

# ارائه روشی جدید و کاربردی جهت اندازه‌گیری سرعت بحرانی جریان تزریق در مخازن کربناته

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم  
شماره ۷۸

صفحه، ۱۵۹-۱۵۰ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۱۳

علی حسینی\* و سید علیرضا مرتضوی  
واحد پژوهش حفاری، پژوهشگاه صنعت نفت

دیگری استفاده از رابطه تعیین درجه آسیب سازند است، برای پلاگ‌های مختلف در سرعت پایه می‌باشد. نتایج آزمایش‌های تزریق نشان می‌دهد که مکانیسم آسیب ایجاد شده به صورت مهاجرت ذرات ریز و یا فعال‌سازی شکستگی‌ها بوده و به‌منظور جلوگیری از آن باید سرعت تزریق را پایین‌تر از مقدار بحرانی آن نگاه داشت. چنانچه نرخ تزریق از محدوده بحرانی فراتر رود، آسیب به‌وجود آمده به‌صورت دائمی و برگشت ناپذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: نرخ جریان بحرانی، سیلاب‌زنی نمونه، آسیب سازند، سازند کربناته، مهاجرت ذرات ریز

## مقدمه

اکثر مخازن دارای کانی‌های حساس با درجات متغیر می‌باشند. به‌طور کلی این کانی‌ها دارای قطر دانه‌ای خیلی کوچک (کمتر از  $20 \mu\text{m}$ ) بوده و بر روی سطح فضاهای خالی که با سیالات خارجی در تماس می‌باشند، پراکنده شده‌اند. در طول عملیات تکمیل، سیالات خارجی مختلف

## چکیده

بازیافت ثانویه و ثالثیه می‌تواند منجر به کاهش شدید و دائمی تراوایی سنگ شود که دلیل اصلی آن واکنش بین سیالات تزریقی و سنگ مخزن است. این امر به‌ویژه در مخازنی با درصد رس بالا، تراوایی کم و سنگ‌شدگی ضعیف دیده می‌شود. آسیب سازند ممکن است در اثر رسیدن سرعت تزریق به حد بحرانی جریان آشفته به‌صورت موقتی و برگشت‌پذیر و به‌دلیل تولید ذرات ریز یا ماسه و یا فعال‌سازی شکستگی‌های موجود در سازند به‌صورت دائمی ایجاد شود که در این‌صورت شاهد افت فشار قابل توجهی در نزدیک دیواره چاه خواهیم بود. در تحقیق حاضر آزمایش‌های تزریق بر روی ۳ نمونه مغزه سازند کربناته فهلیان به‌منظور تعیین حد بحرانی دبی تزریق با یک روش جدید و کاربردی صورت گرفته است. محدوده بحرانی آسیب سازند برای پلاگ‌های مختلف در سیستم خطی قانون داریسی به‌صورت کمی و کیفی بررسی گردیده و یک روش جدید ارائه شده است. این روش شامل تلفیق دو روش اندازه‌گیری که یکی برگرداندن سرعت تزریق به مقدار پایه پس از هر مرحله افزایشی و

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی

در سازند ایفا می‌کنند [۹-۱۱]. همچنین ویسکوزیته سیال متحرک و هندسه فضاهای خالی موجود در سازند، نقش مهمی در تعیین سرعت بحرانی جریان دارد [۴]. سرعت جریان سیال متحرک در فضاهای خالی می‌تواند موجب معلق شدن ذرات ریز و یا ته نشین شدن آنها در فضاهای خالی گردد [۶ و ۷].

به‌منظور درک پدیده آسیب سازند و تعیین سرعت جریان بحرانی، آزمایش‌های تزریق بر روی سه نمونه پلاگ انجام گرفت. جهت ارزیابی پتانسیل مهاجرت ذرات ریز در مخزن کربناته، لازم است آزمایش حساسیت سنجی سرعت انجام شود. این روش شامل اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبی نمونه پلاگ توسط سرعت جریانی کمتر از میزان بحرانی می‌باشد که خط پایه نفوذپذیری نامیده می‌شود. سرعت جریان به‌صورت مرحله‌ای افزایش یافته و در نهایت پس از هر بار افزایش، به‌مقدار پایه آن برگردانده می‌شود. مقدار نفوذپذیری در هر مرحله اندازه‌گیری شده و سرعت بحرانی که منجر به آسیب سازند می‌گردد، اندازه‌گیری می‌شود. ارزیابی محدوده آسیب سازند به دو روش کیفی و کمی ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی به‌راحتی می‌توان محدوده آسیب سازند را در نمونه‌ها شناسایی نمود. در مقاله حاضر با یک تکنیک جدید و با تلفیق دو روش اندازه‌گیری که یکی برگرداندن سرعت تزریق به مقدار پایه پس از هر مرحله افزایشی [۱] و دیگری استفاده از رابطه تعیین درجه آسیب سازند ارزیابی آسیب سازند در سرعت پایه پرداخته شده است [۲]. نتایج حاصل نشان می‌دهد که آسیب حاصل، متأثر از مکانیسم‌های مهاجرت ذرات در محیط متخلخل و فعال سازی شکستگی‌های طبیعی موجود در نمونه می‌باشد.

داده‌های جریانی حاصل را می‌توان به شرایط میدانی تعمیم داد. بدین معنی که لازم است نرخ جریان ته چاهی پایین‌تر از مقدار بحرانی آن نگه داشته شود تا از بروز مشکل مهاجرت ذرات قبل از تولید جلوگیری به عمل آید که در این صورت احتمال وقوع پدیده آسیب سازند کاهش خواهد یافت.

با سیالات و کانی‌های موجود در مخزن واکنش داده و تولید طبیعی یا تزریق‌پذیری مخزن را کاهش می‌دهد. این پدیده آسیب سازند نامیده می‌شود که درجه آن توسط میزان کاهش نفوذپذیری مخزن مشخص می‌گردد [۱-۳].

آسیب سازند ممکن است به صورت فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و حرارتی ایجاد شود و هر کدام از موارد مذکور به زیر شاخه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌گردد [۲]. در طول عملیات حفاری، تکمیل، انگیزش، تعمیر چاه، تزریق آب و تولید نفت، انواع و درجه‌های مختلفی از آسیب سازند روی می‌دهد که در اکثر موارد به‌صورت دائم و برگشت‌ناپذیر است. این اصل که پیشگیری و جلوگیری از آسیب سازند بهتر از درمان آن است، باید به‌عنوان یک رویکرد منطقی در نظر گرفته شود تا مشکلات ناشی از این پدیده به حداقل برسد. با مشخص شدن درجه آسیب، می‌توان یک زمینه علمی جهت بهینه‌سازی طراحی سیال تکمیل چاه و پارامترهای مهندسی ایجاد کرد.

سرعت جریانی که در آن ذرات کلئیدی ریز از محل خود جدا شده و در طول سازند حرکت می‌کنند، سرعت جریان بحرانی نامیده می‌شود [۴]. عوامل زیادی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل ذره، اندازه حفرات و نحوه توزیع آنها، اشباع نسبی سیالات، قابلیت ترشوندگی ذرات، ویسکوزیته سیال متحرک، کشش سطحی سیال، سرعت تولید و دگرگونی شیمیایی ذرات توسط سیالات حفاری و تکمیل چاه در پدیده مهاجرت ذرات ریز در طول سازند نقش دارند [۴-۶].

ذرات ریز و سیمان نشده تقریباً در فضای خالی موجود در سازندهای طبیعی نفوذپذیر وجود دارند. هنگامی که جریان در یک محیط متخلخل حاوی ذرات جامد جدا شده و یا ذرات دارای سیمان شدگی ضعیف به‌وجود می‌آید، شرایط هیدرودینامیکی به حدی می‌رسد که ذرات سست و سیمان نشده از محل خود جدا شده و توسط سیال در طول محیط متخلخل حمل می‌گردند [۷ و ۸].

عوامل زیادی از قبیل نوع، مکان، اندازه و میزان ذرات ریز موجود در فضاهای خالی، نقش مهمی در تعیین شرایط هیدرودینامیکی جهت انتقال این ذرات توسط فاز متحرک

نمونه مغزه نسبت به سرعت جریان سیال سنجیده شده و سپس سرعت جریان بحرانی که در آن نفوذپذیری به طور واضح کاهش می‌یابد، مشخص می‌گردد. حساسیت نمونه مغزه به سرعت جریان زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه زیر بین نفوذپذیری  $K_{i-1}$  در سرعت جریان  $Q_{i-1}$  و نفوذپذیری  $K_i$  در سرعت جریان  $Q_i$  برقرار باشد [۲]:

$$D_k = \left| \frac{K_{i-1} - K_i}{K_{i-1}} \right| \times 100 \geq 5\% \quad (1)$$

در رابطه بالا  $Q_{i-1}$  سرعت بحرانی جریان خوانده می‌شود. درجه آسیب حاصل از حساسیت سنجی سرعت در جدول ۱ آورده شده است.

### روش انجام آزمایش

آزمایش سیلاب‌زنی عبارت است از اندازه‌گیری نفوذپذیری سنگ مخزن در نرخ‌های مختلف جریانی. آزمایش حساسیت سنجی سرعت با مقدارپیش فرض ۰/۵ cc/min به‌عنوان مقدار پایه آغاز شده و در گام بعدی به مقادیر بالاتر افزایش داده می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار نفوذپذیری مطلق، دبی انتخاب شده فاقد آسیب بر روی نمونه پلاگ‌ها خواهد بود. پس از هر مرحله افزایش، نرخ جریان به منظور ارزیابی میزان آسیب‌سازند به مقدار پایه کاهش می‌یابد. میزان نفوذپذیری در هر مرحله سنجیده شده و سرعت بحرانی جریان که منجر به آسیب‌سازند می‌شود، تعیین می‌گردد.

### اطلاعات کلی آزمایش

اطلاعات مربوط به نمونه پلاگ‌های انتخاب شده از سازند فهلیان به منظور انجام تست حساسیت سنجی سرعت در جدول ۲ آورده شده است.

**ارزیابی میزان حساسیت سنگ مخزن به سرعت تزریق**  
حساسیت سنگ مخزن نسبت به سرعت تزریق عبارت است از پدیده کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن توسط مهاجرت ذرات ریز و بسته شدن منافذ به واسطه جریان سیال در محیط متخلخل در طول عملیات حفاری، تولید، انگیزش و تزریق آب. برای یک مخزن خاص، آسیب‌سازند ناشی از مهاجرت ذرات دانه ریز عمدتاً با سرعت جریان سیال در مخزن در ارتباط می‌باشد. اهداف آزمایشگاهی حاصل از تست ارزیابی حساسیت سنگ مخزن نسبت به سرعت تزریق عبارتند از:

۱- تعیین سرعت بحرانی سیال که در آن آسیب‌سازند به واسطه مهاجرت ذرات ریز ناشی از عملکرد سرعت جریان ایجاد می‌شود و همچنین مشخص نمودن درجه آسیب حاصل از آن.

۲- ایجاد یک مبنا برای تعیین منطقی سرعت تزریق آزمایشگاهی جهت استفاده در سایر آزمایش‌های حساسیت سنجی نظیر سنجش حساسیت سنگ مخزن نسبت به آب، نمک، قلیا و اسید. معمولاً پس از تعیین سرعت بحرانی، میزان تجربی سرعت تزریق در آزمایش‌ها که برابر ۸۰٪ سرعت جریان بحرانی است، تعیین می‌گردد. بنابراین انجام این آزمایش قبل از سایر آزمایش‌های حساسیت‌سنجی، ضروری است.

۳- ایجاد یک پایه علمی جهت تعیین سرعت منطقی سیلاب‌زنی.

نفوذپذیری نمونه مغزه در سرعت‌های تزریق سیال مورد آزمایش (کروژن یا آب سازند) اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس رابطه میان سرعت تزریق و نفوذپذیری، حساسیت

جدول ۱- تعیین درجه آسیب ناشی از حساسیت سنجی سرعت

$D_k > 70$	$50 < D_k \leq 70$	$30 < D_k \leq 50$	$5 < D_k \leq 30$	$D_k \leq 5$	درصد آسیب نفوذپذیری (%)
قوی	متوسط تا قوی	متوسط تا ضعیف	ضعیف	فاقد آسیب	درجه آسیب

جدول ۲- خصوصیات نمونه‌های پلاگ‌های کربناته

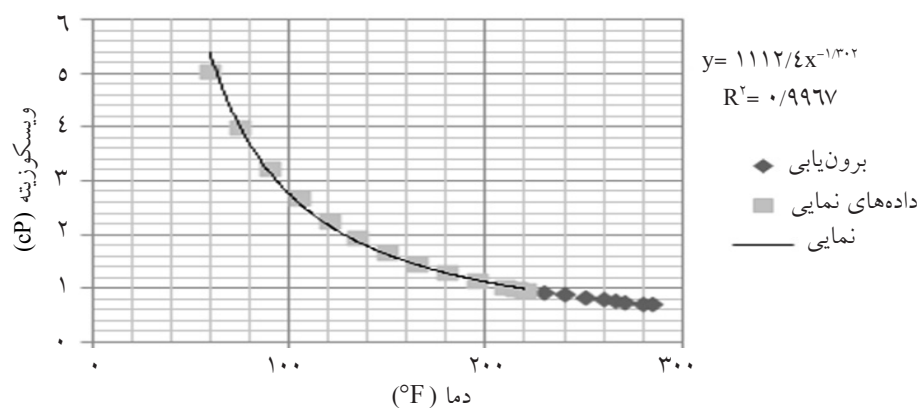
پلاگ	جنس	تخلخل (%)	نفوذپذیری مطلق (میلی داری)	ابعاد	
				قطر (cm)	طول (cm)
۱	کربناته	۱۱/۹۶	۲۹/۱۹	۳/۸۱	۵/۰۰
۲	کربناته	۲۱/۷۰	۵/۳۰۸	۳/۸۱	۵/۱۳۶
۳	کربناته	۱۳/۵۹	۲/۶۸	۳/۸۱	۵/۱۲۸

گردید. نتایج تخمین ویسکوزیته در دماهای مختلف در شکل ۱ آورده شده است. با در نظر گرفتن معادله رگرسیون نمایی، میزان ویسکوزیته گازوییل در دماهای ۲۶۶ °F و ۲۸۴ °F به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۱ cP می‌باشد.

#### آزمایش‌های سیلاب‌زنی نمونه

##### پلاگ شماره ۱

پس از جایگذاری پلاگ مورد نظر در قسمت نگهدارنده نمونه، به منظور شبیه سازی شرایط مخزن به مدت ۲۴ ساعت تحت دما و فشار مخزن قرار گرفت. سپس تزریق آب نمک (نمک کلرید پتاسیم با ۴٪ وزنی) به‌منظور حفظ حالت اشباع نمونه انجام شد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، شدت جریان تزریق به گونه‌ای انتخاب گردید که سرعت بحرانی که در آن آسیب سازند اتفاق می‌افتد، تعیین شود. عملیات تزریق بر روی نمونه‌های مورد نظر تا زمان رسیدن به یک اختلاف فشار ثابت، ادامه می‌یابد. دستگاه تزریق نیز در دمای ۲۸۴ °F، اختلاف فشار روباره با فشار ورودی ۲۰ تا ۳۰ bar و فشار منفذی ۶۰ bar با نرخ جریان تزریق متغیر تنظیم گردید. سیلاب‌زنی نمونه مغزه با دبی ۰/۵ cc/min آغاز شده و در مراحل بعدی، دبی جریان تغییر داده شد. سپس در هر مرحله به‌منظور بررسی تغییرات نفوذپذیری، دبی جریان به مقدار اولیه (۰/۵ cc/min) کاهش داده شد تا تغییرات نفوذپذیری بررسی گردد (شکل ۲). چنانچه دبی جریان ورودی افزایش یابد، اختلاف فشار بین ورودی و خروجی نمونه پلاگ نیز بیشتر شده و به تناسب آن فشار روباره تنظیم می‌شود.



شکل ۱- برون‌یابی مقادیر ویسکوزیته در دماهای بالاتر

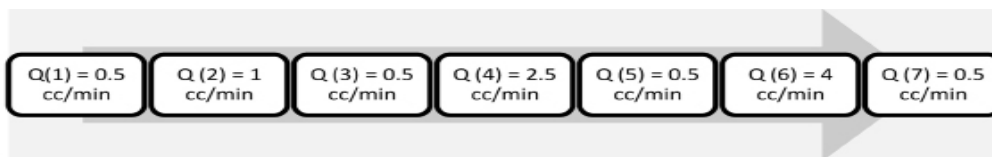
#### سیستم تزریق آزمایشگاهی

سیستم تزریق نمونه‌ها شامل قسمت‌های مختلفی می‌باشد که عبارتند از: قسمت نگهدارنده نمونه، مبدل فشار به‌منظور اندازه‌گیری افت فشار کلی در طول مغزه و افت فشار مقطعی در طول مقاطع مغزه، پمپ پنوماتیکی به‌منظور اعمال فشار روباره<sup>۲</sup> بر غلاف لاستیکی<sup>۳</sup> که بر روی نمونه مغزه قرار می‌گیرد، سیستم فشار برگشتی<sup>۴</sup> که همانند فشار منفذی عمل کرده و ظرف جمع‌آوری نمونه سیال خروجی.

به‌منظور جلوگیری از آسیب سازند ناشی از برهم‌کنش میان رس و آب، در ابتدا نمونه‌ها با سیال حاوی نمک کلرید پتاسیم با ۴٪ وزنی اشباع شده و نفوذپذیری نسبی نسبت به آب نمک در این نقطه اندازه‌گیری شد. در آزمایش مورد نظر تمامی مراحل تزریق توسط گازوییل به‌عنوان سیال تزریق انجام گرفت. دلیل انتخاب گازوییل، تراکم‌پذیری نسبی کم و تشابه آن با سیال سازند می‌باشد. در آزمایش‌های حساسیت سنجی تنها تغییرات نفوذپذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد نه کمیت آن.

به‌منظور تعیین مقادیر ویسکوزیته سیال در شرایط دما و فشار چاه از برون‌یابی نمایی<sup>۵</sup> استفاده گردید. از آنجایی که اندازه‌گیری ویسکوزیته در شرایط دما و فشار مخزن به دستگاه خاصی نیاز دارد، اندازه‌گیری در فشار اتمسفریک و تا دمای ۲۲۰ °F انجام گرفت. همچنین از برون‌یابی نمایی به‌منظور تعیین ویسکوزیته گازوییل در دماهای بالا استفاده

1. Core Holder
2. Overburden Pressure
3. Sleeve
4. Back Pressure
5. Exponential Extrapolation



شکل ۲- برنامه تزریق گازوییل در دبی‌های مختلف بر روی نمونه پلاگ ۱

در جدول ۴ ارائه شده است.

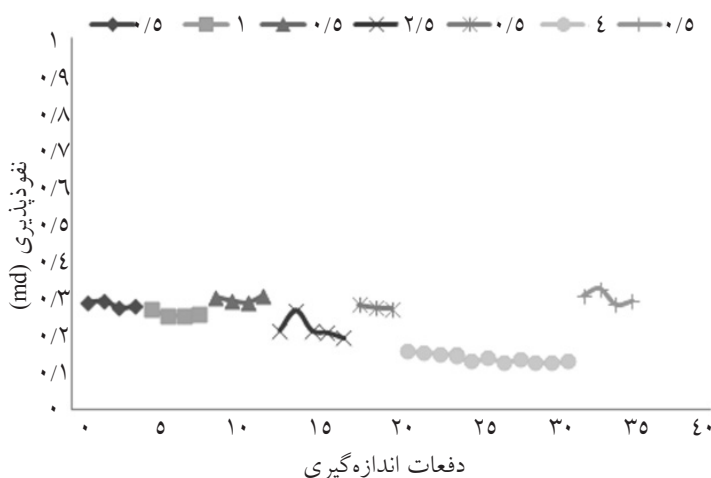
همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، مرحله دوم تزریق فاقد آسیب است ( $0 < D_k < 3/4$ ) ولی در مراحل ۴ و ۶، آسیب ضعیف ( $0.5 \leq D_k < 3.0$ ) در نمونه پلاگ شماره ۱ ایجاد شده است. بنابراین حد بحرانی دبی تزریق برای نمونه مورد نظر که منجر به ایجاد آسیب (آسیب ضعیف) می‌شود، برابر  $2/5 \text{ cc/min}$  (مرحله ۴) می‌باشد. برای ایجاد آسیب متوسط تا قوی در نمونه مذکور باید دبی‌های بیشتر از  $5 \text{ cc/min}$  را مورد آزمایش قرار داد.

#### پلاگ شماره ۲

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط مخزن، پس از قرارگیری پلاگ موردنظر در قسمت نگهدارنده، نمونه به مدت ۲۴ ساعت تحت دما و فشار مخزن قرار گرفت. تزریق اولیه آب نمک (نمک کلرید پتاسیم با ۰.۴٪ وزنی) به منظور حفظ حالت اشباع نمونه انجام شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نرخ‌های تزریق جریان به گونه‌ای انتخاب می‌شود که سرعت‌های تزریق بحرانی در محدوده جریان آشفته و آسیب سازند تعیین گردند. دستگاه تزریق سیال نیز مشابه شرایط پلاگ شماره ۱ آماده‌سازی گردید.

تغییرات نفوذپذیری پلاگ شماره ۱ در نرخ‌های تزریق گوناگون در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، نرخ تزریق  $1 \text{ cc/min}$  که معادل سرعت جریانی  $0.088 \text{ cc/min}$  است، به‌عنوان نرخ تغییر رژیم سیال از حالت خطی به آشفته<sup>۱</sup> می‌باشد. زیرا پس از تزریق با دبی  $1 \text{ cc/min}$  (مرحله ۲)، نفوذپذیری نمونه در تزریق مرحله سوم به مقدار اولیه خود می‌رسد که حاکی از ایجاد جریان آشفته سیال در مسیر تزریق بوده و هیچ آثاری از پدیده آسیب سازند دیده نمی‌شود ( $D_k \leq 0.5$ ). یعنی تزریق با دبی  $1 \text{ cc/min}$  تنها باعث افزایش مقطعی نفوذپذیری به‌دلیل افزایش اختلاف فشار داخل نمونه می‌گردد (تغییر رژیم جریان از حالت آرام به حالت آشفته) و پس از این مرحله آسیب ماندگار در نمونه (مهاجرت ذرات و مسدود شدن حفره‌های موجود در سنگ) ایجاد نشده است. مقادیر میانگین نفوذپذیری در هر مرحله در جدول ۳ آورده شده است.

به‌منظور ارزیابی کمی آسیب ایجاد شده از پارامتر  $D_k$  و محاسبه آن در مقادیر میانگین نفوذپذیری در دبی  $0.5 \text{ cc/min}$  استفاده می‌شود (مراحل ۱، ۳، ۵ و ۷). مقادیر محاسبه شده



شکل ۳- تغییرات نفوذپذیری پلاگ شماره ۱ در نرخ‌های مختلف تزریق

محدوده آسیب سازند رسیده است. در سرعت تزریق مذکور، شکستگی‌های طبیعی موجود در نمونه پلاگ به دلیل اعمال فشار بیشتر فعال و باز شده و نفوذپذیری افزایش یافته است. فعال‌سازی شکستگی‌های طبیعی<sup>۱</sup> در فشار تزریق ۷۰ bar بار و اختلاف فشار ۱۴ bar رخ داده است (جدول ۵).

به منظور محاسبه پارامتر  $D_k$  از مقادیر میانگین نفوذپذیری در دبی ۰/۵ cc/min استفاده می‌شود (مراحل ۱، ۳، ۵ و ۷). مقادیر محاسبه شده در جدول ۶ آورده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در مراحل دوم، چهارم و ششم در نمونه آسیب ضعیف تا جدی دیده می‌شود. آسیب به وجود آمده در مراحل دوم و چهارم ضعیف ( $30 > D_k \geq 5$ ) بوده اما در مرحله تزریق ۵ cc/min (مرحله ۶)، آسیب جدی ( $D_k = 265/709 > 70$ ) در نمونه پلاگ شماره ۲ مشاهده می‌شود. بنابراین حد بحرانی دبی تزریق برای نمونه مورد نظر که منجر به ایجاد آسیب (آسیب ضعیف تا جدی) می‌شود، برابر ۱/۵ cc/min می‌باشد.

### پلاگ شماره ۳

پلاگ مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت تحت دما و فشار مخزن قرار گرفته و به منظور حفظ حالت اشباع آن از آب نمک حاوی ۴٪ وزنی KCl استفاده گردید. دستگاه تزریق نیز همانند شرایط ایجاد شده برای پلاگ‌های قبلی تنظیم شد. نرخ‌های تزریق جریان نیز به گونه‌ای تنظیم شد تا سرعت‌های بحرانی حد آشفستگی و آسیب سازند مشخص شود. مقدار پایین نفوذپذیری اندازه‌گیری شده با هوا به طبیعت فشرده و متراکم پلاگ اشاره می‌کند. لذا به منظور سیلاب‌زنی نمونه مورد نظر از نرخ‌های تزریق پایین‌تر استفاده می‌شود.

جدول ۳- مقادیر میانگین نفوذپذیری در مراحل مختلف تزریق برای نمونه پلاگ شماره ۱

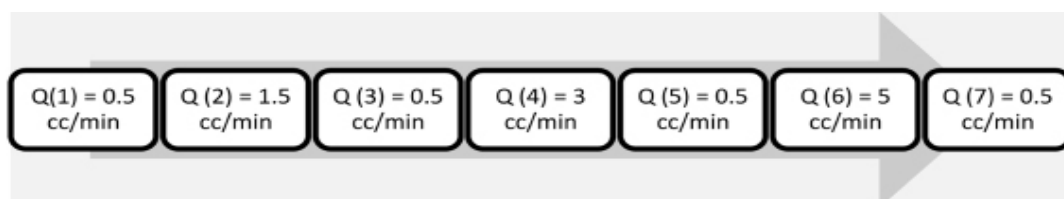
مرحله	دبی (cc/min)	نفوذپذیری میانگین (md)
۱	۰/۵	۰/۲۶۳
۲	۱	۰/۲۳۲
۳	۰/۵	۰/۲۷۲
۴	۲/۵	۰/۲۰۳
۵	۰/۵	۰/۲۵۵
۶	۴	۰/۱۳۰
۷	۰/۵	۰/۲۷۹

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده پارامتر  $D_k$  برای نمونه پلاگ شماره ۱

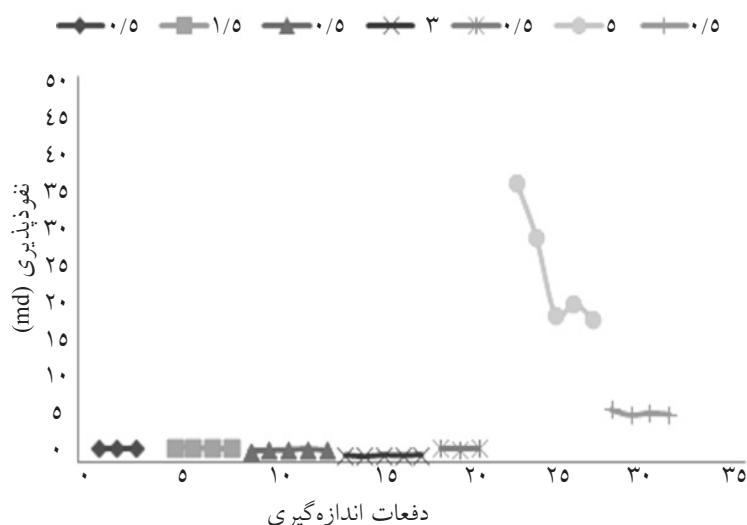
مراحل	دبی (cc/min)	پارامتر	مقدار محاسبه شده
۱ و ۳	۰/۵	$D_{k(1,3)}$	۳/۴۲۲
۳ و ۵	۰/۵	$D_{k(3,5)}$	۶/۲۵۰
۵ و ۷	۰/۵	$D_{k(5,7)}$	۹/۴۱۲

تزریق سیال با جریان ۰/۵ cc/min آغاز شد و به مقادیر بالاتر افزایش داده شد. در نهایت نیز به دبی پایه بازگردانده شد (شکل ۴). ثبت مقادیر اختلاف فشار و حجم سیال خروجی در هر مرحله تا رسیدن به نفوذپذیری ثابت که توسط معادله داری برای جریان خطی محاسبه می‌شود، ادامه می‌یابد. اختلاف فشار اولیه برای پلاگ مورد نظر در حدود ۱/۵ bar در نرخ تزریق ۰/۵ cc/min می‌باشد. در حالی که برای نرخ تزریق ۳ cc/min تا حدود ۱۷/۵ bar افزایش می‌یابد.

تغییرات نفوذپذیری در نرخ‌های تزریق متفاوت در شکل ۵ نمایش داده شده است. با مقایسه مقادیر نفوذپذیری در نرخ‌های تزریق مختلف نسبت به نرخ تزریق ۰/۵ cc/min، مشخص گردید که پلاگ شماره ۲ در نرخ‌های تزریق بزرگ‌تر از ۳ cc/min به دلیل افزایش نفوذپذیری، به



شکل ۴- برنامه تزریق گازوییل در دبی‌های مختلف بر روی نمونه پلاگ ۲



شکل ۵- تغییرات نفوذپذیری پلاگ شماره ۲ در نرخ‌های مختلف تزریق

صورت پذیرفت تا بتوان طی چند مرحله، محدوده رخداد آسیب سازند را شناسایی کرد. سپس نرخ جریان به‌منظور بررسی تغییرات نفوذپذیری به  $0.5 \text{ cc/min}$  تغییر یافت. نتایج اندازه‌گیری نفوذپذیری در نرخ‌های مختلف تزریق در شکل ۷ آورده شده است.

از آنجایی که امکان ایجاد آسیب سازند در این نرخ جریان ( $0.5 \text{ cc/min}$ ) پیش‌بینی شده بود، لذا ثبت داده‌ها از زمان ابتدایی آزمایش صورت گرفت که نمودار آن در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

میزان اختلاف فشار برای نرخ تزریق  $0.25 \text{ cc/min}$  برابر  $0.5 \text{ bar}$  می‌باشد و مقدار آن برای نرخ تزریق  $0.5 \text{ cc/min}$  به حدود  $131 \text{ bar}$  رسید. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، مقدار نفوذپذیری برای ۴ داده اولیه کاهش یافته است. دلیل این امر افزایش فشار سیستم در قسمت ورودی پلاگ می‌باشد که در شکل ۹ نمایش داده شده است. پس از پایان روند صعودی فشار، مقادیر نفوذپذیری برای سه داده آخر به حالت پایدار رسیده است.

به‌دلیل وجود محدودیت در دستگاه تزریق، امکان افزایش نرخ تزریق وجود نداشت، زیرا احتمال داشت اختلاف بین فشار خروجی و پوشش لاستیکی نمونه پلاگ تا  $100 \text{ bar}$  افزایش یابد. محدوده قابل قبول اختلاف فشار برای این تست در حدود  $40 \text{ bar}$  است و در مقادیر تزریق بالاتر، پوشش لاستیکی شکافته خواهد شد.

جدول ۵- مقادیر میانگین نفوذپذیری در مراحل مختلف تزریق برای نمونه پلاگ شماره ۲

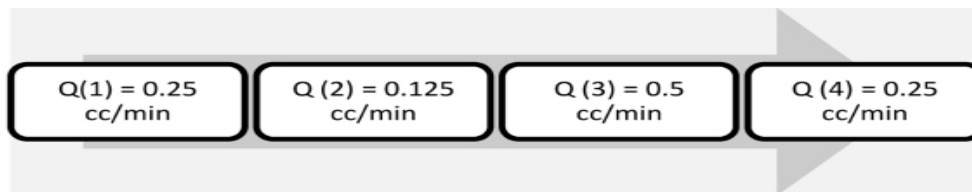
مرحله	دبی (cc/min)	نفوذپذیری میانگین (md)
۱	۰/۵	۱/۸۴۲
۲	۱/۵	۱/۹۰۸
۳	۰/۵	۱/۵۹۸
۴	۳	۰/۹۶۷
۵	۰/۵	۱/۷۷۶
۶	۵	۱۹/۳۸۹
۷	۰/۵	۶/۴۹۵

جدول ۶- مقادیر محاسبه شده پارامتر  $D_k$  برای نمونه پلاگ شماره ۲

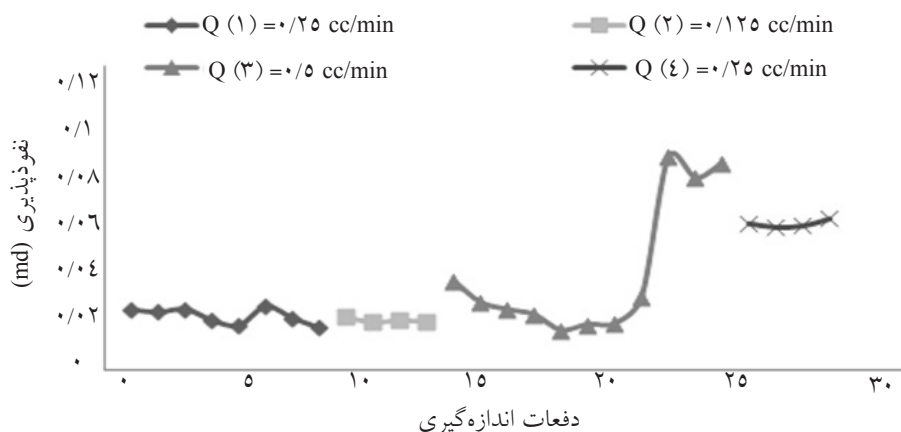
مراحل	دبی (cc/min)	پارامتر	مقدار محاسبه شده
۱ و ۳	۰/۵	$D_{k(1,3)}$	۱۳/۲۴۷
۵ و ۳	۰/۵	$D_{k(3,5)}$	۱۱/۱۳۹
۷ و ۵	۰/۵	$D_{k(5,7)}$	۲۶۵/۷۰۹

عملیات تزریق با نرخ  $0.5 \text{ cc/min}$  آغاز شد اما به‌دلیل فشار بالای ایجاد شده در قسمت ورودی، بلافاصله نرخ تزریق به مقادیر پایین‌تر تغییر یافت و نرخ تزریق  $0.5 \text{ cc/min}$  به‌عنوان بالاترین نرخ تزریق (مرحله سوم) در نظر گرفته شد (شکل ۶).

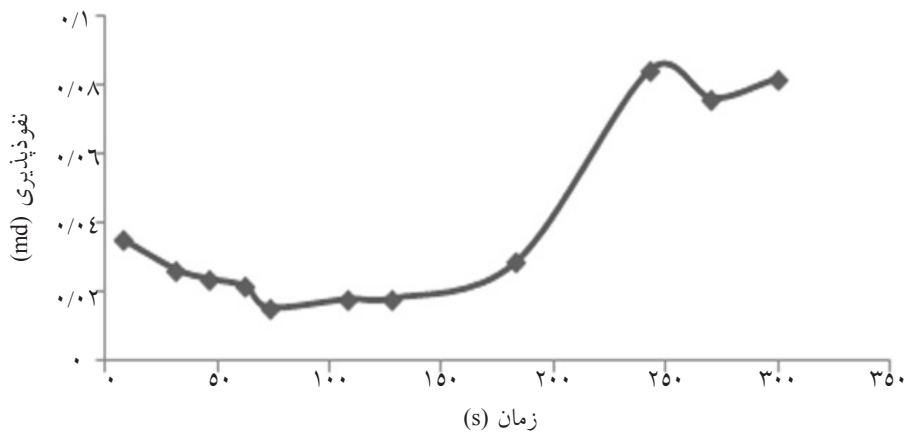
رفتار پلاگ شماره ۳ در نرخ تزریق  $0.25 \text{ cc/min}$  به‌صورت طبیعی می‌باشد. از طرف دیگر، نرخ جریان  $0.5 \text{ cc/min}$  برای این پلاگ به‌دلیل محدودیت در دستگاه تزریق و امکان وقوع پدیده آسیب سازند، بالا می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری نفوذپذیری در نرخ جریان  $0.125 \text{ cc/min}$



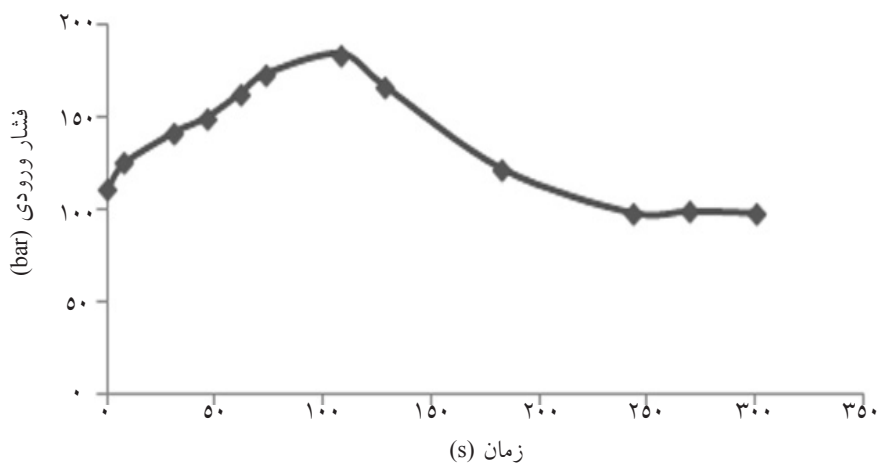
شکل ۶- برنامه تزریق گازوییل در دبی‌های مختلف بر روی نمونه پلاگ ۳



شکل ۷- نمودار مقایسه‌ای تغییرات نفوذپذیری در نرخ‌های مختلف تزریق برای پلاگ شماره ۳



شکل ۸- تغییرات نفوذپذیری در زمان‌های اولیه تزریق با نرخ ۰/۵ cc/min



شکل ۹- تغییرات فشار ورودی در سرعت تزریق ۰/۵ cc/min



در نرخ‌های تزریق پایین‌تر از ۲/۵ cc/min هیچ‌گونه آسیبی در نمونه ایجاد نشده (نمونه به حد آسیب سازند نرسیده است) و در نرخ‌های تزریق بالاتر از ۲/۵ cc/min، آسیب ضعیف با در نظر گرفتن رابطه ۱ در نمونه ایجاد شده است.

۳. نتایج تست حساسیت سنجی بر روی پلاگ شماره ۲ حاکی از آن است که درجه آسیب ایجاد شده در محدوده ضعیف تا جدی می‌باشد. به طوری که آسیب ایجاد شده در مراحل دوم و چهارم تزریق ضعیف است، اما در مرحله ششم تزریق، آسیب جدی و ماندگار از نوع فعال‌سازی شکستگی‌های طبیعی در نمونه ایجاد شده است. همچنین حد بحرانی دبی تزریق برای نمونه مورد نظر که منجر به ایجاد آسیب سازند (آسیب ضعیف تا جدی) می‌شود، برابر ۱/۵ cc/min می‌باشد.

۴. به دلیل طبیعت متراکم پلاگ شماره ۳، تست حساسیت سنجی با نرخ ۰/۲۵ cc/min آغاز شده و افزایش قابل توجهی در فشار ورودی در مرحله سوم تزریق (دبی ۰/۵ cc/min) ملاحظه گردید. همچنین در مرحله سوم تزریق، آسیب از نوع جدی در نمونه ایجاد شد و به‌عنوان حد آسیب سازند در نمونه مذکور ثبت گردید.

۵. به‌منظور جلوگیری از مشکلات مهاجرت ذرات ریز و مسدود شدن منافذ در شرایط میدانی، لازم است دبی تزریق و تولید را پایین‌تر از حد بحرانی نگاه داشت تا از بروز آسیب سازند در طول تاریخچه چاه جلوگیری شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله موارد امتنان خود را از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران به جهت حمایت از تحقیقات منتهی به این نتایج، اعلام می‌دارند.

با توجه به اطلاعات نمایش داده شده در شکل ۴، آسیب سازند در نمونه مورد نظر در نرخ تزریق بالاتر از ۰/۵ cm/min ایجاد می‌گردد که معادل سرعت بحرانی تزریق ۰/۰۴۴ cm/min می‌باشد.

به‌منظور محاسبه پارامتر  $D_k$  از مقادیر میانگین نفوذپذیری در دبی ۰/۲۵ cm/min مطابق جدول ۷ استفاده می‌شود (مراحل ۱ و ۴). مقادیر محاسبه شده در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷- مقادیر میانگین نفوذپذیری در مراحل مختلف تزریق برای نمونه پلاگ شماره ۳

مرحله	دبی (cc/min)	نفوذپذیری میانگین (md)
۱	۰/۲۵	۰/۰۲۱
۲	۰/۱۲۵	۰/۰۱۹
۳	۰/۵	۰/۰۳۹
۴	۰/۲۵	۰/۰۵۸

جدول ۸- مقادیر محاسبه شده پارامتر  $D_k$  برای نمونه پلاگ شماره ۳

مراحل	دبی (cc/min)	پارامتر	مقدار محاسبه شده
۱ و ۴	۰/۲۵	$D_{k(1/4)}$	۱۷۶/۱۹

مطابق جدول ۸، در مرحله سوم تزریق، آسیب جدی ( $D_k > 70$ ) در نمونه ایجاد شده است. بنابراین حد بحرانی دبی تزریق برای نمونه مورد نظر که منجر به ایجاد آسیب جدی می‌شود، برابر ۰/۵ cm/min می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

۱. در مقاله حاضر، یک روش جدید و کاربردی برای اندازه‌گیری نرخ تزریق بحرانی ارائه شده است. این روش شامل تلفیق دو روش اندازه‌گیری است که شامل برگرداندن سرعت تزریق به مقدار پایه پس از هر مرحله افزایشی و همچنین استفاده از رابطه تعیین درجه آسیب سازند می‌باشد. آزمایش‌های سیلاب‌زنی توسط گازوییل به عنوان سیال تزریق صورت گرفت. آزمایش تزریق به‌صورت مرحله ای انجام شده و میزان کاهش نفوذپذیری توسط قانون دارسی در جریان خطی محاسبه شده است.

۲. نتایج آزمایش بر روی پلاگ شماره ۱ نشان می‌دهد که

## مراجع

- [1]. Mueke T. W., "Formation Fines and Factors Controlling Their Movement in Porous Media", Journal of Petroleum Technology 31, pp. 144-150, 1979.
- [2]. Renpu W., *Advanced Well Completion Engineering*, Third Edition, 716 pp (in English), 2011.
- [3]. Rahman S. S., Arshad A. and Chen H., "Prediction of Critical Condition for Fines Migration in Petroleum Reservoirs", Paper SPE 28760-MS presented at SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, Melbourne, Australia, Nov. pp. 7-10, 1994.
- [4]. Miranda R. M. and Underdown D. R., "Laboratory Measurement of Critical Rate: A Novel Approach for Quantifying Fines Migration Problems", Paper SPE 25432 presented at the 1993 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Oklahoma, March, pp. 21-23, 1993.
- [5]. Gabriel G. A. and Inamdar G. R., "An Experimental Investigation of Fine Migration in Porous Media", Paper SPE 12168 presented at the 1983 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco. Oct. pp. 5-8, 1983.
- [6]. Leone A. L. and Scott E. M., "Characterization and Control of Formation Damage during Waterflooding of a High-Clay-Content Reservoir", SPE Reservoir Engineering Journal, pp. 1279-86, 1988.
- [7]. Zeinijahromi A., Machado F. and Bedrikovetsky P., "Modified Mathematical Model for Fines Migration in Oil Fields", Paper SPE 143742-MS presented at Brazil Offshore, Macaé, Brazil, June pp. 14-17, 2011.
- [8]. Nguyen P. T., Zeinijahromi A. and Bedrikovetsky P., "Taking Advantage of Fines Migration Formation Damage for Enhanced Gas Recovery", Paper SPE 151611-MS presented at SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, Feb. pp. 15-17, 2012.
- [9]. Moghadasi J., Jamialahmadi M., Steinhagen H. M., Sharif A., Izadpanah M. R., Motaei E. and Barati R., "Formation Damage in Iranian Oil Fields", Paper SPE 151611-MS presented at International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, Feb. pp. 20-21, 2002.
- [10]. Ohen H. A. and Civan F., "Predicting Skin Effects Due to Formation Damage by Fine Migration", Paper SPE 21675 presented at the 1991 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Oklahoma, April, pp. 7-9, 1991.
- [11]. Zeinijahromi A., Phuong T. N. and Bedrikovetsky P., "Taking Advantage of Fines-Migration-Induced Formation Damage for Improved Waterflooding", Paper SPE 144009-MS presented at SPE European Formation Damage Conference, Noordwijk, Netherlands, June, pp. 7-10, 2011.