میلی گرم در لیتر)
۱۳۲۸۰	۸۰۰۰	کلسیم (میلی گرم در لیتر)
۱۲۶۲	-	منیزیم (میلی گرم در لیتر)
۴	۵٫۰	نفت و روغن (میلی گرم در لیتر)
۱۲۱۶	۸۳۶	COD (میلی گرم در لیتر اکسیژن)
۵۳۰	۴۱۵	BOD _۵ میلی گرم در لیتر اکسیژن
۱٫۲	۱٫۶	باریم (میلی گرم در لیتر)
۰٫۵۸	۰٫۴۱	استرانسیم (گرم در لیتر)
۴۲	۲۳	آهن (میلی گرم در لیتر)
۶۰	۳۶	سدیم (گرم در لیتر)
۱٫۱	۰٫۷۱	پتاسیم (گرم در لیتر)
۱۳	۷٫۵	لیتیم (میلی گرم در لیتر)
۰٫۹۱۶۶	-	ویسکوزیته @ ۴۰ °C CST

آماده سازی نمونه ها

در این بخش ابتدا هر کدام از نمونه ها توسط تولون مورد شستشو قرار گرفته و سپس نمونه ها تحت سیستم اشباع توسط آب مخزن که آب سازند آسماری می باشد قرار داده شدند. پس از عملیات آماده سازی، شستشو و اشباع نمودن مغزه ها، آزمایش‌های تزریق به مغزه‌های مورد نظر در چندین مرحله به طور جداگانه انجام گرفت. در جدول ۱ آنالیز آب سازند و آب تزریقی نشان داده شده‌اند.

شرح دستگاه سیلابزنی

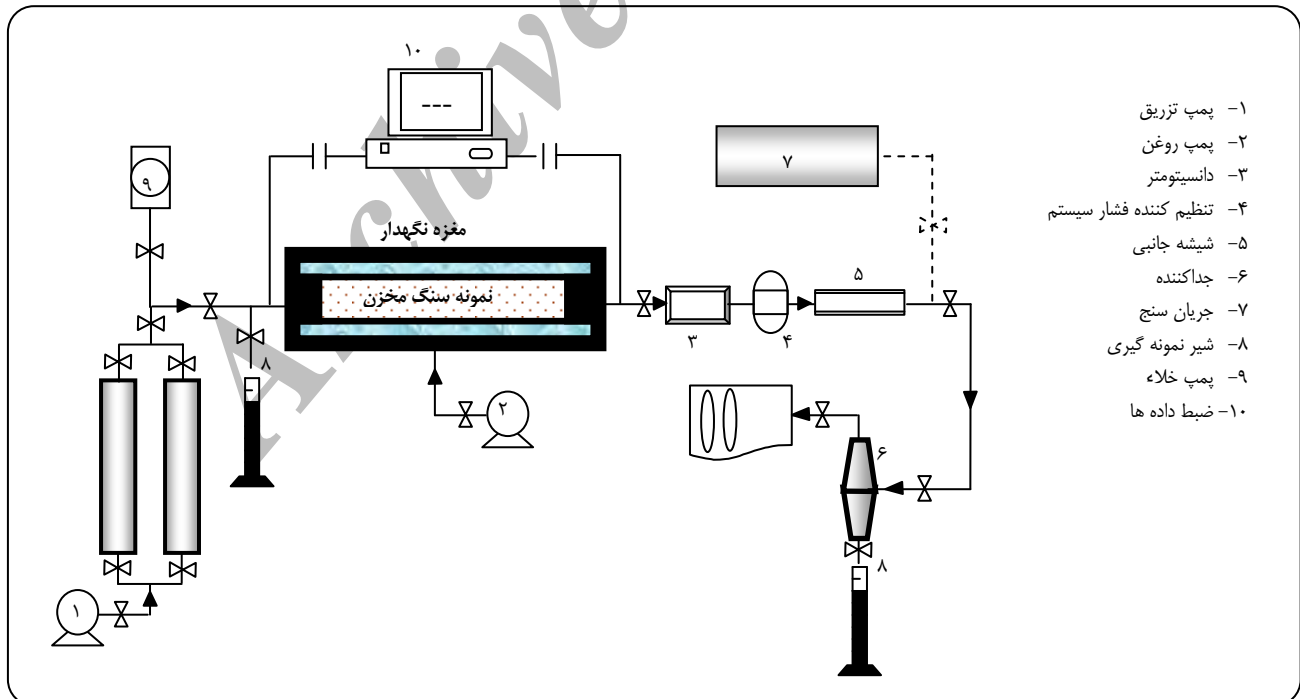
برای تزریق در این آزمایش‌ها از سیستم تحقیقاتی سیلابزنی استفاده شد. این دستگاه دارای مشخصات بارزی است که می‌تواند تحت شرایط مخزن از نظر درجه حرارت و فشار، عمل تزریق سیال را انجام دهد. به‌طور کلی این دستگاه از دو قسمت اصلی

جدول ۲- خاصیت‌های نمونه مغزه‌های به کار برده شده در آزمایش‌ها.

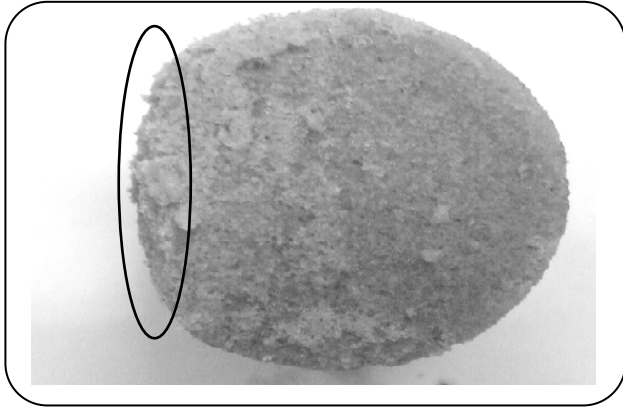
شماره مغزه	طول (cm)	قطر (cm)	وزن (g)	تخلخل (%)	نفوذپذیری (md)	حجم تخلخل (cc)
۱	۵,۳۹۲	۳,۷۴۷	۱۱۷,۴۳	۲۲,۰۷	۳۸۹,۶۵	۱۳,۱۲
۲	۵,۱۹۰	۳,۷۴۷	۱۱۰,۰۵	۲۶,۴۸	۵۱۲,۴۲	۱۴,۳۵
۳	۵,۱۰۵	۳,۷۵۶	۱۱۰,۳۴	۲۷,۰۲	۳۴۹,۶۵	۱۵,۲۷
۴	۵,۲۸۲	۳,۷۴۶	۱۱۴,۲۷	۲۳,۸۹	۴۵۹,۱۸	۱۳,۹۰
۵	۴,۷۹۱	۳,۷۴۸	۱۱۵,۵۷	۱۸,۸۴۹	۱۶,۵۸	۹,۹۸
۶	۴,۸۴	۳,۷۶	۱۲۵,۱۶	۱۴,۱۸	۹۰,۳	۷,۶۵
۷	۴,۰۹	۳,۷۷	۱۰۰,۱۶	۲۰,۴۷	۵۰,۱۰۲	۹,۳۸

جدول ۳- نوع سیال تزریقی و ساختار سنگ نمونه در هر یک از آزمایش‌های تزریق.

شماره آزمایش	سیال تزریقی	سیال اشباع شده در سنگ	ساختار سنگ
آزمایش-۱	آب سازند و آب تزریقی به مخزن	آب سازند مخزن مورد نظر	ماسه ای
آزمایش-۲	آب تزریقی صاف شده و صاف نشده	آب سازند مخزن مورد نظر	ماسه ای
آزمایش-۳	آب سازند صاف شده، آب تزریقی صاف شده و صاف نشده	آب سازند مخزن مورد نظر	ماسه ای
آزمایش-۴	آب سازند صاف شده، آب تزریقی صاف نشده	آب سازند	ماسه ای
آزمایش-۵	آب تزریقی صاف نشده	آب سازند	آهکی
آزمایش-۶	آب تزریقی	آب سازند	آهکی
آزمایش-۷	آب سازند و آب تزریقی صاف شده	آب سازند	آهکی



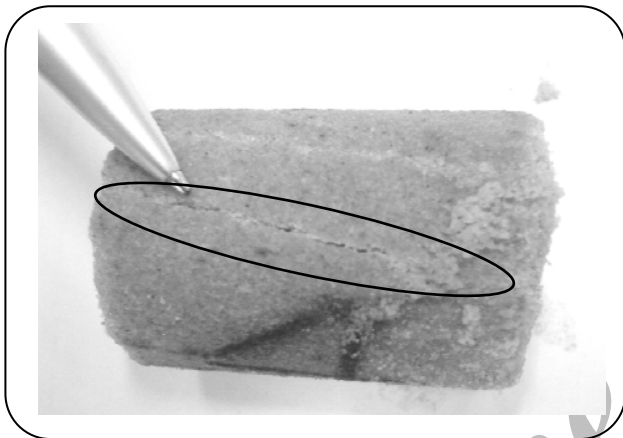
شکل ۱- شمای سیستم تزریق به مغزه.



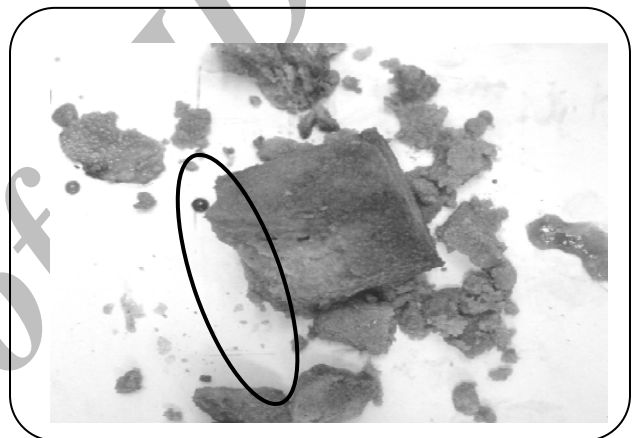
شکل ۴- نمای نشان داده شده از بالای نمونه مغزه شماره ۲ بعد از فرآیند تزریق آب.



شکل ۲- نمونه مغزه شماره ۱ در محل تزریق.



شکل ۵- شکاف ایجاد شده در مغزه شماره ۲ در زمان عملیات تزریق.



شکل ۳- شمای نمونه مغزه شماره ۱ بعد از تزریق (خارج شده از محل مغزه نگهدار).

به دلیل دارا بودن شکاف ریز و عدم مقاومت سنگ، که باعث شسته شدن مغزه در محل ورود به مغزه و ایجاد شکاف گردید متوقف شد. به عبارتی با توجه به شکاف ایجاد شده و نفوذپذیری مناسب سنگ مخزن و شسته شدن در محل تزریق افت فشاری که به واسطه افزایش شدت جریان تزریق باید مشاهده می‌شد، در عمل چندان محسوس نبود. در شکل‌های ۴ و ۵ نمونه مورد نظر بعد از تزریق اولیه نشان داده شده است.

اثر ذره‌های معلق و شدت جریان در کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن ماسه‌ای با سیمان شدگی ضعیف (آزمایش ۳)

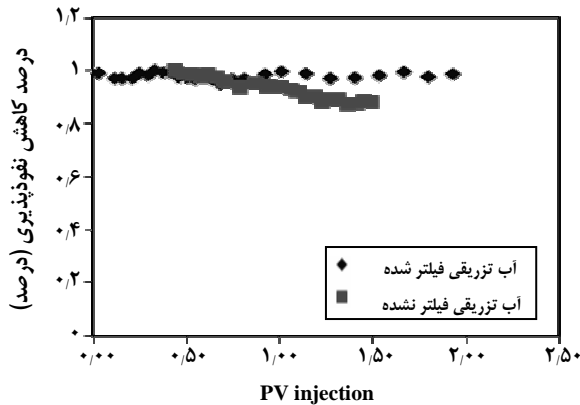
آزمایش‌ها در این بخش بر روی مغزه شماره ۳ انجام شد که در جدول ۲ خواص این مغزه نشان داده شده است. در این قسمت برای جلوگیری از مشکلات شکستگی مغزه سیستم تحت فشار ۲۰ بار قرارداده شده و با شرایط دمایی ۸۰ درجه سانتیگراد عملیات تزریق

چاه‌های تزریقی، تشکیل شده از ماسه، با سیمان شدگی ضعیف، همانند بعضی از قسمت‌ها در لایه آسماری مخزن فوق، به وجود آید. شکل ۳ نمونه مغزه را بعد از تزریق در حالی که از نگهدارنده مغزه خارج شده نمایش می‌دهد.

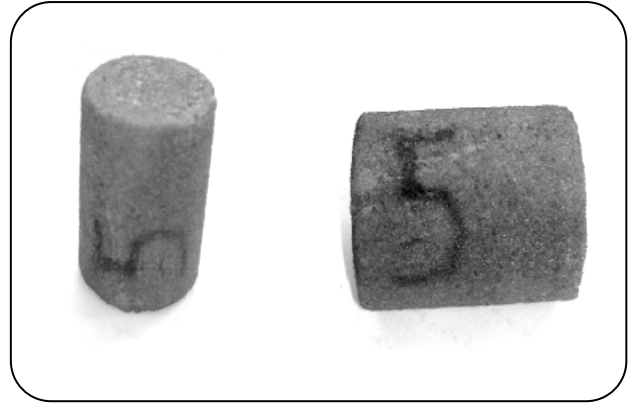
تأثیر فشار بر این نوع سنگ مخزن و شستن ماسه‌ها در قسمت ابتدایی مغزه به طور کامل مشخص است. با توجه به شرایط ایجاد شده برای مغزه می‌توان گفت در این حالت افزایش طول مغزه می‌تواند مدل واقعی تری از حرکت سیال در محیط متخلخل در داخل مخزن به ما نشان دهد.

اثر شکاف و عدم مقاومت سنگ مخزن در نمونه سنگ ماسه‌ای (آزمایش ۲)

این آزمایش بر روی مغزه شماره ۲ انجام گرفت. ویژگی‌های این مغزه در جدول ۲ آورده شده است. آزمایش تزریق روی این نمونه



شکل ۷- مقایسه اثر فیلتراسیون آب تزریقی بر روی مغزه شماره ۳ با شدت جریان ۴ cc/h.



شکل ۶- نمای جانبی و مقابل نمونه مغزه شماره ۳ بعد از عملیات تزریق.

کوچک بودن اندازه ذره‌ها کاهش محسوسی در نفوذپذیری مشاهده نشد. در ادامه برای بررسی اثر حرکت ذرات در محیط نمونه مغزه و تاثیر افزایش شدت جریان بر حرکت ذرات سعی شد شدت جریان تزریقی در چند مرحله افزایش و سپس کاهش یابد. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان عدم کاهش نفوذپذیری در مغزه را مشاهده نمود. در این مرحله نتایج نشان می‌دهند که افزایش شدت جریان تا ۶۰ cc/h کاهش نفوذپذیری نشان نمی‌دهد.

هرچند که در مراحل ابتدایی در شدت جریان ۲۴ cc/h کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مشاهده شد اما نتیجه‌ها نشان می‌دهند این کاهش می‌تواند به دلیل ذرات معلق در آب تزریقی باشد. که به واسطه وجود حفره‌های ریزتر در سنگ مخزن و اندازه ذره‌های معلق در آب، در ابتدا ذره‌های معلق در حفره‌های ریزتر قرار گرفته و کاهش نفوذپذیری اولیه کمی را نشان دهد.

با ادامه آزمایش به‌ویژه در شدت جریان‌های بالاتر، ذره‌های ریزتر توانایی حرکت در حفرات بزرگتر را داشته بنابراین در شدت جریان‌های اعمال شده بر روی مغزه مورد نظر کاهش در نفوذپذیری به دلیل گرفتگی حفرات ایجاد نشد.

اثر شکاف‌های ایجاد شده در محل تزریق بر آسیب دیدگی سازند (آزمایش ۴)

در این آزمایش بعد از آماده سازی مغزه شماره ۴ تزریق اولیه آب سازند صاف شده برای ۲ ساعت با شدت جریان ۴ cc/h انجام شد سپس فرایند تزریق نمونه آب تزریقی از شدت جریان ۴ cc/h آغاز شد و با افزایش شدت جریان سعی شد تغییرهای نفوذپذیری سنگ مخزن مورد ارزیابی قرار گیرد.

انجام می‌گیرد. در این آزمایش پس از تزریق آب صاف شده سازند، تصمیم گرفته شد تا اثر فیلتراسیون آب در حالت صاف‌شده و صاف‌نشده با هم مقایسه شود و تاثیر مواد معلق جامد در کاهش نفوذپذیری مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۶ نیز نمای جانبی مغزه را بعد از فرایند تزریق نشان می‌دهد. در این آزمایش ابتدا آب تزریقی از صافی ۴۴ میکرونی عبور داده شد سپس این آب تحت شرایط اعمال شده به مغزه با شدت جریان ۴ cc/h به مغزه تزریق شد که نتیجه‌ها، افت محسوسی را نشان ندادند. هرچند تغییرهای اندکی در شرایط پایدار مشاهده شد اما می‌توان در مقایسه با آب صاف نشده این تغییرهای را ناچیز فرض نمود. در ادامه نیز آب تزریقی صاف نشده با شدت جریان ۴ cc/h برای بیش از ۲ PV به مغزه تزریق شد که اندازه‌گیری نفوذپذیری ۱۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این کاهش با توجه به نوع سنگ مخزن که تفاوت آن در لایه‌های آسماری به‌طور کامل مشاهده می‌شود و همچنین نوع سیال تزریقی از نظر تعداد و بزرگی ذرات می‌تواند متفاوت باشد.

شکل ۷ کاهش نفوذپذیری و مقایسه آبهای تزریقی صاف‌شده و صاف‌نشده و تاثیر فیلتراسیون آب‌های تزریقی را نشان می‌دهد. در ادامه برای بررسی اثر شدت جریان بر تغییرهای نفوذپذیری در مرحله بعد، آزمایش تزریق نمونه آب تزریقی در شدت جریان‌های بالاتر انجام شد. شکل ۸ اثر آب تزریقی در شدت جریان‌های بالاتر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است کاهش نفوذپذیری در مراحل ابتدایی تزریق اتفاق افتاده است، به عبارتی با توجه به کاهش اولیه در شدت جریان ۴ cc/h و سپس پایدار شدن جریان می‌توان این طور بیان نمود که کاهش اولیه، نشان دهنده گرفتگی حفره‌های ریزتر را دارد و با ادامه تزریق به دلیل توانایی حرکت ذره‌ها در حفره‌ها و

به دلیل پائین بودن مقاومت سنگ و سیمان شدگی ضعیف سنگ علاوه بر شسته شدن سنگ در محل تزریق و به هم خوردگی ساختار سنگ در محل تزریق، در مغزه مورد نظر شکاف ایجاد شد. تأثیر این شکاف به صورتی بود که تا 600 cc/h اثر محسوسی در تغییر نفوذپذیری و یا فشار تزریقی مشاهده نشد. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مغزه مورد نظر را در فرآیند بعد از تزریق نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۱۳ شکاف ایجاد شده در سنگ نمایش داده شده است که خمیر شدگی سنگ مخزن به واسطه شدت جریان بالا به روشنی قابل مشاهده می‌باشد.

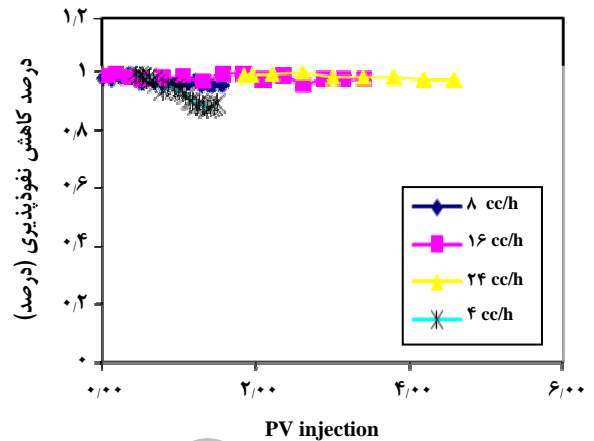
با توجه به اینکه در زمان آزمایش به دلیل تغییر نکردن فشار تزریقی، زمان شکستگی سنگ به درستی مشخص نمی‌باشد و بیشتر این موضوع احتمال می‌رود که سنگ از ابتدا دارای شکاف ریز بوده و در همان مراحل اولیه تزریق این شکستگی ایجاد شده است. بنابراین می‌توان گفت که داده‌های آزمایش فوق برای بررسی تغییرهای نفوذپذیری بر اثر پدیده‌های ایجاد شده قابل مناسب نمی‌باشد.

اما آنچه که در این بخش از آزمایش‌ها می‌توان به آن موضوع اشاره داشت این است که وجود شکاف‌ها در محل تقاطع با چاه‌های تزریقی می‌تواند در زمانهای اولیه تزریق کاهش زیادی را نشان ندهند و زمان مشاهده تغییرهای نفوذپذیری در زمان‌های دیرتر و حتی سال‌های بعد خود را نشان دهد. در صورت عدم عملیات درست تزریق در بهبود آبهای تزریقی، این موضوع می‌تواند برای مخازن چندان مناسب نباشد، به خصوص سازندهای مخازن آهکی که دارای شکاف‌های زیادی می‌باشند، می‌توانند دچار صدمه‌های بیشتری شوند.

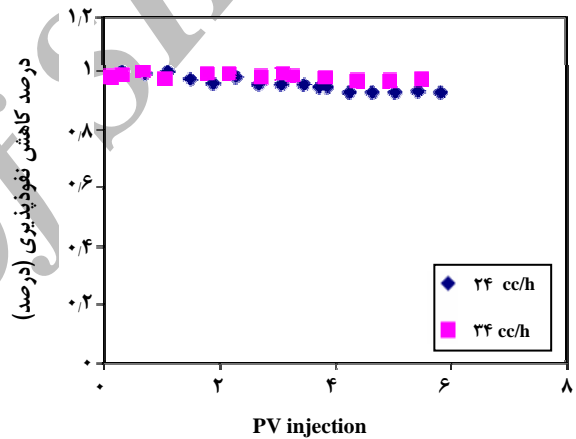
همچنین خمیرشدگی سنگ مخزن در محل تزریق و در محل جریان داخل شکاف کاملاً قابل مشاهده می‌باشد، این موضوع می‌تواند در مکان‌های نزدیک محل تزریق به خصوص در اطراف چاه قابل مشاهده باشد.

اثر ذره‌های معلق و املاح در آب تزریقی در گرفتگی حفره‌ها و بالا رفتن فشار تزریق در نمونه آهکی (آزمایش ۵)

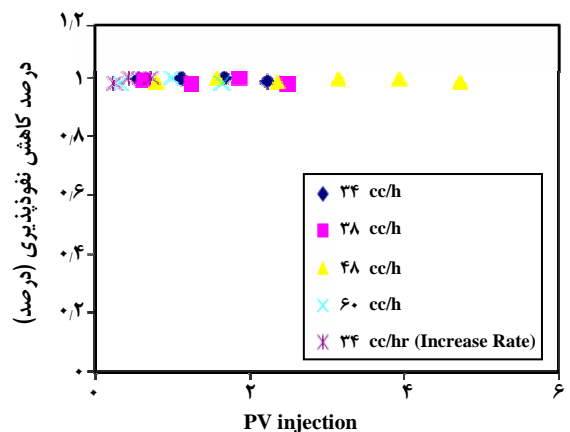
مغزه مورد نظر در این آزمایش، مغزه شماره ۵ انتخاب شد. این مغزه از جنس آهکی با نفوذپذیری $16/5$ میلی داری بود که پس از آماده سازی و قراردادن در مغزه نگهدار، آزمایشات تزریق در دمای 75 درجه سانتیگراد انجام شد. فشار سیستم در 500 psi تنظیم گردید. ابتدا تزریق نمونه آب تزریقی با شدت جریان 4 cc/h انجام شد که پس از تزریق حدود 2 PV ، افت فشار در سنگ مشاهده شد که به دلیل وجود شکاف در سنگ این شکستگی به وجود آمد.



شکل ۸- اثر شدت جریان آب تزریقی بر کاهش نفوذپذیری بر روی مغزه شماره ۳.



شکل ۹- اثر ذره‌های معلق در آب تزریقی در مرحله ابتدایی تزریق در مغزه شماره ۳.

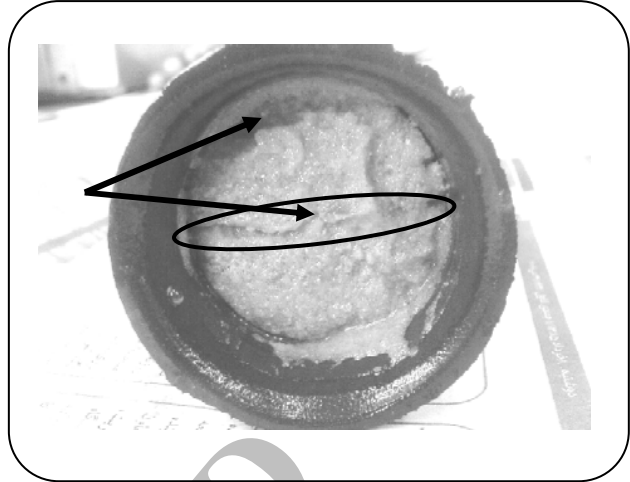


شکل ۱۰- اثر افزایش شدت جریان در فرآیند تزریق به مغزه.

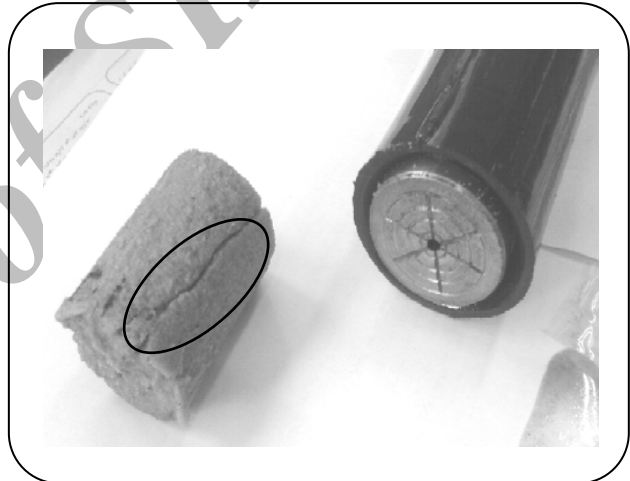
سپس فشار از سیستم برداشته شد و با شدت جریان ۴ cc/h تزریق ادامه داده شد. در شکل ۱۴ نتیجه‌های حاصل از تغییرهای فشار تزریقی نشان داده شده است. در شکل فوق زمان شکست ایجاد شده در سنگ، مشخص شده است. این تست به روشنی اثر شکاف را در محل تزریق آب نشان می‌دهد. شکل ۱۵ افت نفوذپذیری را در قبل از شکاف نشان می‌دهد و در ادامه شکل ۱۶ کاهش نفوذپذیری را در شدت جریان‌های بالاتر بعد از ایجاد شکاف در نمونه نشان می‌دهد. با توجه به نتیجه‌ها می‌توان گفت که در صورت وجود املاح و رسوبات در آب، و در صورت گرفتگی حفره‌ها، افزایش ناگهانی فشار تزریق و عدم مقاومت سنگ احتمال شکست سنگ را در محل تزریق بالا خواهد برد. این گرفتگی در سنگ‌های از نوع آهکی مشخص‌تر می‌باشد. اندازه حفرات کوچکتر و سیمان‌شدگی با استحکام بالاتر ذرات در نمونه‌های آهکی و همچنین نفوذپذیری کمتر در نمونه‌های فوق از جمله عواملی می‌باشند که حرکت ذره‌ها در میان محیط متخلخل را نسبت به نمونه‌های ماسه‌ای سخت‌تر می‌نمایند و باعث گرفتگی حفرات می‌شود. این موضوع می‌تواند یکی از دلایلی باشد که بسیاری از پژوهشگران کاهش نفوذپذیری را در شرایط آزمایشگاه با شرایط عملیاتی یکسان نمی‌بینند.

حرکت ذره‌های معلق در نمونه سنگ آهکی (آزمایش ۶)

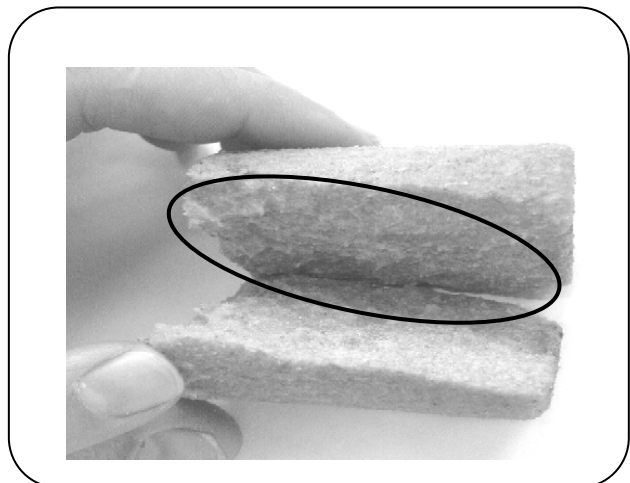
در این آزمایش از نمونه مغزه شماره ۶ استفاده شد. این نمونه از جنس کربناته آهکی با نفوذپذیری ۹۰ میلی داری می‌باشد. مطابق آزمایش‌های قبل پس از آماده سازی نمونه، شرایط پایدار با تزریق آب سازند ایجاد شد و سپس آزمایش تحت شرایط ۲۰۰۰ psi و دمای ۷۵ °C ادامه یافت. در ابتدا آب تزریقی با شدت جریان ۴ cc/h انجام گرفت. شکل ۱۷ نمای جانبی مغزه شماره ۱۳ را بعد از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. شکل ۱۸ افزایش فشار تزریق تا ۲۴۶۰ psi را نشان می‌دهد که به دلیل افت نفوذپذیری و صدمه دیدگی سازند می‌باشد. در ادامه آزمایش، آب سازند صاف شده به نمونه مغزه تزریق شد. در این شرایط افزایش و کاهش شدت جریان تغییری نه چندان زیاد اما محسوس در افت فشار مشاهده شد. شکل ۱۹ اثرهای این شدت جریان را در اختلاف فشار نشان می‌دهد. با توجه به فرض سازگاری سیال در این شرایط و عدم وجود ذره‌های معلق که توسط فیلتر ۵ میکرونی از آب جدا شدند می‌توان امکان حرکت ذره‌ها را در این نوع مغزه نتیجه گرفت که البته شدت جریان بالا و حرکت ذرات می‌تواند باعث تغییر ساختار در محیط متخلخل شود.



شکل ۱۱- نمونه مغزه بعد از عملیات تزریق در محل تزریق در مغزه شماره ۴.



شکل ۱۲- نمونه مغزه شماره ۴ بعد از عملیات تزریق خارج شده از مغزه نگهدار.



شکل ۱۳- شکاف ایجاد شده در نمونه مغزه در فرآیند تزریق آب.

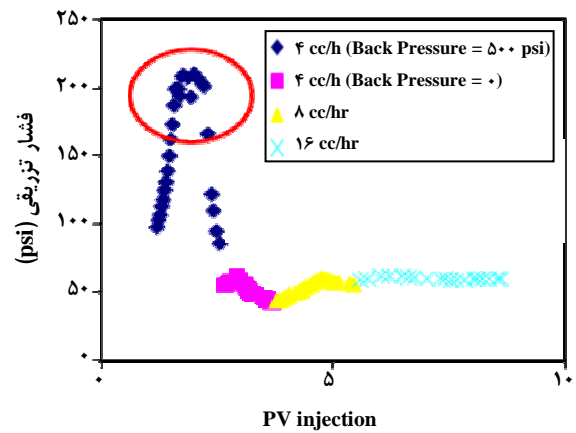
اثر افزایش شدت جریان در آسیب دیدگی سازند در نمونه سنگ آهکی (آزمایش ۷)

در این آزمایش از مغزه شماره ۷ که یک نمونه آهکی می‌باشد استفاده شد. این مغزه دارای تخلخل ۲۰ درصد و نفوذپذیری ۵۰ میلی داری می‌باشد. بعد از شرایط پایدار آب تزریقی با شدت جریان ۲ cc/h به مغزه تزریق گردید که مطابق شکل ۲۰ پس از تزریق PV ۱۴ کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی نفوذپذیری مشاهده شد با توجه به عدم تغییرات نفوذپذیری توسط آب سازند صاف شده و کاهش نفوذپذیری بعد از تزریق آب صاف نشده می‌توان این کاهش را به دلیل ذره‌های معلق در آب دانست در ادامه برای مطالعه اثرهای شدت جریان در جدا شدن ذره‌های محیط متخلخل و حرکت در محیط متخلخل سعی شد افزایش و کاهش شدت جریان آب سازند صاف شده بر سیستم اعمال شود که شدت جریان تا ۳۰ cc/h افزایش و سپس در مراحل مختلف به حالت ابتدایی برگردانده شد. شکل ۲۱ این تغییرها را نشان می‌دهد که نسبت به حالت قبل تغییرهای قابل توجه‌تری مشاهده می‌شود. در حالت دیگر آب سازند با شدت جریان ۱۶ cc/h به مغزه تزریق شد. در حالتی که آب سازند از فیلتر ۱۰ میکرونی عبور داده شد کاهش نفوذپذیری مشاهده نگردید اما در حالت بدون فیلتراسیون آب سازند کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی مشاهده گردید. این آزمایش به وضوح اثر ذره‌های معلق و عدم کیفیت آب تزریقی را نشان می‌دهد به عبارتی عدم عملیات فیلتراسیون صحیح آب یکی از عواملی که گرفتگی در لایه‌های کرناته در مخزن فوق می‌باشد در صورتی که در ساختار ماسه‌ای به دلیل توانایی حرکت ذرات در محیط و وجود حفره‌ها بزرگتر، کاهش موثری در نتایج دیده نشد

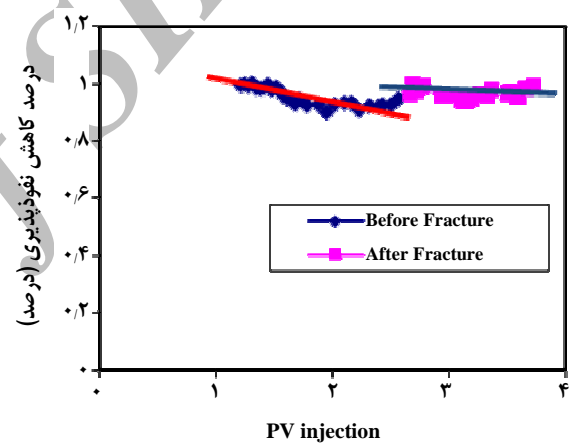
نتیجه‌گیری

- آزمایش‌های تزریق مغزه در نمونه سنگ‌های ماسه‌ای نشان دادند که به دلیل نفوذ پذیری بالا و تخلخل بالا در سیستم و سادگی حرکت ذرات ریز محلول در آب در درون سازند احتمال افزایش فشار تزریق در مراحل ابتدایی تزریق پائین می‌باشد. اما با حرکت آب در سازند در صورت وجود ذرات و ایجاد رسوب باعث گرفتگی در زمانهای طولانی‌تر را خواهد داشت.

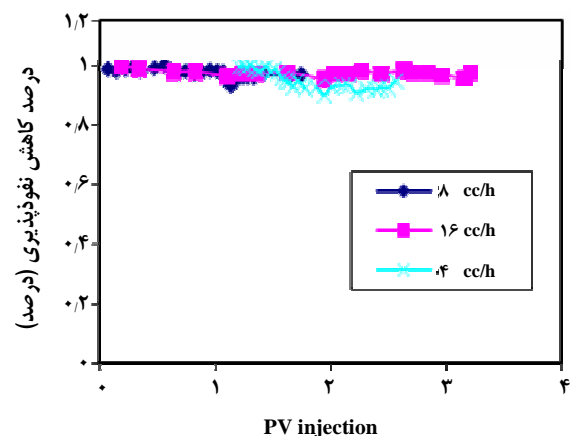
- در آزمایش‌های تزریق در نمونه‌های ماسه‌ای، شسته شدن ماسه‌ها در شدت جریان‌های بالا مشاهده شد این امر به دلیل عدم سیمان‌شدگی مقاوم در سازندهای ماسه‌ای در لایه آسماری این مخزن می‌باشد احتمال شسته شدن این ماسه‌ها، به ویژه در شدت جریان‌های اطراف چاه‌های تزریقی بسیار بالا می‌باشد.



شکل ۱۴- اثر تزریق آب بدون فیلتراسیون بر روی فشار تزریقی در مغزه شماره ۵.



شکل ۱۵- اثرهای آب تزریقی بر ایجاد شکاف و کاهش نفوذ پذیری.



شکل ۱۶- اثرهای افزایش شدت جریان آب تزریقی بر روی کاهش نفوذپذیری بعد از ایجاد شکاف در مغزه ۵.

- وجود شکاف در سازند، خصوصا در محل چاههای تزریقی می‌تواند از افزایش فشار تزریق به خصوص در مراحل ابتدایی جلوگیری نماید. هر چند این امر می‌تواند در کاهش مشکلات تزریق (افزایش فشار تزریق) موثر باشد اما در صورت نزدیک بودن این شکافها به چاههای تولیدی، می‌تواند باعث افت فشار در چاههای تولیدی نیز گردد.

- در نمونه‌های ماسه‌ای، شکافهای ریز با سیمان شدگی ضعیف بین شکافها باعث می‌گردد که در شدت جریان بالا این شکافها به صورت یک کانال برای جریان آب عمل نمایند. به عبارتی ذره‌های ماسه در بین شکافها شسته خواهند شد و مسیرهای حرکت آب حالت خمیری شکل پیدا خواهند نمود.

- با توجه به نتایج آزمایش‌های تزریق به مغزه در نمونه‌های ماسه‌ای، در آزمایش‌ها افزایش شدت جریان در نمونه آب تزریقی، حرکت ذره‌ها سازند که بتوانند باعث ایجاد گرفتگی و کاهش نفوذپذیری در نمونه مورد نظر شوند، مشاهده نشد. در حالی که در نمونه‌های آهکی این کاهش را می‌توان مشاهده نمود.

- تزریق آب سازند در نمونه سنگ‌های آهکی کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی نفوذپذیری را نشان دادند این کاهش می‌تواند به دلیل ذرات معلق در آب سازند و همچنین فراوانی حفرهای ریزتر باشد.

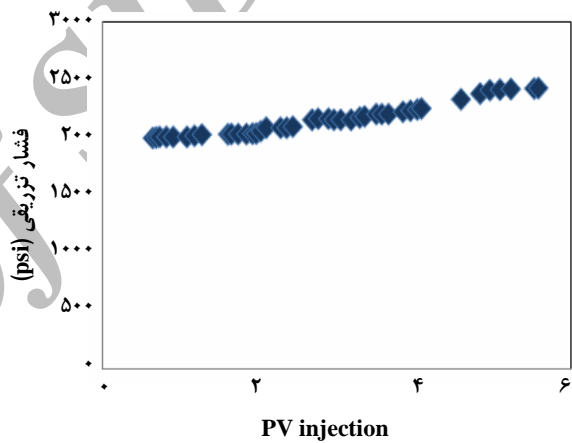
- یکی از مسئله‌های مهم در تغییر ساختار و یا ایجاد شکاف در نمونه سنگ، تغییرات فشاری بر روی نمونه می‌باشد، در این تحقیق با توجه به مسئله‌های گفته شده و محدودیت‌های عنوان شده در تعدادی از آزمایش‌ها شرایط تغییر داده شده است، همچنین انتقال نمونه‌ها از شرایط مخزنی به شرایط آزمایشگاه می‌تواند تغییرهایی را در نمونه سنگ از جهت تنش‌های اعمالی بر نمونه ایجاد نماید که این مورد از محدودیت‌های دیگری است که باید به آن توجه نمود.

پیشنهادها

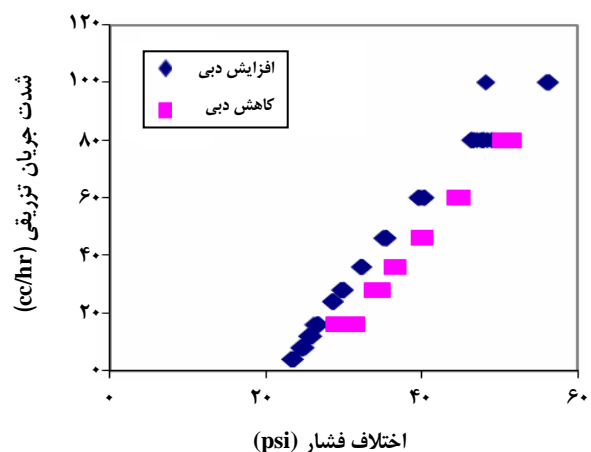
- در فرایند تزریق آب در مخازن با ساختار ماسه‌ای در صورت ارتباط چاههای تزریقی با تولیدی و تغییر ویژگی‌های سنگ مخزن و بالا بودن هتروژنیتهی در نزدیک چاههای تولیدی احتمال ایجاد مشکل در سال‌های بعد از تزریق در چاههای تولیدی بسیار بالا می‌باشد. بنابراین مناسب می‌باشد این موضوع در فرآیندهای فوق مد نظر قرار گیرد در حال حاضر با در نظر گرفتن حجم مخزن و کم بودن تعداد چاههای تزریقی نسبت به چاههای تولیدی و همچنین موقعیت



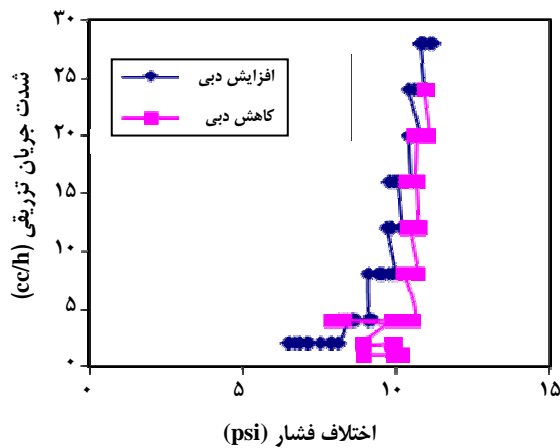
شکل ۱۷- نمای جانبی مغزه شماره ۶ بعد از عملیات تزریق.



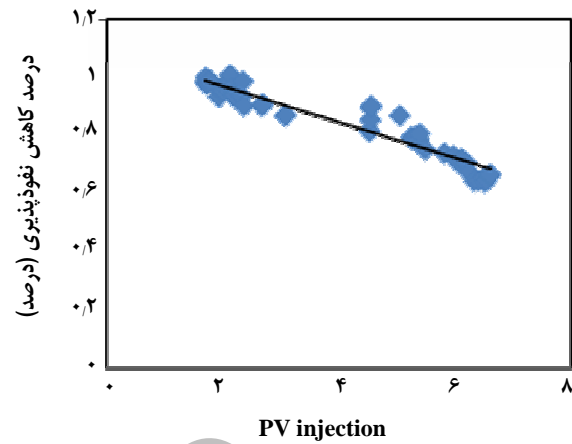
شکل ۱۸- اثر آب تزریقی بر افزایش فشار تزریقی با شدت جریان ۴ cc/hr در مغزه شماره ۶.



شکل ۱۹- اثرهای افزایش و کاهش شدت جریان در فرایند تزریق آب سازند صاف شده در مغزه شماره ۶.



شکل ۲۱- تغییرهای شدت جریان در مغزه شماره ۷.



شکل ۲۰- تغییرهای نفوذپذیری در تزریق نمونه آب در مغزه شماره ۷.

از ناسازگاری این نوع آبها با آب سازند در شرایط مخزن می‌باشند. - برای بررسی جامع‌تر پیشنهاد می‌گردد با توجه به عدم سیمان‌پذیری مقاوم سنگ‌های ماسه‌ای مورد نظر و احتمال حرکت ذرات ماسه، آزمایشات در نمونه‌های با طول بیشتر انجام پذیرد، تا این پدیده دقیق‌تر مشاهده و بررسی شود. - بررسی‌های انجام شده و نتیجه‌های تزریق به نمونه سنگ‌های انتخاب شده نشان می‌دهند تزریق نمونه‌های ماسه‌ای با نمونه‌های آهکی بسیار متفاوت بوده، و یکی از موارد مهم در طراحی فرایند تزریق بررسی لیتولوژی چاه‌های تزریقی و پارامترهای سازند می‌باشند همچنین وجود شکاف در درون چاه تزریقی نیز یکی از مسایل مهم در طراحی چگونگی تزریق و مدیریت تزریق به این چاه‌ها می‌باشد. بنابراین در نظر گرفتن شرایط فوق در بهبود عملکرد فرایند بسیار موثر خواهد بود.

چاه‌های تزریقی که بیشتر جنبه دفع پساب به آبد مخزن را دارند، اثرهای محسوسی در تاریخچه چاه‌های تولیدی که ناشی از چاه‌های تزریقی باشد مشاهده نشده است.

- در صورت وجود شکاف در دهانه چاه در صورت عدم تصفیه صحیح آب و وجود مواد معلق و ذره‌های جامد می‌تواند در درازمدت در فاصله‌های دورتر از چاه‌های تزریق ایجاد مشکل گرفتگی ایجاد نماید که به دلیل عدم دسترسی این مشکل می‌تواند بسیار خطرناک‌تر از مشکلات گرفتگی اطراف چاه باشد. لذا پیشنهاد می‌شود در این شرایط بهبود کیفیت آب تزریقی تنها بر اساس تزریق پذیری چاه طراحی نشود.

- در صورت تزریق پساب‌های حاصل از نمکزدایی در یک مخزن مشخص، باید توجه نمود که املاح تشکیل شده در آب که به واسطه تغییر شرایط ترمودینامیکی ایجاد می‌شوند بسیار مؤثرتر

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۶/۲ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۶/۲۶

منابع

- [1] Bennion D.B., Thomas, F., Injection Water Quality - A Key Factor to Successful Water Flooding, *JCPT*, **37**(6), (1998).
- [2] Honarpour M., Koederitz L., Harvey A.H., "Relative Permeability of Petroleum Reservoirs", *CRC Press Inc.*, (1986).
- [3] Liu X. & Civan F., Formation Damage and Filter Cake Buildup in Laboratory Core Tests: Modeling and Model Assisted Analysis, *SPEFE*, *SPE 25215 - P*, Mar, **11**(1), pp. 26-30, (1996).
- [4] Muecke T.W., Formation Fines and Factors Controlling Their Movement in Porous Media, *JPT*, *SPE 7007*, **31**(2), pp. 144-150 (1979).

- [5] Gruesbeck C., Collins R.E., Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media, *SPEJ*, **22**(6), pp. 847-856 (1982).
- [6] Sengupta S.K., Effect of Flow Rate and Rheology on Shear Strength of Migrating Formation Fines Due to Flow of Pseudoplastic Fluids, Lafayette, LA, *SPE 10669*, March (1982).
- [7] Gabriel G.A., Inamdar G.R., An Experimental Investigation of Fines Migration in Porous Media, San Francisco, CA, *SPE 12168*, (1983).
- [8] Borchardt J.K., Brown D.L., Clay Stabilizers Improve EOR Injection Rates, *Oil & Gas Journal*, Sept.10, p. 50 (1984).
- [9] Leone J.A., Scott M.E., Characterization and Control of Formation Damage During Waterflooding in a High Clay Content Reservoir, *SPE 16234*, (1988).
- [10] Selby R.J., Ali S.M.F., Mechanics of Sand Production and the Flow of Fines in Porous Media, *JCPT*, **24**(3), (1988).
- [11] Davidson D.Fi., "Invasion and Impairment of Formations by Particulates", Unsolicited Manuscript, *SPE 8022*, (1979).
- [12] Eleri O.O., Ursin J.R., Physical Aspects of Formation Damage in Linear Flooding Experiments, Lafayette, LA, *SPE 23784*, Feb 26-27, (1992).
- [13] Zhang N.S., An Experimental Investigation of the Formation Damage Caused by Produced Oily Water Injection, Aberdeen, UK, *SPE 26702*, Sept. 7-10, (1993).
- [14] Francis P., Dominating Effects Controlling the Extent of Drilling Induced Damage, The Hague, Netherlands, *SPE 38182*, June 2-3, (1997).
- [15] Rochon J., Water Quality for Injection Wells, Lafayette, LA, *SPE 31122*, Feb 14-16, (1996).
- [16] Francis P., Dominating Effects Controlling the Extent of Drilling Induced Damage, The Hague, Netherlands, *SPE 38182*, June 2-3, (1997).
- [17] Tovar J., Formation Damage Studies on Reservoir Rocks Using Water Base and Oil Base Muds, Lafayette, LA, *SPE 27349*, Feb. 7-10, (1994).
- [18] Jiao D. & Sharma M.M., Mud Induced Formation Damage in Fractured Reservoirs, The Hague, Netherlands, *SPE 30107*, May 15-16, (1995).
- [19] 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, *SPE 39921*, Apr 5-8, (1998).
- [20] Kwan M.Y., Cullen M.P., Jamieson P.R., Fortier R.A., A Laboratory Study of Permeability Damage to Cold Lake Tar Sands Cores, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **28** (1), p. 56 (1989).
- [21] Souto E., Bazin B., Ion Exchange Between Hydrogen and Homoionic Brines Related to Permeability Reduction, presented at SPE International Symposium on Oil Field Chemistry, New Orleans, LA, *SPE 25203*, March 2-5, (1983).

- [22] Gruesbeck C., Collins R.E., Entertainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media, *SPE Journal*, **22**(6), p. 847 (1982).
- [23] Eleri O.O., Ursin J.R., Physical Aspects of Formation Damage in Linear Flooding Experiments, presented at SPE Intl. Symposium on Formation Damage Control, Louisiana, *SPE 23784*, Feb. 26-27, (1992).
- [24] Todd A.C. et al., Review of Permeability Damage Studies and Related North Sea Water Injection, Presented at the 1979 SPE Intl. Symposium on Oil Field and Geothermal Chemistry, Dallas, *SPE 7883*, pp. 22 – 24, January (1979).
- [25] Eric C., Crowell D., Brant Bennion F., Brent Thomas, Douglas W. Bennion, The Design & Use of Laboratory Tests to Reduce Formation Damage in Oil & Gas Reservoirs, Hycal Energy Research Laboratories Ltd., the 13th Annual Conference of Ontario Petroleum Institute, Toronto, Ontario (1991).
- [26] Gray D.H., Rex R.W., Formation Damage in Sandstone Caused by Clay Dispersion and Migration, *Fourteenth National Comperence on Clays and Clay Mineral*, **14**, p. 355 (1966).

Archive of SID