

## بررسی آسیب وارده به سازند در اثر انسداد فاز آبی در مخازن گازی

محسن مسیحی، جمشید مقدسی، دانشگاه صنعتی شریف

ابودر میرزائی پیامن<sup>۱</sup>، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

چکیده

انسداد فاز آبی به عنوان یکی از انواع آسیب‌های وارده به سازند، در اثر نفوذ سیالات پایه آبی عملیات حفاری، تکمیل، تعمیر و یا انگیزش چاه به سنگ سازند پیرامون چاه اتفاق افتاده و می‌تواند بهره‌دهی چاه‌های هیدروکربوری را به شدت کاهش دهد. این پدیده می‌تواند در بیشتر مخازن رخ دهد اما شدت آن در مخازن گازی کم‌تراوا بیشتر است. در این نوشتار پس از شرح انسداد فاز آبی و مکانیسم و عوامل مؤثر بر آن، به بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر انسداد فاز آبی پرداخته می‌شود. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انسداد فاز آبی شامل اشباع اولیه آب، تراوایی، لزجت صافاب و فشار اختلافی هستند. نتایج این مطالعه در شناخت مخازن گازی مستعد حساسیت به انسداد فاز آبی و تلاش در جهت کاهش میزان آسیب مربوطه مفید و کاربردی است.

واژگان کلیدی: آسیب سازند، انسداد فاز آبی، نسبت آسیب تراوایی، اشباع اولیه آب، تراوایی، لزجت صافاب، فشار اختلافی

### مقدمه

انسداد فاز آبی به عنوان یکی از انواع آسیب‌های وارده به سازند در اثر نفوذ صافاب سیالات پایه آبی عملیات حفاری، تکمیل، تعمیر و یا انگیزش چاه به سنگ سازند در پیرامون دهانه چاه اتفاق افتاده و می‌تواند بهره‌دهی چاه‌ها را به شدت کاهش دهد. این پدیده در اکثر مخازن اتفاق می‌افتد اما شدت آن در مخازن گازی کم‌تراوا و تخلیه شده<sup>۲</sup> کم فشار (به دلیل وجود نیروهای موینه بسیار زیاد) بیشتر است. این پدیده به ورود فاز آبی امتزاج‌ناپذیر با فاز هیدروکربنی به محیط متخلخل پیرامون دهانه چاه و به دام‌افتادن مقداری از فاز آبی ورودی در محیط متخلخل گفته می‌شود.

در اثر این پدیده درصد اشباع آب اولیه<sup>۳</sup> در محیط متخلخل پیرامون دهانه چاه تا اشباع آب کاهش‌ناپذیر<sup>۴</sup> افزایش می‌یابد. این پدیده و به تبع آن افزایش درصد آب در حفرات، سبب آسیب به تراوایی نسبی فاز هیدروکربنی مخزن شده و نوعی آسیب فیزیکی به سازند محسوب می‌شود. مخازن متعددی دچار این نوع آسیب شده‌اند که کاتر و لاندی به تعدادی از این مخازن اشاره کرده‌اند [۱]. در ادامه مکانیسم بروز و عوامل مؤثر بر آسیب ناشی از پدیده انسداد فاز آبی بیان می‌شود.

### ۱- مکانیسم بروز انسداد فاز آبی

دلیل اصلی انسداد فاز آبی، پایین تر بودن درصد اشباع اولیه آب در حفرات نسبت به درصد اشباع کاهش‌ناپذیر این فاز است. برای بررسی چگونگی بروز این پدیده، می‌توان عملیات حفاری در یک مخزن با درصد اشباع اولیه پایین آب را (برای نمونه یک مخزن گازی کم‌تراوا) در نظر گرفت. قبل از ورود هر گونه صافاب سیال پایه آبی به درون سنگ اطراف دیواره چاه، حفرات در حالت اشباع آب اولیه (مثلاً ۱۰ درصد) قرار دارند (فاز-۱ در شکل-۱). در اثر تماس سیالات پایه آبی درون چاه با سنگ سازند، فاز آبی به درون حفرات وارد شده و پس از مدتی این حفره‌ها پر از آب شده و درصد اشباع هیدروکربن در آنها به حد کاهش‌ناپذیر (مثلاً ۱۵ درصد) می‌رسد (فاز-۲ در شکل-۱).

حفرات تا پیش از جریان دادن چاه (با هدف تخلیه ستون چاه از مواد و سیالات مورد استفاده در حفاری، تعمیر، تکمیل و یا انگیزش) در چنین شرایطی باقی می‌مانند. در اثر جریان دادن چاه، آب ورودی به سیستم حفرات خارج شده و بسته به شرایط مختلف، مقداری از آن (در این حالت ۴۰ درصد) در محیط متخلخل به دام می‌افتد. بنابراین در هنگام تولید درصد آب در حفرات محیط



## ۲-۲- وضعیت منحنی‌های تراوایی نسبی گاز یا نفت

این پارامتر بر میزان آسیب وارده به سازند که ناشی از انسداد فاز آبی است مؤثر خواهد بود. هر چقدر منحنی تراوایی نسبی گاز یا نفت به سمت روند خطی میل کند، افزایش ناچیز درصد اشباع آب تأثیر چندانی بر کاهش تراوایی فاز هیدروکربنی ندارد. بر خلاف حالت پیشین، هر چقدر تقعر منحنی تراوایی نسبی گاز یا نفت بیشتر باشد، افزایش ناچیز درصد اشباع آب سبب کاهش شدید تراوایی نسبی فاز هیدروکربنی می‌شود.

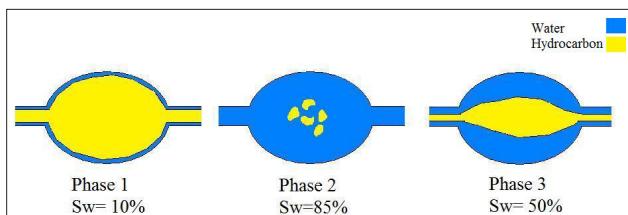
بنابراین می‌توان گفت که هر چقدر تقعر منحنی تراوایی نسبی گاز یا نفت بیشتر باشد میزان آسیب وارده ناشی از انسداد فاز آبی نیز بیشتر است. تقعر زیاد منحنی تراوایی هیدروکربن اغلب در مخازن کم‌تراوا و مخازنی که به شدت نفت‌دوست هستند اتفاق می‌افتد.

## ۲-۳- عمق فیزیکی نفوذ صافاب

این پارامتر به شدت توانایی فشار مخزن در به حرکت در آوردن و خارج کردن آبی که به تله افتاده را کنترل می‌کند؛ هر چقدر عمق نفوذ صافاب بیشتر باشد، خارج کردن آبی که به تله افتاده دشوارتر و میزان کاهش در تراوایی نسبی فاز هیدروکربنی و در اثر آن آسیب سازند بیشتر خواهد بود. زیرا در یک اختلاف فشار معین (که اختلاف بین فشار مخزن و فشار ته چاه است) هر چقدر عمق نفوذ صافاب بیشتر باشد گرادیان فشار اعمال شده جهت به حرکت در آوردن آب کمتر خواهد بود.

## ۲-۴- فشار مخزن

معمولاً هر چقدر فشار مخزن بیشتر باشد میزان اختلاف میان فشار مخزن و فشار ته چاهی بیشتر و در نتیجه درصد نهایی بازیافت آبی که به وارد محیط متخلخل شده است نیز بیشتر خواهد بود. فشار مخزن با عمق فیزیکی نفوذ صافاب مرتبط است. هر چقدر فشار مخزن بیشتر و عمق نفوذ صافاب کمتر باشد، گرادیان فشاری بیشتری را می‌توان اعمال کرد که این سبب خروج



فازهای مختلف بروز انسداد فاز آبی

سنگی پیرامون دهانه چاه برابر با مجموع درصد اشباع اولیه و درصد آب به دام افتاده خواهد بود (۵۰ درصد، فاز-۳ در شکل-۱). صرف نظر از سایر انواع آسیب‌ها سازند که در اثر تماس فاز آبی خارجی با سنگ و سیال مخزن به وجود می‌آید، افزایش درصد اشباع آب در حفرات سبب کاهش تراوایی فاز هیدروکربنی شده (رجوع شود به منحنی‌های تراوایی نسبی معمول) که این مورد از انواع آسیب به سازند محسوب می‌شود.

مخازنی که دارای میزان کم اشباع اولیه آب هستند به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. مخازن گازی خشک شده<sup>۵</sup> (مخازنی که در طول عمر زمین شناسی به دلایل مختلف مقدار زیادی از آب موجود در حفراتشان بخار شده است)

۲. مخازن نفتی به شدت نفت‌دوست

بنابراین اگر مخزنی هم دارای تراوایی اندک بوده و هم دارای اشباع اولیه آب کمی باشد، این مخزن مستعد حساسیت شدید به انسداد فاز آبی است. انسداد فاز آبی به دو صورت موقت یا دائم رخ می‌دهد. انسداد موقت هنگامی است که صافاب وارد سازند شده و در اثر جریان دادن چاه از محیط متخلخل خارج می‌شود. انسداد دائم هنگامی است که حتی پس از جریان دادن چاه نیز مقدار قابل توجهی از صافاب نفوذی درون حفرات گیر افتاده و باقی می‌ماند.

## ۲- عوامل مؤثر بر انسداد فاز آبی

### ۲-۱- اختلاف بین اشباع کاهش‌ناپذیر آب و اشباع اولیه آب

برای یک مخزن، مقدار اشباع کاهش‌ناپذیر آب ثابت است. بنابراین اگر اشباع اولیه آب کمتر از اشباع کاهش‌ناپذیر آن باشد، در هنگام جریان دادن چاه، اشباع آب تنها می‌تواند تا اشباع کاهش‌ناپذیر کم شود. بنابراین هر چقدر اختلاف بین اشباع کاهش‌ناپذیر آب و اشباع اولیه آن بیشتر باشد، مقدار آب بیشتری به دام افتاده و میزان آسیب وارده به سازند بیشتر خواهد بود.

اشباع کاهش‌ناپذیر آب عموماً تابعی از هندسه موینگی سیستم حفرات است. به طور کلی سنگ‌های با تراوایی کم، قطر حفره و قطر گلوگاه کوچک، میزان اشباع کاهش‌ناپذیر آب بیشتری از خود نشان می‌دهند. مقدار اشباع کاهش‌ناپذیر آب در آزمایشگاه را می‌توان از طریق آزمایش ریزش<sup>۶</sup> تعیین کرد. این مقدار را نباید با اشباع اولیه آب اشتباه گرفت.

فشار مویینه غلبه کند، آنگاه صافاب به دام افتاده سبب انسداد دائم محیط متخلخل می شود.

### ۲-۲- ترکیب کانی های سنگ و رفتار سطحی آنها

این اثر که توسط یوو و کانگ ذکر شده سبب آسیب شیمیایی به سازند می شود و بنابراین نمی توان آنرا بر انسداد فاز آبی که یک آسیب فیزیکی سازند است مؤثر دانست [۳].

### ۲-۸- ساختار حفرات سنگ

هر چقدر حفرات سنگ و گلوگاهها قطر کمتری داشته باشند، فشار مویینی بیشتر خواهد بود که این سبب افزایش انسداد فاز آبی می شود. پژوهشگران متعددی به بررسی عوامل مؤثر بر حذف تأثیر انسداد فاز آبی طی فرآیند جریان دادن و تمیزسازی چاه پرداخته اند. از آن جمله می توان به پارخ و شارما اشاره کرد [۲].

پارخ و شارما با استفاده از یک نرم افزار شبیه ساز عددی، به بررسی عوامل مؤثر بر انسداد فاز آبی در چاه های عمودی شکاف خورده و شکاف نخورده در دو چاه گازی و نفتی پرداختند. در این شبیه ساز به منظور دست یابی به عمق نفوذ مدنظر، مقدار کافی آب به سازند تزریق و چاه با استفاده از روابط معمول تراوایی نسبی و فشار مویینی برای ماسه سنگ های کم تراوا جریان داده شد. در مطالعه تأثیر هر پارامتر، مقایسه ای بین نتایج حالت تهاجم آب و حالت عدم تهاجم آب صورت گرفت.

### ۳- تهیه، آماده سازی و توصیف نمونه مغزه ها، سیالات و دستگاه

دسته	شماره مغزه	تراوایی (میلی داریسی)	تخلخل (درصد)
۱	۱	۶/۳۷	۹/۹۶
	۲	۷/۱۵	۱۰/۳۷
	۳	۷/۲۰	۱۱/۷۲
	۴	۵/۱۷	۸/۹۱
۲	۵	۱۲/۲۶	۱۰/۵۱
	۶	۱۲/۰۴	۹/۳۹
۳	۷	۴/۴۳	۷/۳۶
۴	۸	۱/۵۳	۶/۴۳
۵	۹	۸/۱۳	۸/۰۵

بهرتر و بیشتر آب از محیط متخلخل است. هم چنین هر چقدر فشار مخزن کمتر و عمق نفوذ صافاب بیشتر باشد، گرادیان اعمال شده کمتر و در نتیجه خروج آب کمتر و دشوارتر خواهد بود.

### ۲-۵- ترشوندگی

میزان کم اشباع اولیه آب در مخازن با سنگ آب دوست که بیشتر در مخازن گازی خشک شده وجود دارد، سبب بروز مشکلات اساسی در آشام خودبه خودی و نیز انسداد فاز می شود. معمولاً در مخازن نفتی، میزان اشباع اولیه آب مقداری به اشباع کاهش ناپذیر آب نزدیک است.

البته در اعماقی که همراه با نفت، آب تولید می شود اشباع اولیه آب بیشتر از اشباع کاهش ناپذیر آن است. این بدین معنی است که چنین مخازنی مستعد انسداد فاز آبی دائمی نیستند. مخازنی که به شدت آب دوست هستند غالباً اشباع اولیه آب بسیار کمی داشته و حساسیت زیادی به انسداد فاز آبی دارند.

یوو و کانگ به موارد اختلاف بین فشار مخزن و فشار مویینی، ترکیب کانی های سنگ و رفتار سطحی آنها و ساختار حفرات سنگ اشاره کرده و تأثیر آنها بر انسداد فاز آبی را به صورت کیفی بیان کرده اند [۳].

### ۲-۶- اختلاف بین فشار مخزن و فشار مویینی

مدت زمان خروج صافاب از محیط متخلخل متناسب با لزجت صافاب، کشش بین سطحی و عمق نفوذ صافاب بوده و فشار اختلافی و شعاع مویینه نسبت عکس دارد. اگر فشار مخزن نتواند بر

شماره مغزه	لیتولوژی	قطر (سانتی متر)	طول (سانتی متر)	جرم خشک (گرم)
۱	ماسه سنگ	۳/۹۴	۶/۱۴	۱۸۰/۸۲۵
۲	ماسه سنگ	۳/۹۵	۶/۰۶	۱۷۸/۶۳۷
۳	ماسه سنگ	۳/۹۵	۶/۰۶	۱۷۴/۶۳۰
۴	ماسه سنگ	۳/۹۵	۶/۰۵	۱۷۷/۰۹۸
۵	ماسه سنگ	۳/۸۳	۶/۰۰	۱۷۶/۱۸۱
۶	ماسه سنگ	۳/۹۶	۶/۱۰	۱۸۸/۱۴۰
۷	ماسه سنگ	۳/۹۶	۶/۰۸	۱۸۴/۱۰۶
۸	ماسه سنگ	۳/۹۶	۵/۸۸	۱۷۵/۵۵۰
۹	ماسه سنگ	۳/۹۷	۶/۰۴	۱۸۲/۶۱۳



در ابتدا از لاشه سنگ‌های سازند سطحی ماسه‌سنگی آغاچاره در شهر اهواز نمونه‌برداری شد. سپس مغزه‌هایی با قطر ۱/۵ اینچ و طول ۶ سانتی‌متر تهیه شد. در این مرحله نمونه مغزه‌ها توسط دستگاه شستشوی سوخت<sup>۷</sup> به مدت چهار ساعت تمیز شد. به دلیل اینکه مغزه‌ها حاوی نفت نبوده و از سازندهای سطحی تهیه شده‌اند به جای تولوئن از آب برای شستشو استفاده شد. پس از پایان شستشو تنها گل‌ولای از داخل مغزه‌ها بیرون آمد. پس از آن مغزه‌ها درون تنوری با دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. ابعاد و جرم دقیق نمونه مغزه‌های خشک به ترتیب توسط ریزسنج دیجیتال و ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد.

در این مرحله تراوایی مطلق نمونه مغزه‌ها توسط دستگاه تراوایی سنج اندازه‌گیری شد. از گاز نیتروژن به عنوان سیال عبوری استفاده شد. پس از اندازه‌گیری تراوایی در هر فشار اختلافی، با استفاده از روش تصحیح کلینکنبرگ<sup>۸</sup> تراوایی مایع محاسبه شد. به منظور تعیین تخلخل نمونه مغزه‌ها از روش اشباع سازی مجدد<sup>۹</sup> استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری ابعاد، جرم خشک، تراوایی و

تخلخل نمونه مغزه‌ها در جدول ۱- نشان داده شده است. در نهایت با توجه به مقادیر تراوایی، نمونه مغزه‌ها به پنج گروه تقسیم بندی شد (جدول ۲). دانه‌بندی و شماره گذاری نمونه مغزه‌ها فرضی است. میانگین تخلخل و تراوایی هر گروه نیز مطابق جدول ۳- است. به دلیل اینکه نمونه مغزه‌ها پس از انجام برخی آزمایش‌ها خشک می‌شوند و به منظور جلوگیری از تشکیل رسوبات نمکی در نمونه مغزه، در آزمایش‌ها به جای استفاده از آب نمک از آب مقطر استفاده شد. از گاز نیتروژن نیز به عنوان سیال گازی استفاده شده است. خواص هر کدام از این سیالات در جدول ۴- نشان داده شده است.

برای تهیه آب با لزجت‌های مختلف نیز از شکر و پودر شوینده

جدول ۴ | خواص سیالات مورد استفاده

مقدار	خاصیت
۱/۰۵	چگالی آب (گرم بر میلی‌لیتر)
۱/۰۰	لزجت آب (سانتی‌پویز)
۷۲	کشش میانروییه آب - نیتروژن (دین بر سانتی‌متر)
۰/۰۲	لزجت نیتروژن

جدول ۵ | نمونه آب با لزجت‌های مختلف

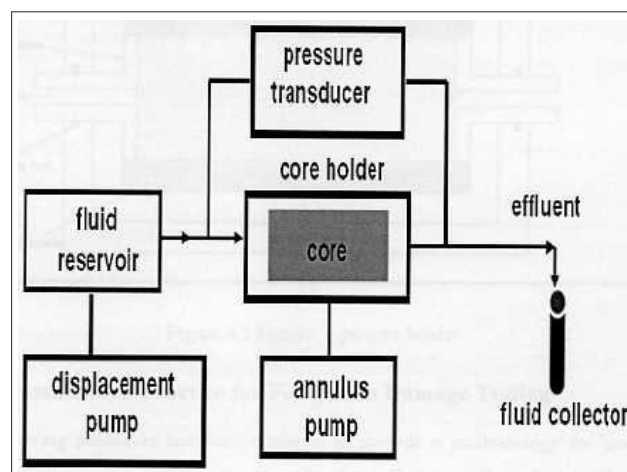
شماره نمونه آب	لزجت (سانتی‌پویز)
۱	۱/۰۰
۲	۰/۸۴
۳	۳/۴۹
۴	۵/۳۷

جدول ۶ | مشخصات ثابت سنگ، سیال و سیستم مورد استفاده در آزمایش‌های بررسی تاثیر اشباع آب اولیه

مقدار	پارامتر
۶/۴۷	تراوایی (میلی‌داریسی)
۱۰/۲۴	تخلخل (درصد)
۵۵/۷ در ۱۲۰ پام ۵۲/۸ در ۱۷۰ پام	اشباع آب کاهش‌ناپذیر (درصد)
۰/۱۱ در ۱۲۰ پام ۰/۱۳ در ۱۷۰ پام	تراوایی نسبی در اشباع آب کاهش‌ناپذیر (میلی‌داریسی)
۰/۰۲	لزجت سیال هیدروکربنی (سانتی‌پویز)
۷۲	کشش بین‌سطحی (میلی‌نیوتن بر داین)
آب‌دوست	ترشوندگی
۱/۰۰	لزجت آب (سانتی‌پویز)

جدول ۳ | دسته‌بندی نمونه مغزه‌ها با توجه به مقادیر تراوایی

دسته	میانگین تراوایی (میلی‌داریسی)	میانگین تخلخل (درصد)
۱	۶/۴۷	۱۰/۲۴
۲	۱۲/۱۵	۹/۹۵
۳	۴/۴۳	۷/۳۶
۴	۱/۵۳	۶/۴۳
۵	۸/۱۳	۸/۰۵



شکل ۲ | نمایش شماتیک سیستم مورد استفاده

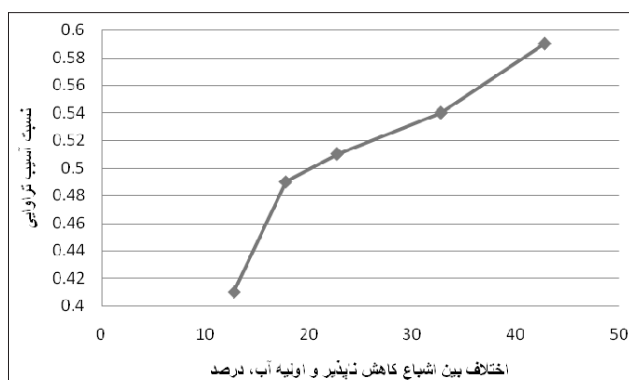
خواص سنگ برای تمامی آزمایش‌ها از نمونه مغزه‌های گروه-۱ استفاده شد. مشخصات ثابت سنگ، سیال و سیستم مورد استفاده در آزمایش‌های این بخش در جدول-۶ نشان داده شده است. نتایج این بخش نیز در شکل‌های ۳-۴ و ۳-۴ نشان داده شده است.

داده‌های به دست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی با هدف سنجش میزان تأثیر اشباع اولیه آب بر میزان آسیب وارده به سازند در اثر انسداد فاز آبی بیان‌گر تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اشباع اولیه آب است. با کاهش اشباع اولیه آب، تراوایی پیش از آسیب افزایش می‌یابد که دلیل آن زیاد شدن سطح مقطع عبوری برای گاز است. با کاهش اشباع اولیه آب، میزان نسبت آسیب تراوایی ناشی از انسداد فاز آبی افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه برای هر نوع سنگ خاص، اشباع کاهش‌ناپذیر آب ثابت است بنابراین کاهش اشباع اولیه آب به معنی افزایش اختلاف بین مقدار اشباع کاهش‌ناپذیر و اشباع اولیه آب است. در نتیجه با افزایش اختلاف بین اشباع کاهش‌ناپذیر و اولیه آب، میزان آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳-۴).

دلیل پدیده بالا این است که نیروهای مویینه موجود در محیط متخلخل، تابعی از اشباع آب هستند. با در نظر گرفتن این نکته که برای یک سنگ میزان اشباع کاهش‌ناپذیر آب ثابت است، هر قدر اشباع اولیه آب کمتری در حفرات وجود داشته باشد، نیروهای مویینه بیشتری در سنگ حضور دارد. این نیروها هر قدر بیشتر باشند سبب شدت یافتن آشام خودبه‌خودی می‌شوند. به عبارت دیگر این نیروها سبب جذب و به دام افتادن میزان بیشتری از آب در محیط متخلخل شده و در نهایت به آسیب تراوایی بیشتر منتهی می‌شود.

#### ۴-۲- تأثیر تراوایی

برای بررسی تأثیر تراوایی بر شدت انسداد فاز آبی از نمونه‌های



۴ تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف بین اشباع کاهش‌ناپذیر و اولیه آب در فشار اختلافی ۱۷۰ پام

به ترتیب به عنوان افزودنی‌های افزایشنده و کاهشنده لزجت استفاده شد. نمونه‌های آب با لزجت‌های مختلف در جدول-۵ نشان داده شده است. برای سادگی کار فرض شد که افزودن شکر و پودر شوینده به آب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کشش میانرویبه آب-نیترژن ندارد.

سیستم مورد استفاده از مغزه‌نگهدار<sup>۱</sup>، مخزن ذخیره آب، پمپ تزریق اصلی، پمپ تزریق تأمین‌کننده فشار جانبی، جریان سنج‌ها و ظرف ذخیره‌کننده سیال خروجی تشکیل شده است. شماتیک سیستم مورد استفاده در شکل-۲ نشان داده شده است.

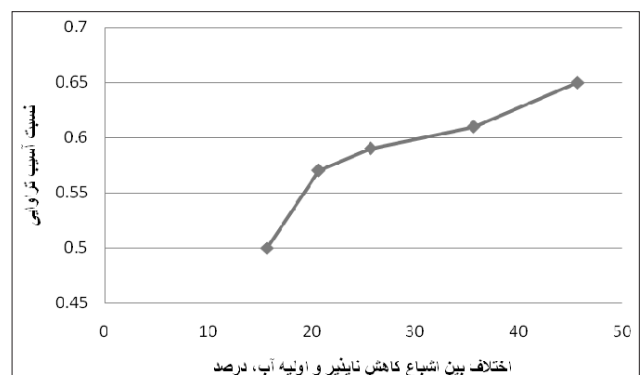
#### ۴- نتایج آزمایشگاهی و بحث

##### ۴-۱- تأثیر اشباع آب اولیه

در این بخش تأثیر اشباع آب اولیه بر میزان آسیب وارده به سازند در اثر انسداد فاز آبی بررسی می‌شود. آزمایش‌ها در دو فشار اختلافی ۱۲۰ و ۱۷۰ پام انجام شد. بدین منظور باید در هر آزمایش، اشباع اولیه آب متغیر و سایر عوامل سنگ، سیال و سیستم برای تمامی آزمایش‌ها یکسان باشد. به منظور یکسان بودن

۷ مشخصات ثابت سنگ، سیال و سیستم مورد استفاده در آزمایش‌های بررسی تأثیر تراوایی

پارامتر	مقدار
آب اولیه (درصد)	۲۰
لزجت نیترژن (سانتی‌پویز)	۰/۰۲
کشش بین‌سطحی (میلی‌نیوتن بر داین)	۷۲
ترشوندگی	آب‌دوست
لزجت آب (سانتی‌پویز)	۱/۰۰



۳ تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف بین اشباع کاهش‌ناپذیر و اولیه آب در فشار اختلافی ۱۲۰ پام



نتیجه می‌گیریم با افزایش تراوایی، نسبت آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی کاهش می‌یابد.

دلیل مشاهده بالا این است که نیروهای مویینه درون حفرات، تابعی از تراوایی هستند. هر قدر تراوایی بیشتر باشد نیروهای مویینگی درون حفرات کمتر خواهند بود. کمتر بودن این نیروها سبب جذب و به دام افتادن مقدار کمتری از آب شده و در نتیجه میزان آسیب تراوایی کمتر خواهد بود. در سنگ‌های کم تراوا به دلیل قابل توجه بودن نیروهای مویینه، میزان آب بیشتری جذب و در حفرات باقی می‌ماند که در نهایت منجر به افزایش آسیب می‌شود.

#### ۴-۳- تأثیر لزجت صافاب

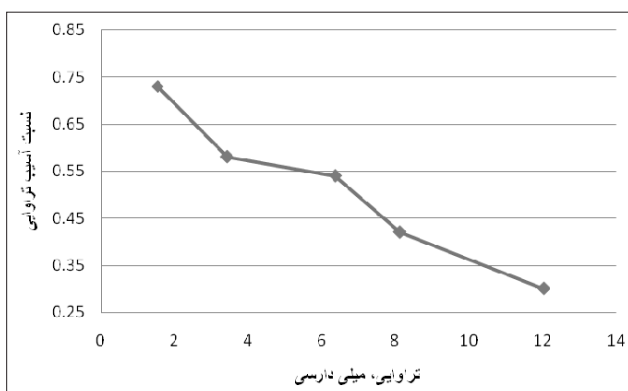
در این بخش تأثیر مقدار لزجت صافاب بر میزان آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی بررسی می‌شود. بدین منظور باید در تمامی آزمایش‌ها تنها لزجت صافاب را تغییر داد و سایر عوامل سیال، سنگ و سیستم را ثابت نگه داشت. بدین منظور از نمونه مغزه‌های دسته دوم که دارای مقادیر تراوایی یکسانی هستند استفاده شد. مشخصات ثابت سیال، سنگ و سیستم ثابت برای تمامی آزمایش‌ها در جدول ۸- نشان داده شده است. در این بخش نیز به منظور بررسی تأثیر فشار اختلافی، آزمایش‌ها در دو فشار اختلافی ۱۲۰ و ۱۷۰ پام انجام شد. داده‌های به دست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی تأثیر لزجت صافاب بر میزان آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی، بیان‌گر تغییرات نسبت آسیب تراوایی با لزجت صافاب است. نتایج این بررسی در دو فشار اختلافی انجام شده در شکل‌های ۷- و ۸- نشان داده شده است.

در بررسی تأثیر لزجت صافاب بر آسیب وارد شده به سازند در اثر انسداد فاز آبی، نتیجه می‌گیریم که با افزایش لزجت صافاب، میزان اشباع کاهش ناپذیر آب افزایش می‌یابد. این به معنی کاهش

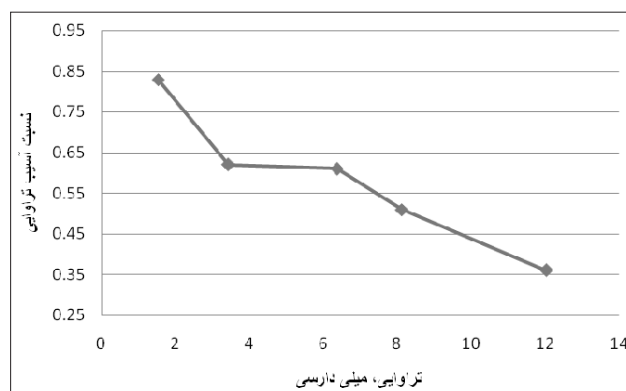
مغزه با تراوایی‌های مختلف استفاده شده است. در این بخش، تنها تفاوت مغزه‌ها با یکدیگر تراوایی آنهاست. سایر خصوصیات آزمایش هم‌چون خواص آب تزریقی، سیال گازی، و مشخصات سیستم برای تمامی آزمایش‌های این بخش یکسان خواهد بود. خواص یکسان سیالات، سنگ و سیستم استفاده شده در این بخش از کار در جدول ۷- نشان داده شده است. افزون بر این به منظور بررسی تأثیر فشار اختلافی نیز آزمایش‌ها در دو فشار اختلافی ۱۲۰ و ۱۷۰ پام انجام شد. در این بخش از نمونه مغزه‌های شماره ۹، ۶، ۱، ۷ و ۸ استفاده شد. هر کدام از این مغزه‌ها متعلق به یکی از دسته‌های تراوایی یاد شده در بخش‌های پیشین هستند. نتایج مربوط به اندازه‌گیری تراوایی نسبی پیش و پس از آسیب سازند و نیز نسبت آسیب در شکل‌های ۵- و ۶- نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های ۵- و ۶- در بررسی تأثیر تراوایی بر آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی، نتیجه می‌گیریم که با افزایش تراوایی میزان اشباع کاهش ناپذیر آب کاهش می‌یابد. به طور طبیعی هر چقدر مقدار این اشباع کمتر باشد تراوایی گاز بیشتر خواهد بود. بنابراین

پارامتر	مقدار
تراوایی نمونه خشک (میلی‌داری)	۱۲/۱۵
تخلخل (درصد)	۹/۹۵
لزجت سیال گازی (سانتی‌پویز)	۰/۰۲
کشش بین‌سطحی (میلی‌نیوتن بر داین)	۷۲
ترشوندگی	آب دوست
آب اولیه (درصد)	۲۰



شکل ۷ | تغییرات نسبت آسیب تراوایی با تراوایی در فشار اختلافی ۱۷۰ پام



شکل ۸ | تغییرات نسبت آسیب تراوایی با تراوایی در فشار اختلافی ۱۲۰ پام

فشار اختلافی انجام شده در شکل‌های ۹-، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های یاد شده در بررسی تأثیر اختلاف فشار بر آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی، نتیجه می‌گیریم که با افزایش مقدار اختلاف فشار، میزان اشباع کاهش‌ناپذیر آب کاهش می‌یابد. این به معنی افزایش هم‌زمان تراوایی گاز در اشباع کاهش‌ناپذیر آب است. به دلیل اینکه در این حالت اشباع کاهش‌ناپذیر آب و به تبع آن تراوایی نسبی گاز در این اشباع برای تمامی حالات یکسان است، بنابراین با افزایش اختلاف فشار، نسبت آسیب تراوایی ناشی از انسداد فاز آبی کاهش می‌یابد.

هر چقدر فشار اختلافی بیشتر باشد توانایی مخزن در جابجایی و خارج کردن آب ورودی به حفرات بیشتر خواهد بود. این امر سبب کاهش مقدار انسداد آب در محیط متخلخل می‌شود.

#### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آسیب وارد به سازند در اثر انسداد فاز آبی در مخازن گازی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. عوامل مورد مطالعه عبارت از اشباع اولیه آب، تراوایی، لزجت صافاب و فشار اختلافی هستند. نتایج آزمایشگاهی که با استفاده از نمونه مغزه‌های ماسه سنگی به دست آمد بیان‌گر وابستگی شدید آسیب وارده به عوامل مورد مطالعه است.

به طور کلی هر چقدر اختلاف بین اشباع اولیه آب و اشباع کاهش‌ناپذیر آب بیشتر باشد، شدت انسداد فاز آبی بیشتر خواهد بود. این بدین معنی است که در مخازن گازی که دارای درصد اشباع آب اولیه بسیار کمی هستند بروز پدیده انسداد فاز آبی و

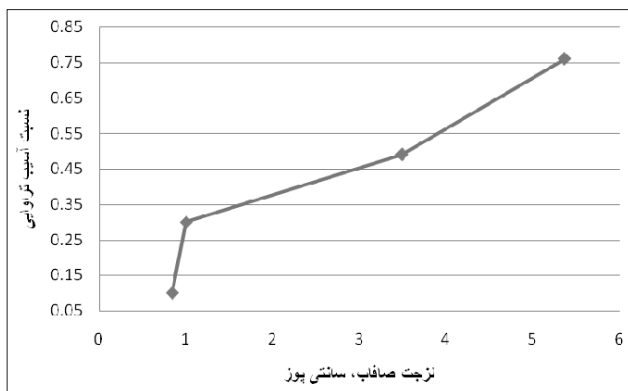
هم‌زمان تراوایی گاز در اشباع کاهش‌ناپذیر آب است. این امر به دلیل آن است که در این حالت اشباع کاهش‌ناپذیر آب و به تبع آن تراوایی نسبی گاز در این اشباع برای تمامی حالات یکسان است. بنابراین با افزایش لزجت صافاب، نسبت آسیب تراوایی ناشی از انسداد فاز آبی افزایش می‌یابد.

برای بیان دلیل افزایش نسبت آسیب تراوایی با افزایش لزجت صافاب می‌توان گفت که هر چقدر لزجت صافاب بیشتر باشد، توانایی سیال مخزن در جابجایی و خارج کردن صافاب ورودی کمتر خواهد بود. در نتیجه میزان بیشتری از آب در حفرات باقی مانده و نسبت آسیب تراوایی نیز بیشتر خواهد بود. بدیهی است در صورت پایین بودن لزجت صافاب، سیال مخزن به راحتی قادر به خارج کردن آب از محیط متخلخل بوده و در نهایت آسیب مربوطه نیز کمتر خواهد بود.

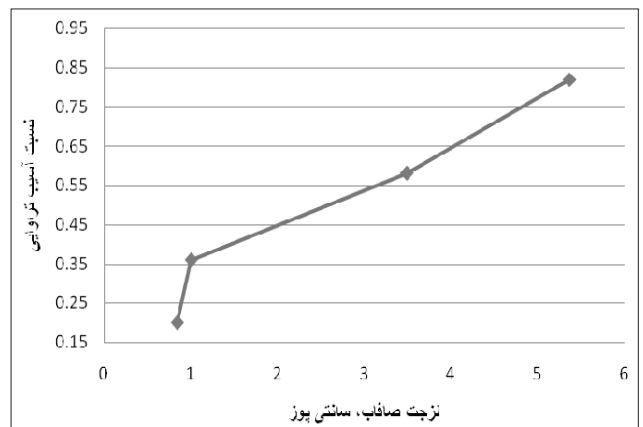
#### ۴-۴- تأثیر اختلاف فشار

در این بخش تأثیر مقدار اختلاف فشار دو سر نمونه مغزه بر میزان آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی بررسی می‌شود. بدین منظور باید در تمامی آزمایش‌ها تنها اختلاف فشار دو سر نمونه مغزه را تغییر داد و سایر عوامل سیال، سنگ و سیستم را ثابت نگه داشت. پیش از این در بررسی تأثیر اشباع اولیه آب، تراوایی و لزجت صافاب به صورت ضمنی تأثیر اختلاف فشار نیز بررسی شده است. نتایج در شکل‌های ۹-، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

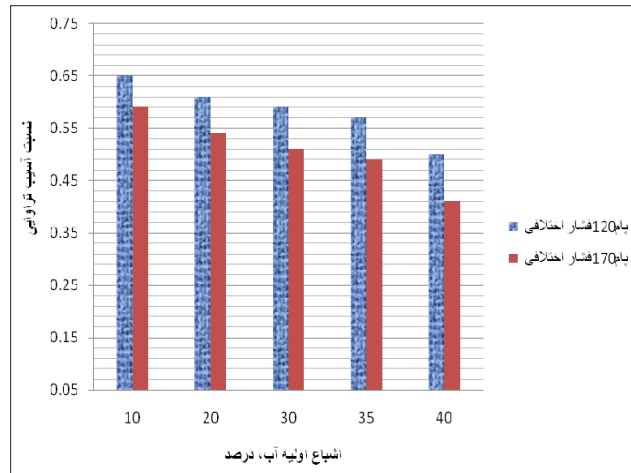
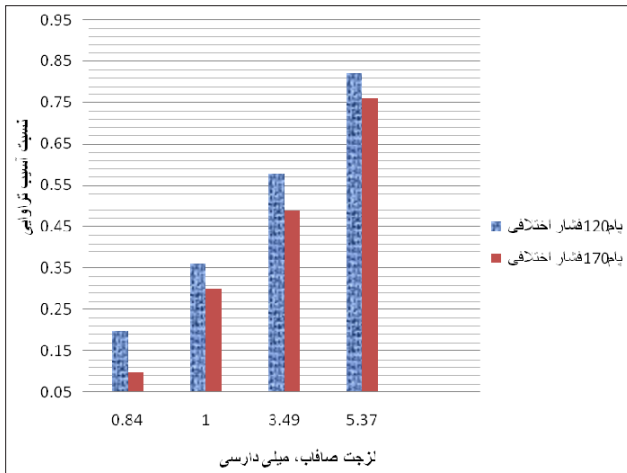
داده‌های به دست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی تأثیر اختلاف فشار بر میزان آسیب سازند ناشی از انسداد فاز آبی بیان‌گر تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف فشار است. نتایج این بررسی در دو



۸ | تغییرات اشباع کاهش‌ناپذیر آب با لزجت صافاب در فشار اختلافی  
۱۷۰ پام



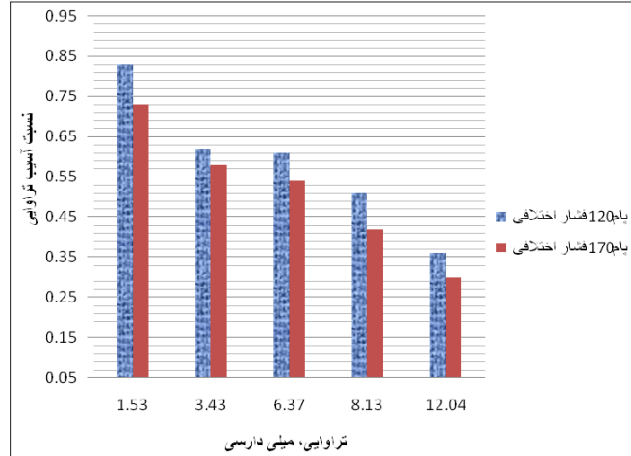
۷ | تغییرات نسبت آسیب تراوایی با لزجت صافاب در فشار اختلافی ۱۲۰ پام



تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف فشار برای لزجت‌های صافاب گوناگون

تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف فشار برای اشباع‌های اولیه آب گوناگون

بروز انسداد فاز آبی بسیار ناچیز خواهد بود. هر چقدر تراوایی سنگ بیشتر باشد انسداد فاز آبی و آسیب مربوطه کمتر خواهد بود. مسلماً در مخازن کم‌تراوا مثل مخازن گازی عمیق با مشکل جدی آسیب سازندی ناشی از انسداد فاز آبی روبرو خواهیم بود. در مخازن با تراوایی بالا (تراوایی ماتریکس) احتمال بروز انسداد فاز آبی ناچیز است. لزجت صافاب یکی دیگر از عوامل مؤثر بر آسیب وارده به سازند در اثر انسداد فاز آبی است. هر چقدر لزجت صافاب بیشتر باشد میزان این آسیب نیز بیشتر خواهد بود.



هم‌چنین با افزایش فشار اختلافی، نسبت آسیب وارده به تراوایی در اثر انسداد فاز آبی کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آزمایشگاهی در زمینه انسداد فاز آبی در مخازن نفتی نیز انجام شود. با در دست داشتن داده‌های آزمایشگاهی کافی در این زمینه، می‌توان به معرفی روابط تجربی جهت حل این معضل پرداخت.

تغییرات نسبت آسیب تراوایی با اختلاف فشار برای تراوایی‌های گوناگون

آسیب مربوطه بسیار زیاد خواهد بود. در مخازن معمولی که در آنها اشباع اولیه آب نزدیک به اشباع کاهش ناپذیر آب است احتمال

#### پانویس‌ها

<sup>1</sup> mirzaei1986@gmail.com

<sup>2</sup> depleted reservoir

<sup>3</sup> initial water saturation

<sup>4</sup> irreducible water saturation

<sup>5</sup> desiccated gas reservoirs

<sup>6</sup> drainage

<sup>7</sup> soxlet extractor

<sup>8</sup> klinkenberg method

<sup>9</sup> resaturation method

<sup>10</sup> core holder

#### منابع

- [1] Katz, D. L., and Lundy, C. L. 1982. Absence of Connate Water in Michigan Gas Reef Reservoirs, an Analysis. AAPG Bulletin, Vol. 66, No. 1, January, P.91.  
 [2] Parekh, B., and Sharma, M. M. 2004. Cleanup of Water Blocks in Depleted Low-Permeability Reservoirs. SPE 89837. Presented at SPE Annual Technical Conference

- and Exhibition. 26-29 Sep. Houston. Texas.  
 [3] You L., and Kang Y. 2009. Integrated Evaluation of Water Phase Trapping Damage Potential in Tight Gas Reservoirs. SPE 122034. Presented at European Formation Damage Conference. 27-29 May. Netherlands.