

ارائه یک روش آزمایشگاهی کنترل تولید ماسه با ایجاد مقاومت فشاری و حداقل کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن

احسان خامه‌چی^{۱*}، امیر میرزایی^۱، محمود اکبری^۱ و رضا دوستی^۲

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- پردیس دانشگاهی ماهشهر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ماهشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

چکیده

تولید ماسه در مخازن ماسه سنگی به دلیل آسیب‌ها و مشکلات اقتصادی که به همراه دارد، موضوعی اساسی در برخی میدان‌های نفت و گاز به شمار می‌رود. تولید ماسه منجر به وقوع مشکلات پرشماری از جمله فرسایش تجهیزات زیرزمینی و روزمینی، آسیب‌های زیست‌محیطی، کاهش و وقفه در تولید و گاهی از دست دادن چاه می‌شود. بنابراین کنترل تولید ماسه از چاه‌های دارای تولید ماسه بسیار مهم است. تا کنون روش‌های مختلفی از جمله مکانیکی و شیمیایی برای کنترل تولید ماسه ارائه و انجام شده‌اند که در روش‌های شیمیایی از طریق تزریق سیال پلیمری همچون انواع رزین، ژل پلیمرها و ... سازند ماسه‌ای تحکیم می‌یابد. در پیشینه تحقیق، اقدام و آزمایش‌های انجام شده در استفاده از انواع رزین‌های مختلف جهت تحکیم مخازن ماسه سنگی، نتیجه‌های حاصل شده نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن تزریق رزین بوده است. در بیشتر موارد رزین‌های پایه حلال مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که به دلیل برطرف کردن نگرانی‌های زیست‌محیطی، ایمنی و هزینه‌های اقتصادی ناشی از بهره‌گیری از این نوع رزین‌ها امروزه رزین‌های پایه آبی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این مطالعه ارائه نوعی رزین پایه آبی که علاوه بر ایجاد مقاومت فشاری و کاهش اندک تراوایی، در مقایسه با رزین‌های پایه حلال سازگار با محیط زیست بوده و از نظر بهداشت و ایمنی موثر و کارآمد است. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت است که با ترکیب نمودن مقدار درصدهای مختلف و معینی از رزین، سخت‌کننده مناسب آن و نمونه ماسه تولیدی، نمونه‌های مختلف مغزه ساخته شد. مغزه‌های ساخته شده جهت اندازه‌گیری تراوایی و مقاومت فشاری آزمایش شدند. آزمایش‌های انجام گرفته نشان دادند که سیال مورد استفاده توانایی مقاوم‌سازی ماسه را داشته و مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی باقی‌مانده با تغییر مقدار ترکیب درصد رزین و سخت‌کننده آن نیز تغییر می‌کنند.

کلمات کلیدی: مخازن ماسه سنگی، کنترل تولید ماسه، مقاومت فشاری، تراوایی، رزین

مقدمه

امروزه با توجه به قیمت جهانی نفت، کنترل تولید ماسه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های بخش تولید محسوب می‌شود [۱]. صدها میدان نفت و گاز در سراسر دنیا تحت تأثیر این مشکل هستند و سالانه میلیون‌ها دلار صرف پیش‌بینی تولید و مهار ماسه و تعمیر چاه‌ها و تجهیزات سرچاهی می‌شود، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حدود ۷۰٪ تولید نفت جهان از مخازن غیرمستحکم و مستحکم ضعیف صورت می‌پذیرد [۲]. در مخازن غیرمستحکم با عبور سیال از محیط متخلخل، ذرات ماسه از سنگ مخزن جدا شده و همراه با سیال به حرکت در می‌آیند، در نتیجه این پدیده منجر به تولید ماسه به‌همراه سیال تولیدی می‌شود [۳]. تولید ماسه به‌همراه سیال می‌تواند باعث ایجاد ساییدگی در لوله مغزی، تخریب چاه، ساییدگی در زیرساخت‌های سرچاهی و همچنین انسداد جریان سیال تولیدی شود [۴]. روش‌های کنترل ماسه عبارت‌اند از روش تحکیم شیمیایی سازند، روش‌های مکانیکی کنترل ماسه و نیز ترکیب روش‌های مکانیکی و شیمیایی [۵]. به‌دلیل چالش‌های ناشی از روش مکانیکی (هزینه‌بر و زمان‌بر بودن)، روشی که امروزه در حال گسترش و مورد استفاده است، روش تحکیم شیمیایی است [۶]. تحکیم شیمیایی شن و ماسه از اوایل دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. در این روش با تزریق مواد شیمیایی به سازند باعث تحکیم سازند در اطراف دهانه چاه می‌شود، این مواد همانند چسب عمل کرده و از حرکت دانه‌های ماسه جلوگیری به عمل می‌آورند [۸]. اما پر نمودن قسمتی از فضای روزه‌های سازند موجب کاهش تراوایی می‌گردد [۹]. به‌طور کلی روش شیمیایی را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد: ۱) استحکام‌افزایی درجا (تزریق یک سیال مستحکم‌کننده) [۱۰، ۲] تجمیع ذرات شن و ماسه (کاهش بار الکترواستاتیکی) [۱۱].

بسیاری از پژوهش‌گران از پلیمرها برای تحکیم شن و ماسه استفاده کرده‌اند، زیرا این نوع مواد گرانبه‌تری نیستند و مقاومت فشاری کافی برای تحکیم شن و ماسه ایجاد می‌کنند. همچنین با استفاده از این نوع مواد زمان پلیمری شدن را می‌توان کنترل کرد، نسبتاً کم هزینه هستند و برخی از آن‌ها را می‌توان در دماهای بالا استفاده کرد، پلیمرها و میکروژل‌های پایه آبی تمایل زیادی به جذب روی سطح سنگ دارند، از این رو یک لایه محافظ برای کنترل فرسایش ایجاد می‌کنند [۱۲]. کتلار و همکارانش سه نوع ماده شیمیایی را در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند، که شامل: مواد شیمیایی مبتنی بر شیمی ارگانوسیلان^۱، مواد شیمیایی بر پایه پلیمرها و گروه آخر براساس فرآیند آنزیمی رسوب‌گذاری CaCO_3 بود. با توجه به نتایج آزمایش‌های کاهش تراوایی، افت فشار و درصد ماسه تولیدی در نهایت ارگانوسیلان در بین این سه دسته انتخاب شد. آزمایش‌ها در شرایط دمایی مخزن و با استفاده از آب و نفت سازند انجام شد. از ارگانوسیلان در چند چاه میدان دریای شمال استفاده شد که باعث افزایش تولید و کاهش ماسه تولیدی شد [۶]. لارسن و همکارانش روشی با نام تحکیم شبه طبیعی^۲ برای کنترل تولید ماسه ارائه دادند. این روش شامل یک فرآیند رسوب‌گذاری درجا کنترل شده از کربنات کلسیم روی دانه‌های شن و ماسه سازند و یک روش ارزان و سازگار با محیط زیست بود. آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان دادند که می‌توان با رسوب آنزیمی کربنات کلسیم در محدوده دمایی ۲۵ تا ۶۵ °C شن و ماسه‌های سست را مقاوم ساخت. این روش برای دماهای بالا مطلوب نیست و مقاومت فشاری کم ایجاد می‌کند [۱۳]. ولسکا و همکارانش یک سیال پایه آبی (رزین پایه آبی) را برای کنترل تولید ماسه ارائه دادند.

1. Organosilane

2. Quasi Natural Consolidation (QNC)

در این مطالعه نمونه ماسه با درصد‌های متفاوتی از رزین و سخت‌کننده^۴ (عامل ایجاد کننده اتصالات عرضی میان زنجیره‌های پلیمری) مناسب آن ترکیب شد و پس از پخت (مرحله‌ای که تمامی اتصالات عرضی میان زنجیره‌های پلیمری برقرار شده و شبکه‌های پلیمری تشکیل شده‌اند و سیستم به حالت جامد درآمده است)، مغزه‌های مناسب برای اندازه‌گیری خواص مختلف برش داده شدند. هر یک از مغزه‌ها جهت دو ویژگی مهم تراوایی مطلق و مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند.

مواد مورد استفاده

نمونه ماسه، آب سازندی و نفت مورد استفاده در این مطالعه از میدان نفتی اهواز استان خوزستان واقع در جنوب غرب ایران تهیه شده است. نتایج آزمون SARA^۵ جهت اندازه‌گیری مقادیر ترکیبات نفت مورد استفاده با درجه API^۶ برابر با ۲۹/۵ در این پژوهش در شکل ۱ قابل مشاهده است. رزین مورد استفاده در این پژوهش جهت مقاوم‌سازی ماسه، پایه آبی بوده و به‌روش بسپارش محلولی طی یک فرآیند گرماگیر در محیط آزمایشگاه تولید و مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

نمونه ماسه

برای شناسایی بهتر نوع جنس سنگ سازندی از آزمون‌های پراش پرتو ایکس^۷ (XRD) و طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس^۸ (XRF) کمک گرفته شد. براساس آزمون XRD، فازهای موجود در نمونه ماسه شامل کانی‌های کوارتز، هالیت، انیدریت و آلپیت بود. نتایج حاصل از آزمون XRF در جدول ۲ نشان داده شده است.

مزیت این سامانه نسبت به رزین‌های پایه حلال، ایمنی، سازگاری با محیط زیست، نفوذ به فواصل طولانی‌تر سازند، کاهش کم تراوایی و استحکام بالا بود [۱۴]. مندوز و همکارانش، یک روش جدید بر پایه تغییر پتانسیل زتا^۱ ارائه دادند. این سامانه به سازند آسیبی وارد نمی‌کند و در سازندهای با تراوایی ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ mD کاربرد دارد. افزایش نرخ تولید بدون تولید ماسه را در بیش از ۱۰۰ مورد بررسی نشان داد. ایجاد مقاومت فشاری کم از ویژگی‌های سامانه‌های تغییر پتانسیل زتا است [۱۵]. میشر و همکارانش با طراحی آزمایشی مشاهده کردند که سنتز نانوذره SiO₂ به‌همراه اوره فرمالدئید می‌تواند خواص مکانیکی آن و همچنین مقاومت در برابر آب را افزایش دهد. علاوه بر آن مقاومت فشاری به دست آمده بیشتر از ۲۰۰۰ پام^۲ بود و کاهش اندکی در تراوایی (۱۰٪) مشاهده شد [۱۶]. کالگانکار و همکارانش کاربردهای جدید نانو ذرات در میادین نفتی، از تحکیم مخازن ماسه‌سنجی گرفته تا جلوگیری از تولید آب^۳ مورد بررسی قرار دادند. این سامانه علاوه بر تحکیم سازند، باعث کاهش ۴۰٪ تراوایی شد [۱۷]. همچنین خامه‌چی و همکاران در طی آزمایش‌های خود به اثر گذاری نانوذرات سیلیس در راستای کاهش تولید ماسه دست یافتند و بیان داشتند که این نوع نانو ذره به‌عنوان سپری بین مواد معدنی سطح ذرات سنگ و سیمان سازند و یون‌های فاز آبی عمل می‌کند. بر این اساس، سطحی که در برابر واکنش‌های شیمیایی قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد. بنابراین، تعداد ذرات ماسه جدا شده در حال حرکت با جریان سیال کاهش می‌یابد [۱۸]. رجبی و همکاران در بررسی‌های خود نشان دادند که روش‌های شیمیایی با استفاده از رزین‌ها جهت کنترل تولید ماسه در اولویت قرار می‌گیرند و نسبت به دیگر روش‌ها برتری دارند [۱۹].

فرآیند انجام آزمایش

1. Zeta Potential

2. Psi

3. Water Shut off

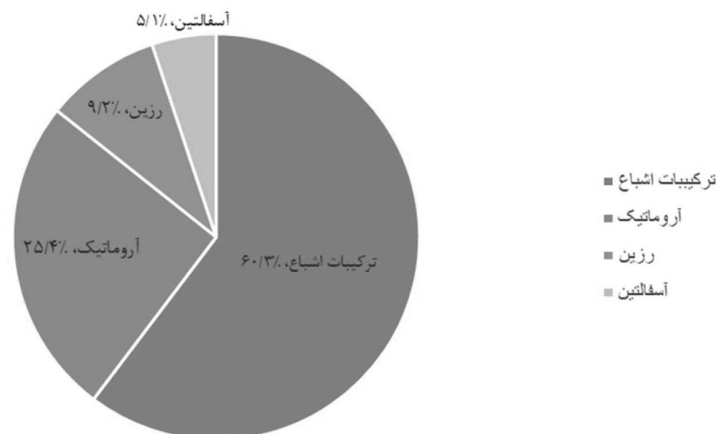
4. Hardener

5. Saturates Asphaltenes Resins Aromatics

6. American Petroleum Institute

7. X-Ray Diffraction

8. X-Ray Fluorescence



شکل ۱ نتایج آزمون SARA نمونه نفت مورد استفاده

جدول ۱ مشخصات رزین مورد استفاده جهت مقاوم‌سازی ماسه

| مشخصات | محتوای جامد ^۱ (%) | گرانروی (cP) | رنگ |
|--------|------------------------------|--------------|------|
| اندازه | ۵۰ | ۲۳ | شفاف |

جدول ۲ نتیجه حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه ماسه مورد آزمایش به روش XRF

| اکسید عنصر | درصد وزنی | اکسید عنصر | درصد وزنی | اکسید عنصر | درصد وزنی |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| Al ₂ O ₃ | ۱/۵۰ | MgO | ۰/۱۲ | Na ₂ O | ۱/۳۰ |
| SiO ₂ | ۹۱/۲ | P ₂ O ₅ | ۰/۰۷ | SO ₃ | ۱/۵۰ |
| K ₂ O | ۰/۵۵ | Cl | ۲/۰۰ | CaO | ۰/۵۷ |
| Fe ₂ O ₃ | ۰/۶۹ | L.O.I | ۰/۵۰ | - | - |

نمونه آب سازندی

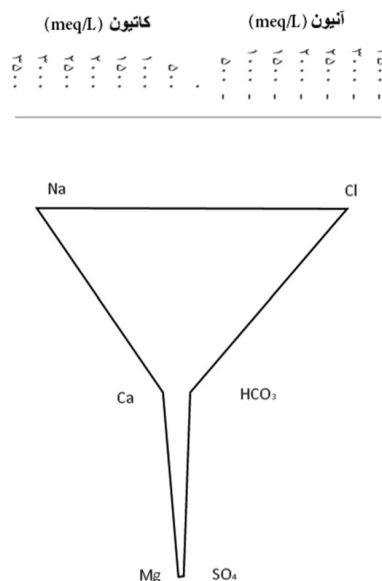
خواص آب سازندی بر روی عملکرد رزین پیش از فرآیند پخت و همچنین کیفیت و مقاومت رزین پس از پخت اثر گذار است. به گونه‌ای که هر چه مقدار آب و شوری آن بیشتر باشد سطح تماس رزین با دانه‌های سنگ کاهش می‌یابد و مقاوم‌سازی به‌خوبی انجام نمی‌پذیرد، همچنین اندازه pH آب سازندی می‌تواند خواص رزین را پیش از پخت تحت تاثیر قرار دهد و فرآیند پخت آن را برهم زند، به همین دلیل بایستی خواص آب در نظر گرفته شود. از این‌رو برای بررسی تاثیرات خواص آب سازندی، شوری، pH و ... مورد ارزیابی قرار گرفتند که مقدار شوری آب در حدود ۱۸۰۰۰۰ ppm و اندازه pH آن برابر با ۵/۲ اندازه‌گیری شد. همچنین برای درک بهتر از اجزای تشکیل‌دهنده آب سازندی مورد

استفاده نمودار استیف^۲ آن در شکل ۲ قابل مشاهده است.

روش تحکیم ماسه

نمونه ماسه در ابتدا با آب و نفت سازندی آغشته شد و به مدت ۶۰ min به‌طور کامل در ترکیب آب و نفت خیسانده شد و سپس خارج گردید تا خشک شود. پس از مرحله آغشته‌سازی، نمونه ماسه آغشته شده به سیال سازندی با مقادیر مشخصی از رزین و سخت‌کننده ترکیب شد. مقادیر رزین براساس وزن ماسه تعیین شد که در سه اندازه ۱۵، ۲۵ و ۳۵٪ وزن ماسه، به‌ماسه افزوده گردید و با سه مقدار مختلف ۱/۰، ۰/۵ و ۲/۰٪ سخت‌کننده مورد آزمایش قرار گرفت.

1. Solid Content
2. Stiff Diagram



شکل ۲ نمودار استیف نمونه آب سازندی مورد استفاده

$$K_a = \frac{2000P_a m_a qL}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (1)$$

که در رابطه بالا داریم:

K_a : تراوایی گاز، برحسب mD

P_a : فشار اتمسفر، برحسب atm

μ_a : ویسکوزیته گاز نیتروژن، برحسب cp

q : نرخ جریان گاز، برحسب cc/s

L : طول مغزه، برحسب cm

A : سطح مقطع نمونه، برحسب cm^2

P_1 : فشار بالادستی، برحسب atm

P_2 : فشار پایین دستی، برحسب atm

آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری تک محوری (UCS)^۲ با استفاده از دستگاه جک تری تک محصول شرکت وایکهام فرانس از انگلیس که شمایی از آن در شکل ۶ آورده شده است، اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری تک محوری با اعمال نیروی محوری برروی نمونه استوانه‌ای با قطر مشخص تا زمان شکست اندازه‌گیری می‌شود. سپس UCS با تقسیم نیرویی که باعث شکست بر سطح مقطع نمونه شده است، تعیین می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، از یک محفظه استوانه‌ای فولادی برای پخت نمونه ماسه در شرایط شبیه‌سازی شده دما (۹۰ °C) استفاده شد. سپس محفظه به همراه نمونه ماسه تحکیم یافته به مدت ۱۵ h برای پخت کامل رزین در شرایط دمایی یاد شده قرار داده شد و در پایان پس از خارج نمودن مغزه تشکیل شده، مغزه از نظر مقاومت فشاری و تراوایی مطلق مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه و ویژگی مغزه‌های به دست آمده بعد از فرآیند برش در جدول ۳ قابل مشاهده است. نمونه مغزه تحکیم یافته توسط رزین در شکل ۴ نشان داده شده است.

آزمایش تراوایی

تراوایی با گاز از روش پایا و با استفاده از گاز نیتروژن و دستگاه تراواسنج^۱ که در شکل ۵ نمایش داده شده است، اندازه‌گیری شد. روش کار بدین صورت است که نمونه خشک شده در داخل دستگاه تراواسنج قرار می‌گیرد و فشار ۴۰۰ پام به عنوان فشار محصور اعمال می‌گردد. با تزریق گاز نیتروژن و اندازه‌گیری فشار ثبت شده و نرخ تزریق شده و روابط ریاضی میزان تراوایی گاز به دست می‌آید. رابطه ۱ برای محاسبه تراوایی در این روش به کار می‌رود [۲۰]:

1. Permeameter
2. Unconfined Compressive Strength



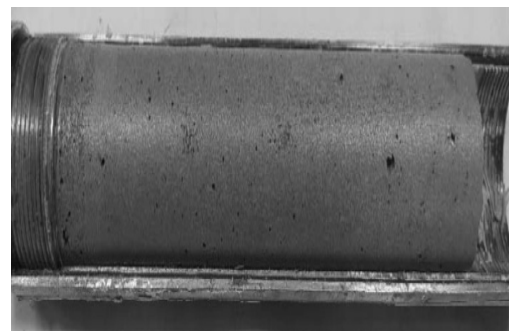
شکل ۳ محفظه فولادی مورد استفاده جهت تحکیم ماسه

جدول ۳ مشخصات و اندازه مغزه‌های تشکیل شده

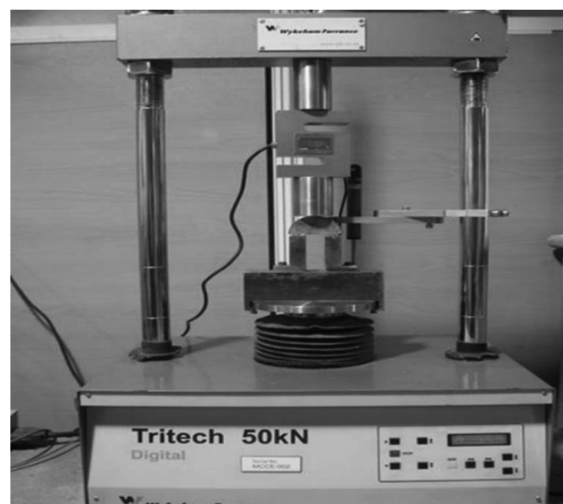
| شماره مغزه | مقدار رزین (%) | مقدار سخت کننده (%) | طول مغزه (mm) | قطره مغزه (mm) |
|------------|----------------|---------------------|---------------|----------------|
| ۱ | ۳۵ | ۲ | ۷۴/۵۹ | ۳۸/۳۳ |
| ۲ | ۲۵ | ۲ | ۸۶/۴۹ | ۳۸/۱۲ |
| ۳ | ۱۵ | ۲ | ۸۲/۰۱ | ۳۸/۷۰ |
| ۴ | ۳۵ | ۱ | ۸۳/۷۷ | ۳۷/۸۷ |
| ۵ | ۳۵ | ۰/۵ | ۷۲/۵۳ | ۳۸/۷۰ |



شکل ۵ دستگاه تراوانسج جهت اندازه‌گیری تراوایی



شکل ۴ نمونه مغزه تحکیم یافته توسط رزین



شکل ۶ دستگاه جک تری تک جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری

رزین باید به گونه‌ای باشد تا هم بتوان به کمک آن استحکام لازم را در سازند ایجاد نمود تا از شکست سازند و در نتیجه تولید ذرات ماسه جلوگیری شود و هم به گونه‌ای باشد که باعث کاهش شدید تراوایی و آسیب به سازند نشود. اگر حجم رزین تزریقی از مقدار بهینه و معین خود بیشتر شود، باعث بسته شدن منافذ و کاهش شدید تراوایی و در برخی موارد از دست رفتن چاه پس از پخت رزین می‌شود. در این مطالعه نیز سعی بر آن بود تا اثر مقدار رزین بر عملکرد آن در ایجاد مقاومت فشاری و تغییر تراوایی مورد بررسی قرار گیرد. مقدار رزین مورد استفاده در این مطالعه براساس درصد وزنی ماسه سازندی در مقادیر ۱۵، ۲۵ و ۳۵٪ مقدار نمونه ماسه سازندی بوده است. شکل ۷ تغییرات مقاومت فشاری نمونه مغزه را در درصدهای مختلف رزین نسبت به ماسه سازندی نشان می‌دهد. مغزه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در شکل ۷ به ترتیب نشان‌دهنده ۳۵، ۲۵ و ۱۵٪ وزنی رزین نسبت به مقدار نمونه ماسه سازندی می‌باشد. همان‌طور که در شکل نیز قابل مشاهده است با افزایش مقدار رزین موجود در سیستم از ۱۵٪ (نمونه مغزه شماره ۳) به ۳۵٪ (نمونه مغزه شماره ۱) مقاومت نهایی مغزه حاصل شده پس از پخت رزین افزایش پیدا می‌کند. این افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار رزین را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش مقدار رزین موجود در سیستم، حجم رزینی که در بین ذرات ماسه قرار گرفته و فضای بین ذرات را پر می‌کند، افزایش پیدا کرده که پس از گذشت مدت زمان کافی در دمای ۹۰°، پخت آن به صورت کامل انجام می‌پذیرد و باعث ایجاد مقاومت بین ذرات می‌شود. در واقع رزین موجود در بین ذرات ماسه پس از پخت به یک جامد بسیار سخت تبدیل شده و مقاومت آن افزایش می‌یابد، به همین دلیل هرچه حجم رزین موجود در فضای بین ذرات ماسه بیشتر باشد مقاومت نهایی نمونه مغزه تشکیل شده نیز افزایش پیدا می‌کند.

اندازه‌گیری درست مقدار UCS زمانی صحیح است که نسبت طول به قطر بیشتر از ۲ برابر باشد، در غیر این صورت باید مقدار UCS توسط رابطه ۲ نیز تصحیح و محاسبه گردد [۲۱].

$$UCS_c = \frac{UCS_m}{0.88 + 0.24 \frac{D}{L}} \quad (2)$$

که در رابطه بالا داریم:

UCS_c : مقاومت فشاری تک محوری محاسبه شده،
بر حسب psi

UCS_m : مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری شده،
بر حسب psi

D: قطر مغزه، بر حسب in

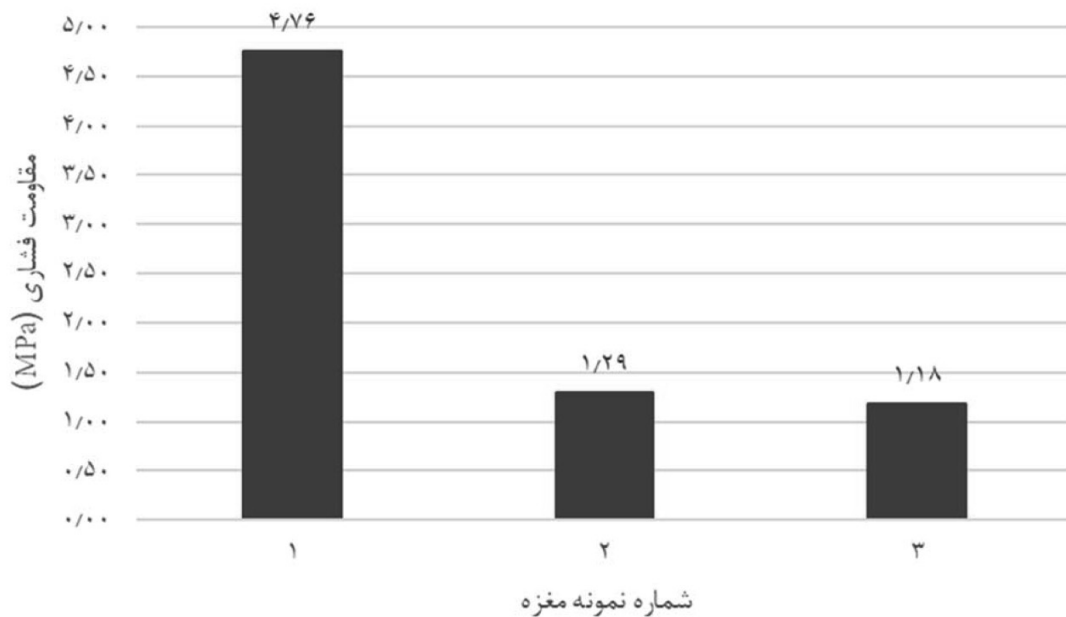
L: طول مغزه، بر حسب in

بحث و نتایج

از آنجا که در مبحث تحکیم شیمیایی به کمک مواد پلیمری همانند رزین‌ها، دو کمیت مقاومت فشاری ایجاد شده و مقدار تراوایی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش در راستای بررسی مقادیر این دو کمیت بوده و با تغییر درصد سخت‌کننده و همچنین تغییر نسبت رزین نسبت به مقدار نمونه ماسه سازندی، مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی نمونه مغزه‌های حاصل شده اندازه‌گیری شد که در ادامه شرح داده می‌شود.

تأثیر مقدار رزین

در طراحی عملیات‌های میدانی تزریق سیال در مخازن نفت و گاز، صرف نظر از نوع عملیات همواره حجم سیالات تزریقی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مبحث مستحکم سازی سازند نیز یکی از مواردی که باید قبل از به کارگیری رزین درون سازند مشخص شود مقدار بهینه رزین می‌باشد. افزایش بیش از حد رزین از نظر فنی و اقتصادی قابل توجیه نبوده و کاهش مقدار رزین نیز ممکن است بر عملکرد رزین در کنترل تولید ماسه و ایجاد استحکام در سازند، اثرات نامطلوب داشته باشد. حجم



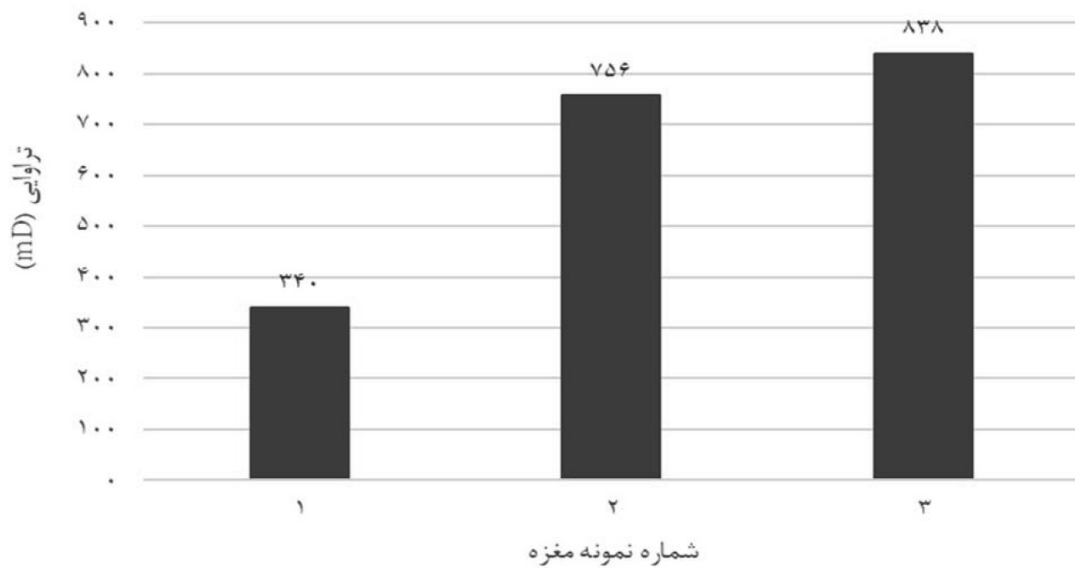
شکل ۷ مقادیر مقاومت فشاری مغزه براساس درصد‌های مختلف رزین در ترکیب با نمونه ماسه سازندی

است. پس با این وجود می‌توان یکی از نمونه‌های ۲ یا ۳ را که نمایانگر مقادیر ۲۵ و ۱۵٪ رزین هستند به‌عنوان مقدار بهینه گزارش نمود که در این امر باید به مسائل فنی و اقتصادی توجه ویژه شود، اما با توجه به اینکه مغزه شماره ۲ تراوایی قابل توجهی داشته و مقاومت فشاری آن نیز نسبت به نمونه ۱ از مقدار بالاتری برخوردار است، می‌توان آن را به‌عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت.

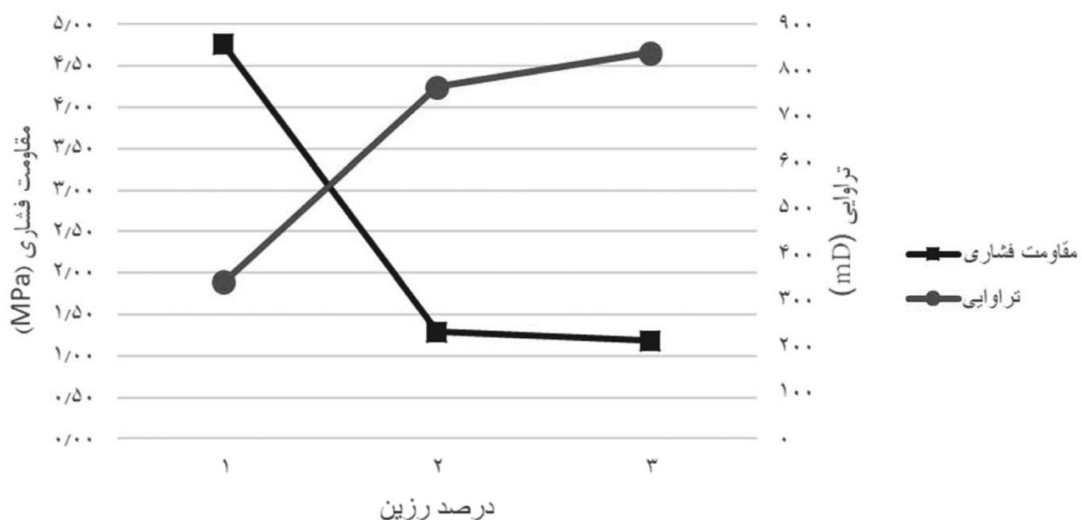
تاثیر مقدار سخت‌کننده

به‌طور کلی اکثر رزین‌ها و مواد پلیمری که در صنایع مختلف به‌کار گرفته می‌شوند به‌صورت تک جزئی نبوده و برای آن که به‌طور موثری به‌کار گرفته شوند به یک ماده شیمیایی به نام سخت‌کننده یا عامل پخت نیاز دارند. جزء دوم که تحت عنوان سخت‌کننده به‌کار گرفته می‌شود اثرات زیادی برروی استحکام نهایی رزین و مدت زمان پخت آن دارد. از طرفی برای استفاده از سخت‌کننده باید مقدار بهینه آن مشخص شود زیرا اگر مقدار این جزء از مقدار بهینه مورد نیاز بیشتر باشد نه تنها باعث افزایش استحکام رزین نهایی پخت شده نمی‌شود.

یکی دیگر از مباحثی که در این پژوهش به آن پرداخته شد اندازه‌گیری مقادیر تراوایی نمونه مغزه‌های حاصل شده در درصد‌های مختلف رزین نسبت به مقدار نمونه ماسه سازندی بود. همان‌طور که در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است، با افزایش درصد رزین از ۱۵٪ (مغزه شماره ۳) به ۳۵٪ (مغزه شماره ۱) تراوایی نمونه مغزه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. کاهش تراوایی با افزایش مقدار رزین موجود در سیستم به این علت است که فضای بین ذرات ماسه کوچک بوده و پس از آن که رزین در این فضاها قرار گرفت و پخت شد، باعث کاهش قطر فضا‌های موجود بین دانه‌ها شده و مقدار تراوایی نیز کاهش می‌یابد. شکل ۹ مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی نمونه مغزه را در درصد‌های مختلف رزین نسبت به ماسه سازندی نشان می‌دهد. در نمودار مربوط به مغزه شماره ۱ که مقدار رزین ۳۵٪ وزنی ماسه‌سازندی می‌باشد مقدار مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های دیگر بالاتر بوده ولی تراوایی نمونه که مهم‌ترین کمیت در اجرای موفق یک عملیات مقاوم‌سازی به‌کمک رزین‌ها می‌باشد نسبت به دیگر نمونه‌ها کمتر



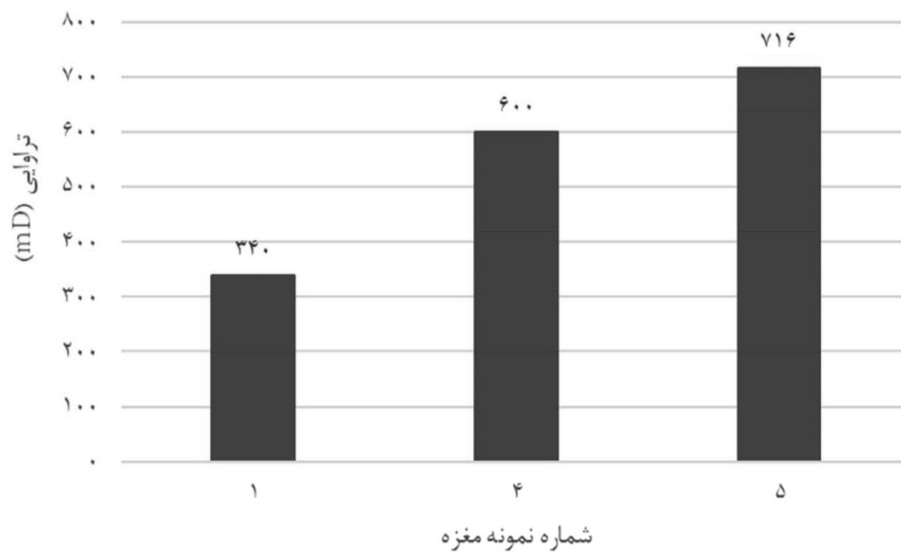
شکل ۸ مقادیر تراوایی نمونه مغزه براساس درصد های مختلف رزین در ترکیب با ماسه سازندی



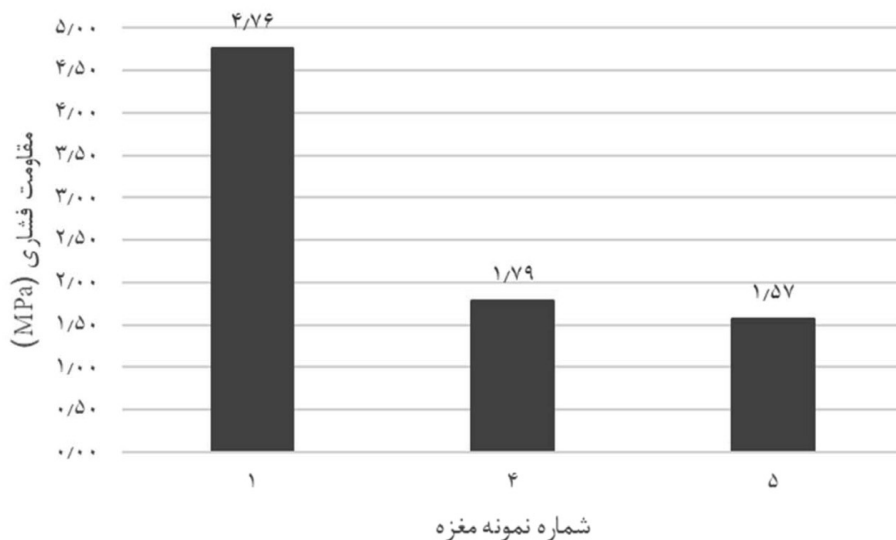
شکل ۹ مقایسه مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی نمونه مغزه‌ها براساس درصد مختلف رزین در ترکیب با ماسه سازندی

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات تراوایی و مقاومت فشاری را در حالتی نشان می‌دهد که درصد رزین موجود در مغزه‌های شماره ۱، ۴ و ۵ برابر با ۳۵٪ وزن ماسه بوده و مقادیر سخت‌کننده به کار گرفته شده نیز در سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۲٪ متغیر می‌باشد. مغزه‌های ۱، ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ۲، ۱ و ۰/۵٪ سخت‌کننده می‌باشد. براساس شکل ۱۰ با کاهش مقدار سخت‌کننده از ۲٪ (مغزه شماره ۱) به ۰/۵٪ (مغزه شماره ۵) مقدار تراوایی افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است.

بلکه باعث می‌شود زنجیره‌های پلیمری با سرعت بسیار بالایی تشکیل شوند و استحکام نهایی رزین کاهش پیدا می‌کند و همچنین فرآیند عملیات میدانی را با مشکل روبرو سازد. در سمت مقابل اگر مقدار سخت‌کننده بیش از حد کم باشد کمکی به پخت رزین نمی‌کند و در نتیجه مقاومت‌سازی به‌خوبی انجام نمی‌پذیرد. در این پژوهش سعی بر آن بود تا اثر مقدار سخت‌کننده بر مقاومت نهایی و تراوایی نمونه مغزه پخت شده مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۰ تغییر تراوایی نمونه مغزه با تغییر مقدار سخت‌کننده



شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری نمونه مغزه با تغییر مقدار سخت‌کننده

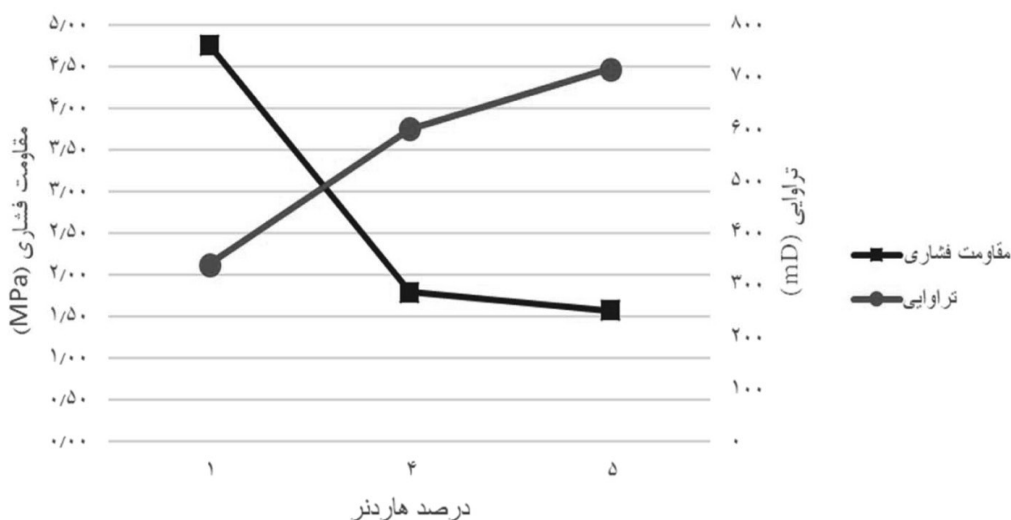
می‌شود تا فضاهای خالی بین ذرات ماسه مسدود شده و یا قطر آنها کاهش پیدا کند که در نتیجه این موارد مقدار تراوایی نمونه کاهش پیدا می‌کند. به‌طور کلی مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی نمونه مغزه‌هایی که تحت تحکیم با رزین‌ها قرار می‌گیرند رفتاری عکس یکدیگر دارند. به این صورت که هر عاملی باعث شود مقدار مقاومت فشاری نمونه سنگ و یا ذرات شن و ماسه تحکیم یافته افزایش یابد باعث کاهش مقدار تراوایی می‌شود.

در واقع با افزایش مقدار سخت‌کننده، مقدار رزین نهایی پخت شده افزایش پیدا کرده و باعث کاهش تراوایی شود. به‌طور کلی با اضافه کردن سخت‌کننده به رزین زنجیره‌های پلیمری تشکیل‌شده و فرآیند پخت آن آغاز می‌گردد. حال با افزایش مقدار عامل سخت‌کننده زنجیره‌های پلیمری بیشتر و بزرگتری شکل می‌گیرد که این پدیده باعث افزایش مقاومت رزین پس از پخت می‌شود و مقدار رزین پخت شده را نیز افزایش می‌دهد. افزایش مقدار رزین پخت شده باعث

نیز در کمترین مقدار خود قرار داشت. از طرفی چون تراوایی مقدار تراوایی بسیار مهم می‌باشد باید مقادیر بهینه را به‌صورتی انتخاب نمود که بیشترین تراوایی ممکن ایجاد شود، مگر آنکه مقاومت فشاری مغزه نسبت به نمونه‌های دیگر بیش از حد کاهش پیدا کند. با کاهش مقدار سخت‌کننده از ۲٪ به ۱٪، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرد و در عین حال تراوایی نمونه مغزه نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت. با کاهش مقدار سخت‌کننده از ۱ به ۰/۵٪ مقدار مقاومت فشاری نمونه مغزه به مقدار اندکی کاهش پیدا کرد ولی مقدار تراوایی با افزایش نسبتاً خوبی همراه بود. از آنجایی که اختلاف بین مقاومت فشاری نمونه‌های ۴ و ۵ بسیار اندک بوده و در حدود MPa ۰/۲۲ می‌باشد و از طرفی اختلاف تراوایی بین این دو نمونه تقریباً بالا و در حدود ۱۱۶ mD می‌باشد، می‌توان به این نتیجه رسید که انتخاب مناسب از نظر مقدار هاردنر نمونه شماره ۵ می‌باشد. ذکر این نکته نیز ضروری است که تعیین دقیق مقدار بهینه سخت‌کننده بستگی به مقاومت نهایی مورد انتظار و همین‌طور مقدار تراوایی باقی‌مانده دارد و از طرفی در کنار ملاحظات فنی باید از نظر اقتصادی نیز توجه‌کننده باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است با افزایش مقدار سخت‌کننده از ۰/۵٪ (مغزه شماره ۵) به ۲٪ (مغزه شماره ۱) مقدار مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده نمونه مغزه افزایش می‌یابد. همان‌طور که گفته شده بود افزایش مقدار سخت‌کننده باعث افزایش سازوکار پخت رزین شده و مقدار رزین نهایی پخت شده پس از مدت زمان معین افزایش پیدا و هرچه این مقدار افزایش یابد مقدار مقاومت فشاری نمونه مغزه‌های حاصل شده افزایش می‌یابد.

یکی از نکته‌های مهم در تحکیم شیمیایی به کمک رزین‌ها انتخاب مقدار بهینه سخت‌کننده می‌باشد. مقدار بهینه سخت‌کننده باید به گونه‌ای باشد که مقدار تراوایی و مقاومت فشاری نمونه مغزه‌ها بیش از حد کاهش پیدا نکند و در اندازه قابل قبول باشد. در واقع باید به این نکته توجه نمود که نمی‌توان مقدار سخت‌کننده را در راستای افزایش مقاومت فشاری به مقدار زیادی افزایش داد زیرا افزایش مقدار سخت‌کننده باعث کاهش تراوایی می‌شود. شکل ۱۲ مقادیر مقاومت فشاری و تراوایی نمونه مغزه را در مقادیر متغیر سخت‌کننده نشان می‌دهد. درحالی‌که مقدار سخت‌کننده ۲٪ می‌باشد، مقاومت فشاری حداکثر و مقدار تراوایی



شکل ۱۲ مقایسه مقدار تراوایی و مقاومت فشاری نمونه با تغییر مقدار درصد سخت‌کننده

نتیجه‌گیری

۱) یافته‌های آزمایشگاهی نشان دادند که سیستم رزین مورد استفاده توانایی خوبی در ایجاد مقاومت فشاری نمونه ماسه سازندی دارد.

۲) نتیجه‌ها بیانگر آن بودند که با افزایش مقدار رزین مقاومت فشاری نهایی مغزه تشکیل شده افزایش و مقدار تراوایی مطلق نهایی آن نیز کاهش می‌یابد.

۳) به‌کارگیری سخت‌کننده باعث افزایش سازوکار پخت رزین شده و بر عملکرد آن تاثیر مثبت دارد و افزایش مقدار آن منجر به افزایش مقاومت فشاری و کاهش تراوایی می‌شود.

۴) جهت به‌کارگیری سخت‌کننده، مقداری بهینه وجود دارد که در مقادیر بیشتر و یا کمتر از آن بر روی کیفیت پخت رزین اثر گذار بوده و باعث

کاهش تراوایی و یا کاهش مقاومت فشاری ایجاد شده می‌شود.

۵) با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته و بررسی نمونه مغزه‌های تشکیل شده، مغزه شماره ۵ (۳۵٪ رزین و ۵٪ سخت‌کننده) با مقاومت فشاری MPa ۱/۵۷ و تراوایی ۷۱۶ mD نسبت دیگر مغزه‌ها از نتیجه بهتری نیز برخوردار بود.

۶) نتایج نشان دادند که رزین‌های پایه آبی نیز می‌توانند مانند رزین‌های پایه حلال باعث ایجاد استحکام در ذرات ماسه شوند و از طرفی بررسی اثر این نوع از رزین بر تراوایی نمونه‌ها نشان داد که افزایش مقدار رزین‌های پایه آبی همانند رزین‌های پایه حلال باعث کاهش تراوایی نمونه شده و مقاومت فشاری را نیز افزایش می‌دهد.

مراجع

- [1]. Kurawle, Mahalle N A, Kaul M, Nair A V, Kulkarni N J (2009) Silanol Resin consolidation system for deepwater completions and production optimisation, in 8th European Formation Damage Conference. OnePetro.
- [2]. Alakbari F S, Mohyaldinn M E, Muhsan A S, Hasan N, Ganat T (2020) Chemical sand consolidation: from polymers to nanoparticles, *Polymers*, 12, 5: 1069.
- [3]. Aggour M A, Abu Khamsin S A, Osman E S A (2007) A new method of sand control: the process and its first field implementation, in SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference, OnePetro.
- [4]. Ahad N A, Jami M, Tyson S (2020) A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 4: 1675-1688.
- [5]. Ikporo B, Sylvester O (2015) Effect of sand invasion on oil well production: a case study of Garon field in the Niger Delta, *The International Journal of Engineering and Science*, 4, 5: 64-72.
- [6]. Kotlar H K, Haavind F, Springer M, Bekkelund S S, Torsaeter O (2005) A new concept of chemical sand consolidation: from research idea to field application, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
- [7]. Harrisberger W, Coulter A, Gurley D (1971) Application of recent advances in the mechanics of sand consolidation, in Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME.
- [8]. Nguyen P D, Rickman R D (2009) Methods of enhancing uniform placement of a resin in a subterranean formation, Google Patents.
- [9]. Spain H (1962) Sand Consolidation with Base-catalyzed Plastic. in *Drilling and Production Practice*, OnePetro.
- [10]. Mahmud H B, Leong V H, Leštarić Y (2020) Sand production: A smart control framework for risk mitigation. *Petroleum*, 6, 1: 1-13.
- [11]. Treybig D, Saini R, Vigderman L, Smith K, Gray B, Strobel J (2016) Consolidating sand with new generation zeta potential altering systems, in SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, OnePetro.
- [12]. Ehteramian M, Ghasemi I, Karrabi M, Azizi H (2013) Shape-memory polymers containing nanoparticles: recent advances, *Basparesh*, 3, 2: 59-68.
- [13]. Larsen T, Lioliou M G, Josang L O, Ostvold T (2006) Quasi natural consolidation of poorly consolidated oil field reservoirs, in SPE International Oilfield Scale Symposium, OnePetro.
- [14]. Villesca J, Loboguerrero S, Gracia J, Hansford A, Nguyen P D, Rickman R D, Dušterhoft R G (2010) Development and field applications of an aqueous-based consolidation system for remediation of solids production, in Offshore technology conference, OnePetro.

- [15]. Mendez A, Johnson D, Kakadjian S (2011) Use of zeta potential to maximize sand free rate: a new approach on sand control, in Brasil Offshore, OnePetro.
- [16]. Mishra S, Ojha K (2016) Nanoparticle induced chemical system for consolidating loosely bound sand formations in oil fields, Journal of Petroleum Science and Engineering, 147: 15-23.
- [17]. Kalgaonkar R, Chang F (2017) Self-assembling nanoparticles: a unique method for downhole sand consolidation, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
- [18]. Shakiba M, Khomehchi E, Fahimifar A, Dabir B (2020) A mechanistic study of smart water injection in the presence of nanoparticles for sand production control in unconsolidated sandstone reservoirs, Journal of Molecular Liquids, 319: 114210.
- [۱۹]. رجبی م، هاشمی ش، صالحی ع (۲۰۲۰) غربال‌گری روش‌های مهار ماسه برای یکی از چاه‌های جنوب غرب ایران با استفاده از الگوریتم تاپسیس. پژوهش نفت، ۳۰، ۹۹-۴: ۱۱۷-۱۰۵.
- [20]. Scheidegger A E (2020) The physics of flow through porous media, in The Physics of Flow Through Porous Media (3rd Edition), University of Toronto press.
- [21]. Turk N, Dearman W (1986) A correction equation on the influence of length-to diameter ratio on the uniaxial compressive strength of rocks, Engineering Geology, 22, 3: 293-300.



Providing a Laboratory Method to Control Sand Production by Creating Compressive Strength and Minimizing the Permeability of Sand Formation

Ehsan Khamsehchi^{*1}, Amir Mirzayi¹, Mahmoud Akbari¹ and Reza Doosti²

1. Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Mahshahr Campus, Amirkabir University of Technology, Mahshahr, Iran

khamsehchi@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4770.3141

Received: April/03/2022

Accepted: April/25/2022

Introduction

Hundreds of oil and gas fields around the world are affected by the problem of sand production, and millions of dollars are also spent every year to predict and control sand production maintenance wells and facilities. Researches have shown that approximately 70% of the world's oil production comes from unconsolidated reservoirs [1]. In unconsolidated reservoirs, when the fluid flows through the porous medium, the sand particles are separated from the reservoir rock, and they move along with the fluid. As a result, this phenomenon leads to the production of sand along with the production fluid [2]. The sand production can cause erosion of the tubing, surface, subsurface facilities, as well as block the production of fluid flow [3].

Sand control methods include chemical consolidation method, mechanical sand control methods, and combination of mechanical and chemical methods [4]. Due to the challenges which are caused by the mechanical method (costly and time-consuming), nowadays, the method that is being developed and used is chemical consolidation methods [5]. In such method, by injecting chemicals into the formation, this approach consolidates the formation around the wellbore. These chemicals act like glue and prevent the movement of sand grains [6], but filling a part of pore throat decreases permeability of formation [7]. Generally, chemical methods can be divided into two groups: 1) sand consolidation (injection

of consolidating fluid) [8], 2) sand agglomeration (reducing electrostatic charge) [9].

In this study, the sand sample was mixed with different percentages of resin and hardener, the cross-link agent, which is suitable for improving resin, and, after the process of curing—the stage where all cross-links between polymer chains are established and polymer networks are formed and the polymer system turns into solid state—suitable cores were cut to measure different properties. Each of the cores was tested for two important characteristics: absolute permeability and compressive strength.

Materials

The samples of sand, formation water, and oil used in this study were prepared from Ahvaz oil field in Khuzestan province located in the southwest of Iran. After checking the properties of oil and formation water, the API grade of oil was reported as 29.5, and the pH and salinity of formation water were reported as 5.2 and 180000 ppm, respectively. X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) tests were also used to better identify the type of sand formation. According to the XRD test, the phases in the sand sample include quartz, halite, anhydrite, and albite minerals, which quartz makes up more than 90% of the sand formation.

The resin used in this research to consolidate the sand is water-based resin, and it is produced by a solution polymerization method during an endothermic process

in the laboratory environment, and its specifications are given in [Table 1](#).

Sand Consolidation Procedure

At first, the sand sample was soaked with formation water and oil for 60 minutes, and, then, it was taken out to dry the such samples. After the impregnation stage, the sand sample impregnated with formation fluid was mixed with specific amounts of resin and hardener. The amount of resin was determined based on the weight of sand, 15, 25, and 35% of the weight

Table 1 Specifications of the resin used for sand consolidation.

| Properties | Solid content(%) | Viscosity(cP) | Color |
|------------|------------------|---------------|-------|
| Proportion | 50 | 23 | Clear |

Table 2 Characteristics and size of the cores formed

| Core number | The amount of resin(%) | The amount of hardener(%) | Core length(mm) | Core diameter(mm) |
|-------------|------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|
| #1 | 35 | 2 | 74.59 | 38.33 |
| #2 | 25 | 2 | 86.49 | 38.12 |
| #3 | 15 | 2 | 82.01 | 38.70 |
| #4 | 35 | 1 | 83.77 | 37.87 |
| #5 | 35 | 0.5 | 72.53 | 38.70 |

Result and Discussion

In the topic of chemical consolidation with the use of polymeric materials such as resins, two parameters of compressive strength, and the amount of permeability is of great importance. The experiments carried out in this research were aimed at investigating the values of these two parameters, and—by changing the percentage of hardener as well as altering the amount of resin compared to the amount of sand sample—the values of compressive strength and permeability of the obtained cores were measured, which is discussed below.

The Effectiveness of Resin's Amount

According to the results made—by increasing the amount of resin in the system from 15% (core sample #3) to 35% (core sample #1)—the final strength of the obtained core, after curing the resin, increases. Such increase in compressive strength with an increase in the amount of resin can be justified by the fact that, with the increase in the amount of resin in the system, the volume of resin placed between the sand particles and filled the space between the particles has increased, and, after enough time at 90 °C, its curing is complete and creates strength between the particles. In fact, the resin between the sand particles becomes of great solidness after curing, and, by doing so, its strength increases. Therefore, the greater the volume of the resin in the space between the sand particles, the greater the final strength of the formed core sample. Another topic investigated in this research was the measurement of the permeability values of the

of sand was added to the sand, and it was tested with three different amounts of hardener: 0.5, 0.1, and 0.2%. A cylindrical steel mold was used to cure the sand sample in reservoir simulated temperature conditions (90 °C). Subsequently, the mold was placed with the consolidated sand sample for 15 hours to fully cure the resin in the mentioned temperature conditions, and, finally, the formed cores was tested in terms of compressive strength and absolute permeability. The size and characteristics of the cores obtained after the cutting process can be seen in [Table 2](#).

obtained core samples in different percentages of resin compared to the amount of the sand samples. Based on the permeability analysis performed on the core sample, with the increase of resin percentage from 15% (core sample #3) to 35% (core sample #1), the permeability of the core sample significantly decreases. The decrease in permeability by increasing the amount of resin in the system is due to the fact that the space between the sand particles is small, and, after the resin is placed in these spaces and cured, it causes to decrease the size of the spaces between the sand grains reducing permeability. In [Figure 1](#), the values of compressive strength and permeability of the core sample in different percentages of resin compared to sand formation are shown.

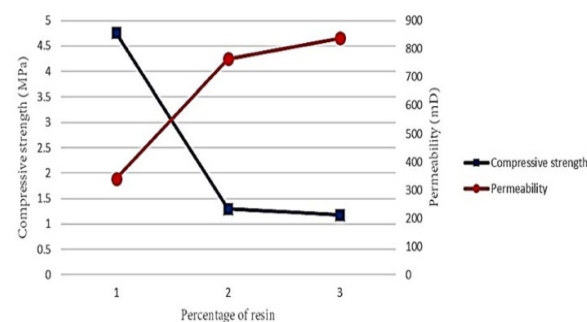


Fig. 1 Comparison of compressive strength and permeability values of core samples based on different percentage of resin.

The Effectiveness of Hardener's Amount

By reducing the amount of hardener from 2% (core sample #1) to 0.5% (core sample #5), the permeability

value has significantly increased. In fact, by increasing the amount of hardener, the amount of final cured resin increases and causes a decrease in permeability. In general, by adding hardener to the resin, polymer chains are formed and the curing process begins. Then, by increasing the amount of cross-link agent, more and bigger polymer chains are formed, increasing the strength of the resin after curing and rising the amount of cured resin. Increasing the amount of cured resin causes the spaces between the sand particles to be blocked or reduced, as a result of which, the permeability of the sample decreases.

On the other hand, by increasing the amount of hardener from 0.5% (core sample #5) to 2% (core sample #1), the measured compressive strength of the core sample increases. As already mentioned, increasing the amount of hardener increases the curing mechanism of the resin, and the amount of the final cured resin increases after a certain period of time. As this value increases, the value of the compressive strength of the obtained cores increases.

In Figure 2, the values of compressive strength and permeability of core sample in varying amounts of hardener are shown. In the case where the amount of hardener is 2%, the compressive strength is the maximum and the permeability value is at its lowest value, and, by reducing the amount of hardener from 2% to 1%, the compressive strength is reduced, and, at the same time, the permeability of the core sample increased significantly. By reducing the amount of hardener from 1% to 0.5%, the compressive strength of the core sample decreased slightly, but the permeability value was accompanied by a relatively good increase. Since the difference between the compressive strength of samples #4 and #5 is very small and is around 0.22 MPa, and, on the other hand, the difference in permeability between these two samples is almost high, and it is around 116 mD, it can be concluded that the right choice in terms of the amount of hardener, the core sample is number #5.

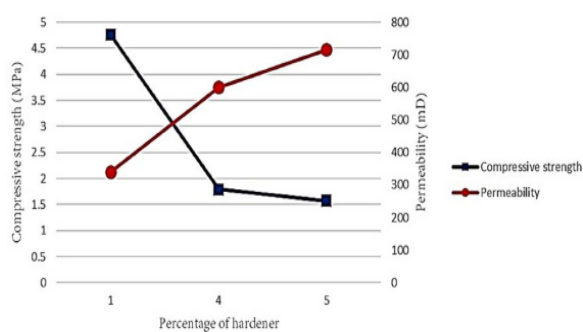


Fig. 2 Comparison of the permeability value and compressive strength of the sample with the change of the percentage of hardener.

Conclusions

1. Based on the laboratory data, the resin system used has a good ability to create the compressive strength of the formation sand sample.
2. The results showed that an increase in the amount of resin, the final compressive strength of the formed core increases, and its final absolute permeability also decreases.
3. The use of the hardener increases the curing mechanism of resin, and it has a positive effect on its performance, and increasing its amount leads to an increase in compressive strength and a decrease in permeability.

References

1. Alakbari F S, Mohyaldinn M E, Muhsan A S, Hasan N, Ganat T (2020), Chemical sand consolidation: from polymers to nanoparticles, *Polymers*, 12, 5: 1069.
2. Aggour M A, Abu Khamsin S A, Osman E S A (2007) A New method of Sand Control: The Process and its first field implementation, in SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference, OnePetro.
3. Ahad N A, Jami M Tyson S (2020) A review of experimental studies on sand screen selection for unconsolidated sandstone reservoirs, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 4: 1675-1688.
4. Ikporo B and, O Sylvester. (2015), Effect of sand invasion on oil well production: a case study of Garon field in the Niger Delta, *The International Journal of Engineering and Science*, 4, 5: 64-72.
5. Kotlar H K, Haavind F, Springer M, Bekkelund S S, Torsæter O (2005) A new concept of chemical sand consolidation: from research idea to field application, in SPE annual technical conference and exhibition, OnePetro.
6. Nguyen P D and, Rickman R D (2009) Methods of enhancing uniform placement of a resin in a subterranean formation, Google Patents.
7. Spain H (1962) Sand consolidation with base-catalyzed plastic, in *Drilling and Production Practice*, OnePetro.
8. Mahmud H B, Leong V H, Lestariono Y (2020) Sand production: a smart control framework for risk mitigation, *Petroleum*, 6, 1: 1-13.
9. Treybig D S, Saini R, Vigderman L, Smith K, Gray B and, Strobel J (2016) Consolidating sand with new generation zeta potential altering systems, in SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, OnePetro.