

نقش نانوذرات مختلف در ارتقاء خواص سیمان مورد استفاده در سیمان کاری چاه های نفت و گاز

عباس هاشمی زاده^{۱*}، مهدی صدیقی^۲، فرهود نوایی^۱

۱- گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

خلاصه

سیمان کاری لوله های جداری از مهمترین قسمت های حفاری چاه های نفت و گاز به شمار می رود. امروزه با توجه به افزایش عمق چاه های نفت و گاز نیاز به استفاده از انواع افزودنی های متنوع سیمان بر حسب عمق و دمای چاه می باشد. این افزودنی ها با اهداف مختلفی از جمله مدیریت زمان بندش سیمان، کنترل مهاجرت و نفوذ گاز، افزایش استحکام سیمان و غیره به کار میروند. در این مطالعه نقش نانو سیلیکا، نانوگرافیت ها، نانوذئوپلیمرها و نانوسلولزها بر ارتقاء خواص مختلف سیمان مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. آزمایش ها نشان می دهند که افزودن مقادیر بسیار کم از نانوذرات مذکور باعث بهبود بسیار زیادی در خواص مطلوب سیمان حفاری گردیده و کاهش هزینه های عملیات را به دنبال دارد.

کلمات کلیدی: سیمان حفاری، چاه های نفت و گاز، نانو ذرات، استحکام سیمان، بندش سیمان، نفوذ گاز در سیمان.

۱. مقدمه

در عملیات حفاری یک چاه نفت و گاز لازم است که حفره ایجاد شده توسط مته، لوله گذاری و سپس سیمان کاری شود. دوغاب سیمان پس از بسته شدن مانند یک غلاف محکم لوله ها را دربر می گیرد و به سازند پیوند می دهد. عدم توفیق در عملیات سیمان کاری تأثیر زیادی بر موفقیت حفاری، عمر چاه، مقدار تولید و مدت بهره دهی چاه می گذارد [1].

سیمان چاه نفت نوعی از سیمان پرتلند است که دارای ویژگی های خاصی می باشد که تحت تاثیر شرایط مصرف و نوع کاربری این سیمان در اعماق چاه قرار می گیرد. با توجه به اینکه همراه با افزایش عمق چاه، دما و فشار هیدرواستاتیک افزایش می یابد، لذا سنگ سیمان حاصل از دوغاب باید دارای مقاومت فشاری بالایی باشد تا بتواند با تحمل فشار سازند به وظیفه اصلی خود که محافظت از لوله های جداری است عمل نماید [2].

دوغاب سیمانی که پشت لوله جداری را پر می کند با گذشت زمان و معمولاً پس از چند ساعت یا چند روز می بندد و سخت می شود و سنگ سیمان پیوند بین لوله های جداری و سازند را برقرار می کند. دما و فشار بالا می تواند دوغاب سیمان را در میانه عملیات سیمان کاری به قدری سفت کند که پمپاژ دوغاب غیر ممکن شود. بنابراین زمان بندش دوغاب

* Corresponding author: عضو هیات علمی گروه مهندسی نفت

Email: a.hashemizadeh@hsu.ac.ir

سیمان چاه نفت باید قابل کنترل باشد. این مساله در سیمان کاری چاه نفت اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد و عدم توجه به آن به تحمل هزینه‌های بسیار و حتی از دست دادن چاه می‌انجامد [3].

مهاجرت گاز و سیالات سازند به درون ستون سیمان یکی دیگر از مشکلات متداول و در عین حال پر هزینه چاه‌های گاز و بعضی چاه‌های نفتی است که می‌تواند پیامدهای زیانباری را به دنبال داشته باشد. مهاجرت گاز از داخل دوغاب سیمان به صورت ایجاد کانال بیشتر در هنگام مرحله تبدیل دوغاب سیمان از حالت مایع به جامد رخ می‌دهد. مهمترین عاملی که از ورود گاز به داخل دوغاب سیمان جلوگیری می‌کند، فشار هیدرواستاتیکی دوغاب سیمان و گل حفاری بالای آن است. تا زمانی که این فشار بیشتر از فشار سازند باشد، گاز وارد ستون دیوار دوغاب سیمان نخواهد شد. عاوه بر چگالی پارامتر دیگری که می‌تواند بر فشار هیدرواستاتیکی ستون دوغاب سیمان اثر گذارد، حالت مقاومت ژله ای دوغاب سیمان است [4].

استفاده از نانوذرات مختلف می‌تواند مشکلات مذکور را رفع نماید. در این مطالعه نانو ذرات مختلف که به عنوان افزایه سیمان حفاری استفاده میشوند مورد بررسی قرار گرفت. نانو سیلیکا، نانوگرافیت، نانو ژئوپلیمر و نانوسلولز در بهبود خواص سیمان نقش موثری ایفا میکنند که به تفصیل در این مقاله به آنها اشاره شده است.

۲. نانو سیلیکا

نانو سیلیکا یک ماده بسیار کاربردی و موثر است که از ذرات بسیار ریز سیلیس تشکیل شده است و به سیمان مورد استفاده در میادین نفت و گاز و مهندسی عمران و ساختمان به عنوان افزایه اضافه میشود. ذرات نانو سیلیکا تقریباً هزار مرتبه از میانگین اندازه ذرات سیمان کوچکتر است. این ذرات فضای خالی بین دانه های سیمان را پر می‌کند و بنابراین یک اثر پر کنندگی دارد در نتیجه باعث افزایش چگالی آن میشود. نانو سیلیکا به روشهای مختلفی بر روی دوغاب سیمان اثر میگذارد. از جمله این که باعث کاهش زمان بندش سیمان، کاهش هرزروی سیال، و افزایش استحکام تراکمی آن میشود [5].

۱.۲. اثر نانوسیلیکا بر زمان بندش و دمای هیدراسیون سیمان

زمان بندش سیمان عبارت است از مدت زمان پمپاژ سیمان و یا به عبارت دیگر مدت زمانی که پس از آن سیمان شروع به سفت شدن میکند. زمان بندش سیمان را می‌توان در آزمایشگاه اندازه گرفت. با کاهش دما، مدت زمان بندش سیمان افزایش پیدا میکند. اضافه کردن نانو سیلیکا به سیمان نیز موجب کاهش زمان بندش می‌شود [6].

گزارشها نشان می‌دهد که اضافه کردن تنها یک درصد نانو سیلیکا به سیمان، باعث کاهش ۸۰ درصدی زمان بندش می‌شود. افزایش درصد نانو سیلیکا به ۱.۵ درصد، باعث کاهش مجدد ۳۷ درصدی زمان بندش می‌شود که این مقدار درصد قابل ملاحظه ای می‌باشد. مکانیسمی که به کاهش زمان منجر می‌شود مربوط به افزایش سطح مقطع نانو سیلیکا است. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد واکنش شیمیایی بین سیمان و مولکولهای آب است که به آن هیدراسیون گفته می‌شود. وقتی سیمان با آب مخلوط می‌شود حرارت آزاد می‌کند که به عنوان حرارت هیدراسیون شناخته می‌شود. هر چقدر سرعت واکنش هیدراسیون دوغاب سیمان بیشتر باشد زمان بندش کمتر میشود. نانو سیلیکا سرعت واکنش هیدراسیون را سرعت می‌بخشد [7].

۲.۲. اثر نانوسیلیکا بر استحکام تراکمی سیمان

برای آزمایش استحکام تراکمی سیمان، فشار مورد نیاز برای خرد کردن یک قالب سیمان با هندسه مشخص تحت تراکم نامحدود و یک محور اندازه گیری می شود. دوغاب های سیمان در قالب های برنجی به اندازه ۲ اینچ مکعب بر اساس روش API و در شرایط دمای ساکن و فشار ته چاه در دستگاه سخت می گردند. مکعب های سخت شده سیمانی پس از گذراندن زمان معین برای تعیین استحکام با پرس خرد می گردند. سیمان سخت شده باید به اندازه استحکام داشته باشد تا لوله های جداری و مغزی را نگهدارد. معمولاً استحکامی تراکمی به میزان ۱۰۰ پام برای نگه داشتن لوله های جداری کافی بوده و برای ادامه حفاری معیار استحکام تراکمی ۵۰۰ پام در نظر گرفته می شود [8].

نانو سیلیکا می تواند چگالی دوغاب سیمان را افزایش دهد و خواص مکانیکی آن را بهبود بخشد. مشاهده شده است که با افزایش درصد وزنی نانو سیلیکا استحکام تراکمی دوغاب سیمان افزایش پیدا می کند. هرچند اگر نسبت نانو سیلیکا در دوغاب سیمان از حد معینی بیشتر شود منجر به کاهش استحکام تراکمی سیمان خواهد شد. گزارش ها نشان می دهد افزودن تنها یک درصد نانو سیلیکا به دوغاب سیمان باعث افزایش ۱۰۰ درصدی استحکام تراکمی آن میشود. بیشترین افزایش استحکام تراکمی در حضور یک درصد نانو سیلیکا گزارش شده است چرا که افزایش درصد نانو سیلیکا از یک به یک و نیم درصد باعث کاهش ۷ درصدی استحکام تراکمی در مقایسه با حضور یک درصد نانو سیلیکا را نشان می دهد [7].

۳.۲. اثر نانوسیلیکا بر هرزروی سیال

هرزروی سیال حین انجام عملیات سیمان کاری می تواند بر عملکرد دوغاب سیمان تاثیر گذاشته و عملیات را با اختلال مواجه کند. به همین دلیل استفاده از افزایه های کنترل هرزروی به طور معمول در سیمان کاری استفاده می شود. استفاده از نانو سیلیکا با درصدهای مختلف نشان می دهد که با افزایش درصد نانو سیلیکا در دوغاب سیمان، میزان هرزروی سیال کاهش پیدا میکند. افزودن تنها یک درصد نانو سیلیکا به دوغاب سیمان باعث کاهش ۴۳٪ هرزروی می گردد. این در حالی است که افزودن بیشتر درصد نانو سیلیکا باعث کاهش هرزروی به مقدار کمی خواهد شد [7].

۳. نانوپلاکت های گرافیتی GNP

دما و فشار بسیار بالا در اعماق چاه های نفت و گاز گاهی اوقات منجر به ایجاد ترک های بسیار ریز در غلاف سیمان اطراف لوله جداری میشود. با توجه به اینکه ساختار هندسی گرافیت مسطح می باشد، می تواند به طور موثری باعث کاهش ایجاد و توسعه ترک ها شود. نانوپلاکتهای گرافیت از تعداد کمی صفحات گرافن تشکیل شده است که توسط پیوندهای ضعیف واندروالس به یکدیگر متصل شده اند. این نانوذرات در محیط های آبی تمایل به تجمع دارند در حالیکه برای افزایش کارایی نانو ذرات می بایست این ذرات به صورت یکنواخت در سیال بخش شوند. بنابراین یکی از چالشهای اساسی استفاده از این نوع نانوذرات به عنوان افزایه سیمان حفاری، روش هایی برای جلوگیری از تجمع آنها و پخش شدن آنها به صورت یکنواخت در سراسر دوغاب سیمان می باشد. به همین منظور در گام اول بهتر است اقدام به اصلاح سطح این نوع نانو ذرات نمود که این فرآیند به طور کلی دارای دو روش فیزیکی و شیمیایی میباشد. در واقع این خاصیت حاصل از شکل هندسی آن با عکس حذف مسیرهای نفوذ در سیمان شده و کیفیت سیمان را به عنوان یک مانع عبور سیالات به شدت افزایش می دهد و در نهایت منجر به افزایش دوام و طول عمر غلاف سیمان می گردد. نانوپلاکت های گرافیتی که به روش شیمیایی و فیزیک اصلاح سطح شده اند، میتوانند خواص مکانیکی سیمان را بهبود دهند و به ترتیب موجب افزایش ۴۲٪ و

۲۴٪ استحکام تراکمی سیمان می‌شوند. بررسی رئولوژی دوغاب سیمان پس از افزایش این نانوذرات نیز نشان دهنده کاهش هرزروی است [9].

ویژگی دیگر این نوع نانوذرات که می‌تواند در بهبود عملیات سیمان کاری موثر واقع شود خاصیت هدایت حرارتی آنهاست. توزیع یکنواخت دما در غلاف سیمان باعث کاهش گرادیان دمایی می‌شود. این مسئله می‌تواند ترک های حاصل از اختلاف دما در سیمان را کاهش دهد [10].

۴. نانوذئوپلیمرها

اسید کاری به عنوان روش جهت انگیزش چاه در صنعت نفت به طور گسترده کاربرد دارد. امروزه در اسید کاری هم از اسیدهای معدنی و هم اسیدهای آلی استفاده می‌شود. اسیدهای معدنی مانند هیدروکلریک اسید و هیدروفلوریک اسید و اسیدهای آلی مانند فرمیک اسید و استیک اسید از مواردی هستند که در اسید کاری متداول است. اسید با تزریق به داخل سازند، سیلیکا، گل، شیل و فلدسپار را در خود حل و مسیر تولید نفت را تمیز میکند [11].

بنابراین یکی دیگر از ویژگی هایی که یک سیمان برای انجام عملیات سیمان کاری باید داشته باشد مقاومت در برابر واکنش با اسید های مختلف است. زیرا حین انجام عملیات اسید کاری سیمان پشت لوله جداری در تماس مستقیم با اسید قرار می‌گیرد و در صورت حل شدن سیمان در اسید، استحکام آن کاهش پیدا می‌کند. سیمان حاوی نانوذئوپلیمر، سیمانی است که حاوی ژئوپلیمر و نانومواد است. نانو مواد مورد استفاده شامل نانو سیلیکا است که خواص مکانیکی (استحکام تراکمی) را بهبود می بخشد و باعث افزایش دوام و مقاومت در برابر ترک می‌شود. ژئوپلیمر نیز یک آلومینوسیلیکات سیمان با کلیسیم پایین است که با طی فرآیند ژئوپلیمراسیون به روش شیمیایی با گروه آلکالینی فعال شده است. ژئوپلیمر از مواد زائده ساخته می‌شوند و این باعث می‌شود که ارزش افزوده بیشتری ایجاد کنند. همچنین این مواد دارای استحکام بیشتر بوده و در دما و فشار اتمسفر مقاومت بیشتری در برابر اسید از خود نشان می‌دهند [12].

پروفایل استحکام تراکمی سیمان قبل و پس از قرار گرفتن قالب سیمان به مدت ۲۴ ساعت در محلول اسید (حاوی ۱۲٪ وزنی هیدروکلریک اسید و ۳٪ وزنی هیدروفلوریک اسید) در دما و فشار بالا (۱۲۰ درجه سانتیگراد و ۴۰۰۰ پام) با استفاده از روش تحلیل آلتراسونیک انجام شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که سیمان خالص (بدون افزایه) قبل و بعد از قرار گرفتن در اسید به ترتیب دارای ۱۹۷۵ و ۱۴۲۱ پام استحکام تراکمی می‌باشد. سیمان از نوع ژئوپلیمر قبل و بعد از قرار گرفتن در اسید دارای استحکام تراکمی ۱۵۳۲ و ۱۵۰۵ پام است. این در حالی است که با افزودن فقط یک درصد نانو سیلیکا استحکام تراکمی قبل و بعد از قرار گرفتن در اسید به ترتیب به ۴۶۵۵ و ۴۳۶۶ پام افزایش پیدا میکند. البته افزودن ۳ درصد نانو سیلیکا به پلیمر، افزایش استحکام تراکمی کمتری نشان می‌دهد. که این مسئله بیانگر این واقعیت است که این میزان، بیشتر از مقدار بهینه نانو سیلیکا است [12].

۵. نانوسلولزها

از آنجا که می‌توان نانو سلولز ها را به طور وسیع تولید نمود، هزینه آنها پایین بوده و منابع آن ها به وفور در دسترس هستند استفاده از آنها در حال گسترش است. نانوسلولز در عملیات سیمان کاری برای افزایش خواص سیمان از جمله رئولوژی، دوام، درجه هیدراسیون، تنش تسلیم و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد و گزینه مناسبی برای افزایش پایداری سیمان است. نانو فیبر های سلولزی روی خواص مکانیکی سیمان موثر هستند و افزایش ۴۰ درصدی استحکام آن گزارش شده است. همچنین می‌توان برای مدیریت زمان بندش سیمان از نانو سلولز های مختلف استفاده کرد. آزمایش دیگر نشان



می دهد که تنها افزودن ۰.۱۵ درصد نانو فیبر سلولزی باعث افزایش ۲۰ درصد استحکام تراکمی سیمان می گردد. مطالعات آزمایشگاهی و نیز مدلسازی دیگر نیز نشان دهنده بهبود خواص رئولوژیکی از جمله تنش تسلیم و گرانروی دوغاب سیمان بر اثر افزودن نانوسلولزها می باشد [13].

۶. نتیجه گیری

سیمان کاری به طور تقریبی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد از کل هزینه های حفاری یک چاه را شامل میشود. این مبلغ با توجه به عمق چاه، اندازه چاه، نوع سیمان مورد استفاده، مقدار افزایه های سیمان و زمان انتظار بندش سیمان و همچنین برنامه لوله جداری متغیر است. هزینه حفاری یک حلقه چاه در خشکی (بر اساس گزارش های سال ۱۳۹۷) حدود ۲۰ میلیارد تومان برآورد می شود. این مبلغ برای حفاری چاه های دریایی به مراتب (تا ۳ برابر) بیشتر است. بنابراین بهینه سازی عملیات سیمان کاری نقش موثری بر کاهش هزینه های حفاری دارد. به همین منظور استفاده از نانوذرات مختلف برای دستیابی به این هدف مورد استفاده قرار می گیرند که برخی نتایج استفاده از آنها در سیمان حفاری عبارتند از:

- نانو سیلیکا استحکام تراکمی سیمان را افزایش می دهد، زمان بندش آن را کاهش می دهد، ایجاد کانال در بین سیمان را کم می کند و بدین ترتیب ریسک مهاجرت گاز در دمای بالا را کم می کند و هرزروی سیال در سیمان را می کاهد. بنابراین به صورت جدی استفاده از آن توصیه می شود زیرا منجر به کاهش زمان بندش سیمان شده و هزینه های کلی حفاری را کاهش می دهد. علاوه بر جنبه های اقتصادی، جایگزین بسیار مناسبی برای سیمان های عادی می باشد زیرا باعث افزایش یکپارچگی سیمان شده و ضمن افزایش پایداری دیواره چاه، ایمنی افراد را بیشتر فراهم می کند.
- نانوپلاکت های گرافیتی که به روش شیمیایی و فیزیک اصلاح سطح شده اند، میتوانند خواص مکانیکی سیمان را بهبود دهند و به ترتیب موجب افزایش ۴۲٪ و ۲۴٪ استحکام تراکمی سیمان می شوند. همچنین تا ۳۰٪ استحکام کششی آن را افزایش می دهند. بررسی رئولوژی دوغاب سیمان پس از افزایش این نانوذرات نیز نشان دهنده کاهش هرزروی است.
- آزمایش ها روی سیمان خالص، ژئوپلیمر خالص و نانوزئوپلیمر نشان میدهد که نانو سیلیکا ژئوپلیمر مقاومت بیشتری در برابر اسید دارد و هنگام اسید کاری چاه های نفت و گاز استحکام تراکمی خود را کمتر از دست می دهند.
- نانو سلولزها دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بسیار خوبی هستند. علاوه بر این، پایداری، تجزیه بیولوژیکی و سازگاری آنها با محیط زیست باعث می شود که انتخاب خوبی برای کاربرد در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز باشند. استفاده از نانو سلولزها در عملیات سیمان کاری چاه های نفت و گاز باعث بهبود خواص سیمان از جمله تنش تسلیم و سختی در برابر تنش های بیرونی شده است. همچنین خواص رئولوژیکی مکانیکی سیمان با استفاده از نانو سلولز بهبود پیدا کرده و پایداری آن در برابر مشکلات حفاری افزایش یافته است.

۸. مراجع

1. قجری ع، منوریان م، مجتهدی سم (۲۰۱۴) طراحی و ساخت یک نمونه دوغاب سیمان بهینه به منظور جلوگیری از پدیده مهاجرت گاز از طریق دوغاب سیمان چاه‌های گازی خانگیران. پژوهش نفت ۲۴:۱۴۸-۱۵۶. doi: 10.22078/pr.2014.363
2. حسنی ع، مجتهدی سج، مرتضوی سع (۲۰۱۴) بررسی تأثیر اندازه و سطح ویژه دانه‌های تشکیل دهنده سیمان بر روی خواص دوغاب و سنگ سیمان چاه‌های نفت و گاز. پژوهش نفت ۲۴:۶۳-۷۱. doi: 10.22078/pr.2014.408
3. نصیرزاده ز، جعفری ا (۲۰۱۸) بررسی و مطالعه کاربرد سدییم هگزا متا فسفات به عنوان افزایه کنترل کننده زمان بندش و پخ شدگی سیمان در چاه‌های نفت و گاز. ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ۱۳۹۷:۵۴-۶۱.
4. سلطانیان ح، عطایی م، خالو کاکائی ر، کاظمزاده عا. (۲۰۱۶) بررسی کارایی و اثر افزودنی مهار کننده مهاجرت گاز بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان حفاری در شرایط واقعی چاه. پژوهش نفت ۲۵:۳۰-۴۲. doi: 10.22078/pr.2016.594
5. Rai S, Tiwari S (2018) Nano Silica in Cement Hydration. Mater Today Proc 5:9196-9202. doi: 10.1016/J.MATPR.2017.10.044
6. پژوهنده ا (۲۰۱۴) روش‌های آزمایشگاهی آزمون سیمان کفی. ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ۱۳۹۳:۶۲-۶۸.
7. Thakkar A, Raval A, Chandra S, et al (2019) A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing. Petroleum
8. محمدی ص، انتظاری ا، بهفر ر (۲۰۱۱) بررسی آزمایشگاهی تأثیر دانه بندی ذرات در بهبود خواص سیمان چاه‌های نفت. ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ۱۳۹۰:۵۶-۶۲.
9. Tabatabaei M, Dahi Taleghani A, Alem N (2019) Economic Nano-Additive to Improve Cement Sealing Capability. SPE West. Reg. Meet.
10. Alkhamis M, Imqam A (2018) New Cement Formulations Utilizing Graphene Nano Platelets to Improve Cement Properties and Long-Term Reliability in Oil Wells. SPE Kingdom Saudi Arab. Annu. Tech. Symp. Exhib.
11. بصیر س، شهبازی خ (۲۰۱۷) روش‌های بهینه سازی و افزایش بازده اسیدکاری در مخازن هیدروکربنی. ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ۱۳۹۶:۶۰-۶۶.
12. Ridha S, Yerikania U (2015) New nano-geopolymer cement system improves wellbore integrity upon acidizing job: experimental findings. SPE/IATMI Asia Pacific Oil Gas Conf. Exhib.
13. Ramasamy J, Amanullah M (2019) Nanocellulose for oil and gas field drilling and cementing applications. J Pet Sci Eng 106292.