

## طراحی دوغاب سیمان فوق سبک در ناحیه مخزنی چاه‌های افقی با استفاده از فناوری نانو برای سیمان کاری آستری ۷ اینچ

امین احمدی\*، فاطمه امیری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان ■ مجتبی آبدیده، مناطق نفت خیز جنوب

### چکیده

طراحی دوغاب سیمان مناسب و سازگار با شرایط سازند یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر عملیات سیمان کاری است. عدم موفقیت در عملیات سیمان کاری هر ساله منجر به صدمات پرهزینه‌ای برای صنعت حفاری می‌شود. همچنین با توجه به اهمیت روزافزون چاه‌های افقی در افزایش بهره‌وری از مخازن نفتی و گازی بحث سیمان کاری این چاه‌ها و ایجاد جداسازی منطقه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق سعی می‌شود با توجه به اهمیت سیمان کاری چاه‌های افقی و مشکلات موجود در سیمان کاری این نوع چاه‌ها در ایران، ضمن بررسی فرمولاسیون به‌کار رفته در تعدادی از چاه‌های ایران و مشکلات پیش آمده در چاه‌های مذکور، با انجام مطالعات لازم روی عوامل موثر در طراحی سیمان کاری موفق و انجام آزمایشات مختلف روی فرمولاسیون‌های مختلف با استفاده از افزایش‌های موثر بر خواص دوغاب سیمان، بهترین فرمولاسیون متناسب با شرایط چاه‌های ایران که مرتفع‌کننده مشکلات موجود است، را ارائه کرد. بر پایه تجربیات میدانی و بررسی‌های آزمایشگاهی مهم‌ترین عامل در طراحی دوغاب سیمان افقی، افزایش پایداری دوغاب سیمان در برابر ته‌نشینی ذرات جامد و تشکیل آب آزاد است. با شکل‌گیری آب آزاد به علت وضعیت خاص هندسی چاه افقی، در بالای فضای حلقوی، کانالی از آب تشکیل خواهد شد که به شدت جداسازی منطقه‌ای را تحت تاثیر قرار خواهد داد. هدف از این تحقیق طراحی دوغاب سیمان بهینه - که دارای خواص رئولوژیکی، مقاومتی و پایداری بسیار مناسبی جهت استفاده در مقاطع افقی چاه‌های نفتی و گازی است - می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۸/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۱۱/۲۷

### واژگان کلیدی:

طراحی دوغاب سیمان، سیمان کاری چاه‌های افقی، فناوری نانو، افزایش‌های سیمان.

### مقدمه

امروزه نانو فناوری سبب ایجاد انقلابی در صنعت شده و به دلیل گستره وسیع این علم، صنعت سیمان را نیز مانند سایر صنایع تحت تاثیر خود قرار داده است. در این میان استفاده از علم نانو در عملیات سیمان کاری چاه‌های نفت و گاز، بازده و نیز هزینه عملیات را به میزان بسیار زیادی بهبود می‌بخشد زیرا سیمان کاری دقیق لوله‌های جداری در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیمان کاری چاه‌های نفت و گاز با مشکلات عدیده‌ای از جمله مقاومت تراکمی کم، دانسیته خیلی بالای سیمان، مهاجرت گاز و ایجاد کانال‌های مختلف مواجه است. برای حل مشکلات ذکر شده که در حین سیمان کاری چاه‌های نفت، تولید، حفاری سازند و ازدیاد برداشت ایجاد می‌شود، می‌توان از نانو ذرات مختلف از جمله نانو سیلیکا، نانو ذرات نیکل، نانو ذرات آلومینا، نانو مونتوریلونیت (نانو بنتونیت)، نانو تیوب‌های کربنی و دیگر نانو ذرات استفاده کرد. با اضافه کردن نانو سیلیکا، نانو ذرات نیکل و نانو ذرات آلومینا می‌توان مقاومت سیمان مورد استفاده در فرآیند را به‌طور فزاینده‌ای افزایش داد. نانو ذرات افزودنی به سیمان می‌تواند از نوع ترکیبات تشکیل دهنده خود سیمان (اکسید سیلیس، اکسید آهن و آلومینا) و یا از ترکیباتی دیگر (نانو تیوب کربنی) که در جهت ایجاد خواصی مشخص و معین در سیمان، کاربرد دارند، باشد. به دلیل نسبت بالای سطح به حجم نانو ذرات، از آنها می‌توان

برای افزایش فرآیند هیدراته شدن، افزایش مقاومت تراکمی و خمشی، کنترل هرزروی سیالات، کاهش احتمال فروپاشی لوله‌های جداری و پیوند بهتر سیمان با لوله جداری و سازند (که از مهاجرت گاز جلوگیری می‌کند) در سیمان کاری چاه‌های نفتی استفاده کرد. [۱]

جابه‌جایی گل در چاه‌های افقی با توجه به طبقه‌بندی حلقوی لایه‌های سیال که توسط اختلاف چگالی‌های زیاد به وجود آمده است، یک مسئله مشترک می‌باشد. از این رو معمولاً در صنعت، روش‌هایی مانند چرخش لوله جداری یا حرکت سیالات در اطراف فضای حلقوی را به کار می‌برند. در حالی که چنین روشی ممکن است موثر باشد، اما همیشه قابل اجرا و لازم نیست. چاه‌های افقی می‌توانند چالش‌های خاصی را برای عملیات سیمان کاری به وجود بیاورند. مدت زمان طولانی رسیدن سیمان به بخش‌های جانبی، بعضاً کانی‌های غیرمعمول و فشار و حرارت بالای محیط می‌تواند باعث شکست در طول عملیات و پس از عملیات سیمان کاری شود. در مرکز قرار دادن لوله جداری در چاه‌های جهت‌دار از اهمیت بالایی برخوردار است. هرچه محور چاه پیچیده‌تر باشد در مرکز قرار دادن لوله جداری مشکل‌تر است. نیروهای وارده بر یک لوله جداری عبارتند از: نیروی وزن و نیروهای خمشی به‌وجود آمده به‌واسطه منحنی چاه که سعی در خارج کردن لوله جداری از مرکز چاه دارند.

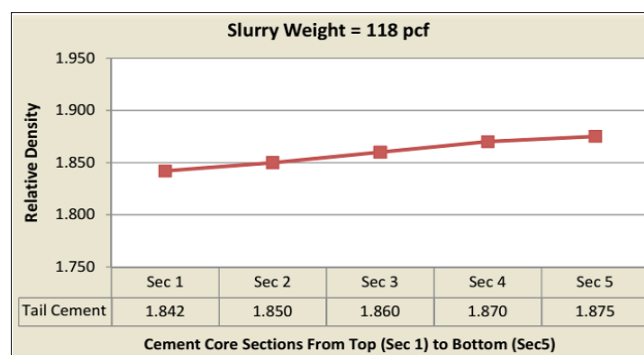
\* نویسنده عهددار مکاتبات (Ahmadi.amin68@yahoo.com)

خستگی و تراکم کم مورد نیاز است. به همین منظور تأثیر نانو سیم‌ها، نانو ذرات، ذرات انعطاف‌پذیر و افزودن ترکیبی این افزودنی‌ها در خواص کششی، مورد بحث قرار گرفته است.

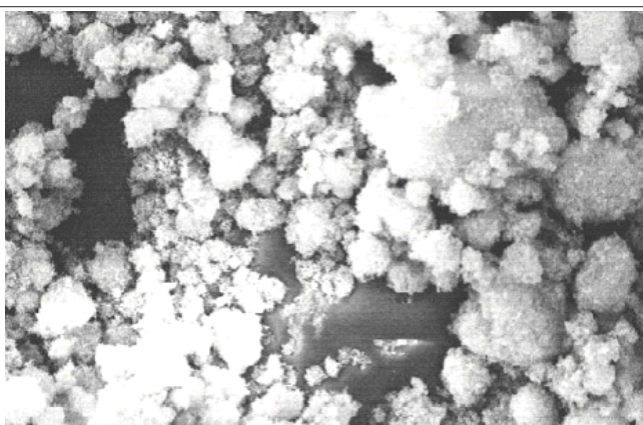
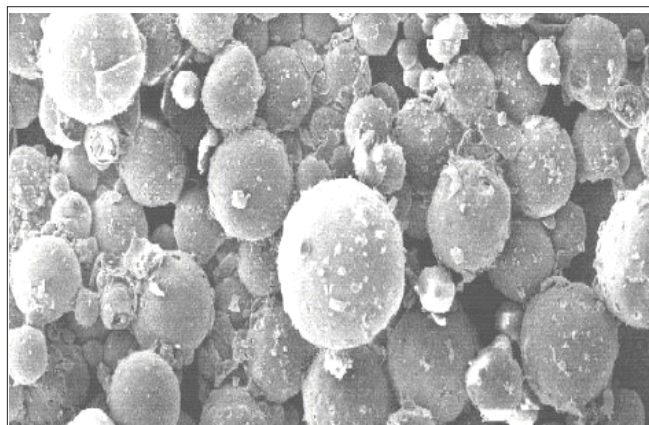
افزودن الیاف، یکی از رایج‌ترین و موثرترین روش‌ها برای بهبود رفتار کششی مواد سیمان است. تأثیرات ماکرو و میکروفیبرها بر کنترل رشد ترک در مواد سیمانی بر اساس چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته است. [۲-۳] تأثیر الیاف بر خواص مکانیکی سیمان عمدتاً به ابعاد فیبر بستگی دارد، زیرا شکست در واقع دارای مقیاس چندگانه است. میکروفیبرها (معمولاً به عنوان الیاف با قطر بیش از  $500 \mu\text{m}$  تعریف می‌شوند) می‌توانند با پل زدن به میکروکراک‌ها، بهبود فرآیند را افزایش دهند. با این حال، ترک‌ها در مواد سیمان مبتنی بر مقیاس نانو مقیاس است که میکروفیبرها موثر نیستند. در نتیجه، فیبرهای نانو مقیاس در سال‌های اخیر نظر پژوهشگران را جلب کرده است. [۴-۵] انبساط سیمان، حاوی مواد افزودنی برای انبساط، به عنوان یک راه‌حل برای بهبود کارایی بندش و جلوگیری از تشکیل میکرو بشکاف در چاه‌های نفتی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از نانو موادها برای کاربرد در انبساط بیشتر دوغاب سیمان همچنین مورد مطالعه قرار گرفته است. [۶-۷]

ویژگی‌های خاص در حفاری و تکمیل چاه‌های گازی شیل می‌تواند به یک‌سری چالش‌های فنی برسد؛ اولاً، در چاه‌های افقی طولانی (۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر) در سازندهای شیلی، نصب و متمرکز کردن لوله جداري بسیار دشوار است. دوماً، از آنجا که سازندهای شیلی با مشکلات در ثبات جانبی دیوار و حفاظت از مخزن شناخته می‌شوند، سیالات حفاری پایه نفتی عمدتاً در حفاری‌های شیل آرایه شده است. این سیالات پایه نفتی عمدتاً سبب ایجاد مشکل در چسبیدن سیمان به سازند می‌شود. مشکلات مربوط به حفاری چاه‌های افقی عمدتاً به تأثیر سیالات پایه نفتی در لایه‌های شیلی و همچنین متمرکز کردن رشته حفاری در چاه افقی و نصب انسدادکننده‌ها در مقاطع مختلف مرتبط است. میزان انحراف چاه باعث گیر افتادن پلاگ‌های سیمانی نیز می‌شود. از آنجا که چاه‌های افقی عمدتاً در لایه نفتی اعمال می‌شوند، حتماً از سیالات پایه نفتی استفاده خواهد شد و وجود زون نفتی نیز سبب بندش ضعیف‌تر

این نیروها می‌بایست به‌واسطه نیروهای وارده از طرف سنترالایزرها خنثی شوند. با طراحی مناسب می‌توان فاصله بهینه سنترالایزرها را تعیین کرد. قرار دادن تعداد زیاد سنترالایزر در یک رشته لوله جداري، راندن لوله جداري به چاه را با مشکل مواجه می‌کند و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. از طرفی تعداد کم سنترالایزرها، عدم در مرکز قرار گرفتن مناسب را باعث می‌شود، لذا می‌بایست با استفاده از روش‌های مناسب تعداد حداقل سنترالایزرها را محاسبه کرد. به کمک نانو ذرات می‌توان بر مشکلات ایجاد شده در حین سیمان کاری سنتی چاه‌های نفت و گاز غلبه کرد. همچنین نانو سیمان‌های حاوی نانو سیلیکا، نانو آلومینا و دیگر ذرات برای شرایط خاصی از جمله فرآیندهای ازدیاد برداشتی (از قبیل تزرق آب داغ، تزریق بخار آب و احتراق درجا) و یا چاه‌های ژئوترمال قابل استفاده می‌باشد. نانو سیلیکا، نانو تیوب‌های کربنی، نانو آلومینا و نانو ذرات نیکل اضافه شده به سیمان، مقاومت تراکمی را بیشتر از حالت‌های رایج افزایش می‌دهند. همچنین با اضافه کردن نانو مونت موریلونیت و نانو سیلیکا می‌توان نفوذپذیری و تخلخل را کاهش داد. کاهش تخلخل و نفوذپذیری سیمان، از مهاجرت سیالات ناخواسته مانند گاز و کانالی شدن سیمان جلوگیری می‌کند. با استفاده از نانو ذرات در سیال جداکننده می‌توان راندمان عملیات سیمان کاری را به علت بهبود تمیزسازی لوله‌های جداري افزایش داد. به‌منظور ایزوله‌سازی طولانی مدت یک زون، یک سیستم سیمان انعطاف‌پذیر با مقاومت بالا به



شکل ۲ | پایداری سنگ سیمان



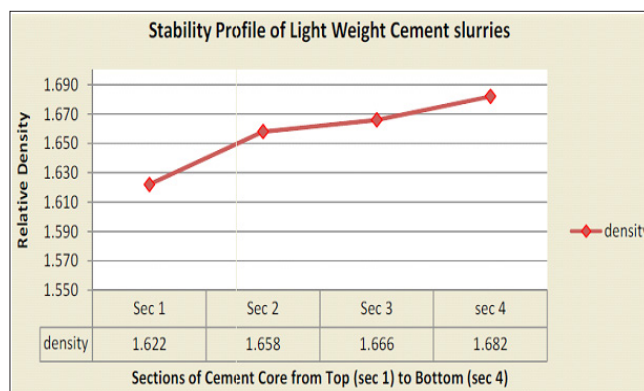
شکل ۱ | تصویر میکروسکوپ الکترونی افزایش HSL در مقیاس ۲۵۰ برابر و تصویر افزایش LW در مقیاس ۱۰۰ برابر [۱۱]

دانسیتته هستند. دوغاب‌های سبک با وزن کمتر از ۹۰ PCF که توسط افزودنی‌های آب‌خواه نظیر بنتونایت، پرلایت و غیره ساخته می‌شوند دارای تراوایی بالا، آب آزاد فراوان و مقاومت تراکمی پایینی هستند. لایتفیل به‌عنوان یک ماده سبک‌کننده فوق‌العاده سبک برای ساخت دوغاب‌هایی با وزن PCF ۹۰-۶۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد که علاوه بر عدم جدایش آب، هزینه منطقی و قابل قبولی برای سیمان کاری دارد.

با استفاده از این ماده می‌توان به مقاومت تراکمی بالا و تراوایی کم دست یافت. میکروبلاک یک افزودنی مایع چند منظوره است که از میکرو سیلیکای مخصوص و فرآوری شده تشکیل شده است. میکرو سیلیکا یک ترکیب معدنی کراهی آمورف یا غیربلوری بسیار نرم سیلیس (SiO<sub>2</sub>) است. سطح ویژه ۲۱ متر مربع بر گرم و ترکیب ۸۹ تا ۹۰ درصد سیلیس غیربلوری به میکرو بلاک خواص پوزولانی فوق‌العاده بالایی می‌دهد. میکرو سیلیکا با هیدروکسید کلسیم متصاد شده از هیدراتاسیون سیمان واکنش انجام داده و ایجاد بلورهای (H-S-C) هیدرات سیلیکات کلسیم می‌کند که باعث به هم پیوستن و سفت کردن سیمان و افزایش مقاومت فشاری سنگ سیمان می‌شود. سیلیس در میکرو بلاک به صورت آمورف یا غیربلوری است و به دلیل غیربلوری بودن آن برای سلامتی بدون خطر شناخته شده است. نانو ذرات افزودنی پودری شکل بوده و باعث ایجاد خواص بهبود یافته‌ای درون دوغاب سیمان می‌شود. ترکیب این ماده عمدتاً از سیلیس و به طور جزئی از اکسید آلومینیم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، اکسید آهن (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، اکسید تیتانی (TiO<sub>2</sub>) و کلرور هیدروژن (HCL) است. میکرو سیلیکای به کار رفته در این افزودنی مشتمل بر دانه‌های غیرمدور و بی‌شکل و کاملاً خالص است.

سیمان می‌شود. [۸-۹]

در سال‌های اخیر استفاده از مواد جامد سبک به صورت کره‌های توخالی با ترکیب آلومینوسیلیکاته رایج شده که با اسامی مختلف میکرواسفر، LW6, D124, Spherulite, Cemfile و غیره در صنعت استفاده می‌شوند. این مواد دارای اثرات قابل توجه در کاهش وزن دوغاب (محدوده زیر PCF ۹۰) و به‌عنوان افزودنی‌های سیمان بسیار سبک معرفی و مطرح شده‌اند. ماده سبک‌کننده LW6 دانه‌های سرامیکی یا کره‌های میکرونی آلومینوسیلیکاته با دانسیته پایین و وزن مخصوص ۰/۷ می‌باشد. این ماده برای طراحی و اختلاط دوغاب‌های سیمان از ۸/۵ PPG تا ۱۴ بدون استفاده از آب اضافی کاربرد دارد. لایتفیل یا D124 شامل کره‌های میکرونی است که برای ساخت دوغاب‌های با دانسیته خیلی کم به کار می‌روند. گازهای N<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> محبوس در دانه‌ها عامل کاهش



شکل ۳ نمودار پایداری سنگ سیمان بدون نانو ذرات

۱ فرمولاسیون دوغاب سیمان به همراه خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان با وزن ۱۱۸ pcf

فرمولاسیون دوغاب سیمان							
وزن سیمان pcf	آب Gal/SK	تاخیردهنده Lb/Sk	پراکنده‌کننده Lb/Sk	Fluid loss Lb/Sk	سیمان G LB		
۱۱۸	۶۰۷	۰.۱۶۵	۰.۳۳	۰.۴۴	۱۱۰		
خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان							
قبل از حرارت	Yp(lb/100ft <sup>2</sup> )	Pv(cp)	θ ۳۰۰	θ ۲۰۰	θ ۱۰۰	θ ۶	θ ۳
		۷۲	۷۶	۵۰	۲۶	۲	۱
بعد از حرارت	۱۳	۵۸	۹۸	۷۰	۴۰	۳	۱
خواص دوغاب سیمان با وزن ۱۱۸ pcf							
نفوذپذیری	میزان آب آزاد%	استحکام تراکمی (psi) P=3000psi T=194 F	زمان نیم‌بندش (min) T=158 F P=5000psi	Fluid loss (cc) P=1000psi T=158 F	قدرت ژلاتین ۱۰ min lb/100ft <sup>2</sup>	قدرت ژلاتین ۱۰ sec (lb/100ft <sup>2</sup> )	
۰.۰۶۲۹	۰	۲۶۴۰	۳۲۸	۵۰	۶۰۵	۳۰۵	

بسیار زیاد استحکام تراکمی سیمان را می‌توان به خاصیت پرکنندگی فضای بین دانه‌های سیمان به دلیل ریزبودن قطر دانه‌های HSL نسبت داد. بهبود پیوند ذرات: ذرات بسیار ریز HSL فضاهای بین دانه‌های سیمان را پر کرده و باعث جبران حجم منقبض شده در سیمان سفت شده، می‌شود. پایدار کننده دوغاب: به دلیل دانسیته بسیار پائین افزودنی HSL و انباشتگی ذرات در دوغاب، این افزودنی باعث تعلیق بهتر دیگر مواد سنگین‌تر موجود در دوغاب سبک وزن همانند LW می‌شود.

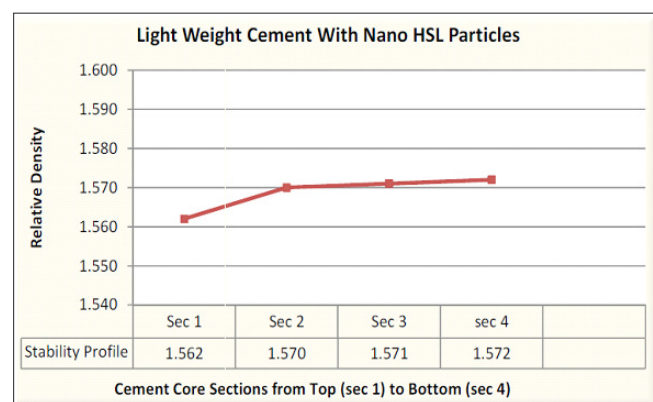
مقاوم در برابر خوردگی: ذرات بسیار ریز HSL فضاهای میانی بین دانه‌های بزرگ‌تر سیمان را اشغال کرده و در نتیجه ماتریکس متراکم به‌وجود می‌آید. سیمان سفت شده دارای نفوذپذیری پائین و در نتیجه دارای مقاومت بهتری در برابر خوردگی نسبت به فرمولاسیون سیمان بدون HSL است. [۳]

#### ۱- طراحی دوغاب سیمان چاه‌های افقی

جدیدترین فناوری ساخت دوغاب‌های سبک با نفوذپذیری کم، استفاده از دانه‌بندی غیر یکنواخت ذرات برای کاهش فضای خالی بین آنها است. فناوری سیمان سبک وزن جدید که بر مبنای افزایش نرمی و ریزی مواد افزودنی سبک‌کننده هیدروفوب و هیدروفیل بنا شده است با پرکردن فضاهای خالی در ساختار سیمان، ضمن کاهش نفوذپذیری سنگ سیمان سبب افزایش مقاومت تراکمی آن می‌شود. تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که دوغاب‌های سیمان دانه ریز در مقایسه با دوغاب‌های معمولی سبک با همان

این افزودنی دارای سطح ویژه بسیار زیاد (۱۲۲ متر مربع بر گرم) و محتوای سیلیس بسیار بالا (بیشتر از ۲۱ درصد) است. این دو عامل باعث می‌شود که افزودنی فوق‌خواص شگفت‌آوری به دوغاب سیمان بدهد که به آنها اشاره خواهد شد. میکرو سیلیس موجود در این افزودنی با هیدروکسید کلسیم حاصله از هیدراسیون سیمان واکنش داده و تشکیل ساختمان کریستالی کلسیم-سیلیکات-هیدرات را می‌دهد و در نتیجه آن، پیوند سیمان قوی و استحکام تراکمی مطلوبی حاصل می‌شود. افزودنی فوق، غیرسمی، معدنی و دارای پایه آبی است. از مزیت‌های HSL می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

استحکام تراکمی بالا: HSL استحکام تراکمی سیمان سفت شده را تا ۱۰۰ درصد بیش از سیمان‌های سفت شده بدون HSL افزایش می‌دهد. افزایش



۴ نمودار پایداری سنگ سیمان دارای نانو ذرات

#### ۲ فرمولاسیون دوغاب سیمان به همراه خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان با وزن ۱۱۸ pcf

##### فرمولاسیون دوغاب سیمان

وزن سیمان (pcf)	آب (Gal/SK)	تاخیردهنده Lb/Sk	پراکنده کننده Lb/Sk	Fluid loss Lb/Sk	D 124 (Lb/Sk)	سیمان G LB
۸۹	۸.۵۸	۰.۰۰۸	۰.۳۳	۰.۸۸	۲۷.۵۸	۱۱۰

##### خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان

قبل از حرارت	RPM	θ					Pv (cp)	Yp (lb/100ft <sup>2</sup> )
		۳	۶	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰		
۶	DIAL READING	۴	۸	۶۷	۱۲۸	۱۸۳	۱۷۷	
	DIAL READING	۲	۵	۶۵	۱۲۸	۱۸۳		
بعد از حرارت	میانگین	۳	۶.۵	۶۳	۱۲۸	۱۸۳	۱۶۰.۵	
	DIAL READING	۶	۱۱	۷۳	۱۳۱	۱۸۴		
	DIAL READING	۴	۷	۷۲	۱۲۹	۱۸۴		
	میانگین	۵	۹	۷۲.۵	۱۳۰	۱۸۴		

##### خواص دوغاب سیمان با وزن ۱۱۸ pcf

نفوذپذیری	میزان آب آزاد %	استحکام تراکمی (psi) P=3000psi T=194 F	زمان نیم‌بندش (min) T=158 F P=5000psi	Fluid loss (cc) P=1000psi T=158 F	قدرت ژلاتین ۱۰ min lb/100ft <sup>2</sup>	قدرت ژلاتین ۱۰ sec (lb/100ft <sup>2</sup> )
۰.۰۵۳۷	۰	۲۵۰۰	۲۸۳	۴۸	۱۰	۵

پر می‌شود، با تنظیم توزیع اندازه ذرات جامد در مخلوط خشک مقدار ذرات جامد در واحد حجم دوغاب افزایش می‌یابد که این افزایش منجر به افزایش مقاومت تراکمی و کاهش تخلخل و تراوایی می‌شود. ضریب انباشتگی حجمی ۷۹ نسبت مجموع حجم مطلق ذرات در مخلوط خشک بر حجم کلوجهای اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط خشک است و معرف خواص بهتر بندش سیمان و سنگ سیمان حاصله است. اندازه ذرات میکروبلاک استفاده شده در دوغاب سیمان در حدود ۰.۵۲ میکرومتر و تقریباً ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از ذرات سیمان است. همچنین قطر ذرات LW و HSL به ترتیب بین ۶۰ تا ۳۱۵ میکرون و ۰.۱ می‌باشند. بنابراین با استفاده از مادهای بسیار دانه ریز نظیر HSL می‌توان فضای بین دانه‌های سیمان، LW و میکروبلاک را پر کرد و میزان

چگالی، استحکام تراکمی زود هنگام و بالاتری را به دست می‌آورند. در فناوری مواد سبک‌کننده دانه ریز، با افزایش سطح ویژه دانه‌ها، آب بیشتری جهت اختلاط مورد نیاز است در نتیجه چگالی مخلوط کمتر شده و برای کاربردهای سیمان کاری اولیه سبک وزن، ایده‌آل هستند. با تنظیم توزیع ذرات جامد از نظر اندازه رئولوژی دوغاب به طور محسوسی بهبود می‌یابد می‌توان علت این امر را در روان‌سازی ذرات کوچک‌تر در لابه‌لای ذرات بزرگ‌تر دانست ضمن اینکه بر اساس این تئوری مخلوط شدن و پمپ شدن دوغاب نیز به خوبی انجام خواهد پذیرفت. از آنجا که بعضی از دوغاب‌های سیمان از نظر اندازه ذرات جامد تک سایز هستند، لذا ساختار آنها به صورت جعبه‌ای پر از فضای خالی بین ذرات جامد بوده که لاجرم فضای خالی بین ذرات توسط آب یا هوا

۳ فرمولاسیون دوغاب سیمان و نتایج رئولوژیکی دوغاب سیمان سبک‌دارای نانوذرات

فرمولاسیون دوغاب سیمان								
سیمان LB G	(Lb/Sk) D ۱۲۴	HSL (Gal/SK)	Lb/Sk Fluid loss	پراکنده‌کننده Lb/Sk	تاخیردهنده Lb/Sk	(Gal/SK) M.B	(Gal/SK) Gas block	آب (Gal/SK)
۱۱۰	۲۷.۵۸	۰.۹۲	۰.۵۵	۲.۲	۰.۵۵	۱.۹۸	۰.۷۹	۶.۶
خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان								
قبل از حرارت	RPM	θ ۳	θ ۶	θ ۱۰۰	θ ۲۰۰	θ ۳۰۰	Pv (cp)	Yp(lb/100ft <sup>2</sup> )
	DIAL READING	۴	۷	۴۹	۸۸	۱۳۵	۱۳۰.۵	۴.۵
	DIAL READING	۴	۶	۴۷	۸۸	۱۳۵		
بعد از حرارت	میانگین	۴	۶.۵	۴۸	۸۸	۱۳۵		۱۵
	DIAL READING	۱.۳	۲۱	۶۷	۱۲۲	۱۶۰	۱۴۵	
	DIAL READING	۳	۶	۶۰	۱۱۵	۱۶۰		
	میانگین	۹.۵	۱۳	۶۳	۱۱۸	۱۶۰		
خواص دوغاب سیمان با وزن ۱۱۸ pcf								
نفوذپذیری	میزان آب آزاد%	استحکام تراکمی (psi) P=3000psi T=194 F	زمان نیم‌بندش (min) T=158 F P=5000psi	Fluid loss (cc) P=1000psi T=158 F	قدرت ژلاتین ۱۰ min lb/100ft <sup>2</sup>	قدرت ژلاتین ۱۰ sec lb/100ft <sup>2</sup>		
۰.۰۲۱۱	۰	۱۹۷۰	۱۲۰	۲۸	۱۵	۴		

۴ فرمولاسیون دوغاب سیمان و نتایج رئولوژیکی دوغاب سیمان سبک‌دارای نانوذرات در دمای ۲۳۰ فارنهایت

فرمولاسیون دوغاب سیمان								
سیمان LB G	(Lb/Sk) D ۱۲۴	HSL (Gal/SK)	Lb/Sk Fluid loss	پراکنده‌کننده Lb/Sk	تاخیردهنده Lb/Sk	(Gal/SK) M.B	(Gal/SK) Gas block	آب (Gal/SK)
۱۱۰	۴۴	۵.۵	۲.۱۷	۰.۷۲	۰.۴۸	۱.۲	۲.۴	۶.۵
خواص دوغاب سیمان								
نفوذپذیری	میزان آب آزاد%	استحکام تراکمی (psi) P=3000psi T=194 F	زمان نیم‌بندش (min) T=158 F P=5000psi	Fluid loss (cc) P=1000psi T=158 F	قدرت ژلاتین ۱۰ min lb/100ft <sup>2</sup>	قدرت ژلاتین ۱۰ sec lb/100ft <sup>2</sup>	قبل از حرارت Yp (lb/100ft <sup>2</sup> )	بعد از حرارت Yp (lb/100ft <sup>2</sup> )
۰.۰۰۱	۰	۴۴۵۰	۱۶۰	۱۸	۳۵	۱۹	۱۴	۱۸

ذرات و دیگری استفاده همزمان از نانو ذرات HSL و میکروبلاک و D124 که بیانگر بهره‌گیری از فناوری نانو و توزیع دانه‌بندی ذرات است.

#### ۱-۱- طراحی دوغاب با وزن ۱۱۸ pcf

در جدول ۱ فرمولاسیون دوغاب سیمان و نتایج رئولوژیکی دوغاب در شرایط قبل و بعد از اعمال حرارت و همچنین نتایج پارامترهای آزمایشگاهی دوغاب طراحی شده، نشان داده می‌شود. بر اساس شکل ۲ مشخص است که میزان اختلاف دانسیته بین نمونه بالای ستون سیمان (sec1) و نمونه قاعده آن (sec5) بسیار ناچیز است.

#### ۱-۲- طراحی دوغاب با وزن ۹۰ pcf بدون نانو ذرات

در جدول ۲ فرمولاسیون دوغاب سیمان و نتایج رئولوژیکی دوغاب سیمان سبک بدون نانو ذرات را در شرایط قبل و بعد از اعمال حرارت نشان می‌دهد. همچنین نتایج پارامترهای آزمایشگاهی دوغاب طراحی شده، نشان داده شده‌اند. شکل ۲ نمودار پایداری سنگ سیمان سبک بدون نانو ذرات را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳ مشخص است که میزان اختلاف دانسیته بین نمونه بالای ستون سیمان (1sec) و نمونه قاعده آن (4sec) قابل قبول است.

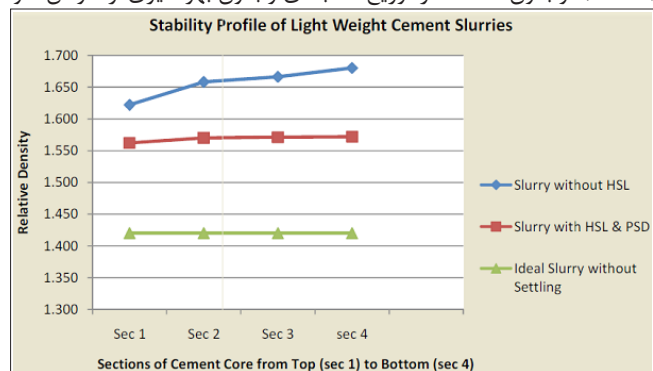
#### ۱-۳- طراحی دوغاب با وزن ۹۰ pcf همراه با نانو ذرات

جدول ۳ فرمولاسیون دوغاب سیمان و نتایج رئولوژیکی دوغاب سیمان سبک دارای نانو ذرات هیدروفوب در شرایط قبل و بعد از اعمال حرارت و همچنین نتایج پارامترهای آزمایشگاهی دوغاب طراحی شده، را نشان می‌دهد. در این فرمولاسیون از میکروبلاک جهت ایجاد توزیع دانه‌بندی و از پاراگاز جهت جلوگیری از نفوذ گاز به داخل ستون سیمان جهت استفاده در سازندهای گازدار (استفاده شده است).

#### ۱-۴- طراحی دوغاب با وزن ۹۰ pcf همراه با نانو ذرات در دمای ۰.۳۲ درجه فارنهایت

جهت به‌کارگیری دوغاب سیمان سبک در دماهای بالاتر متناسب با شرایط جاه‌های عمیق‌تر، دوغاب موجود در کشور با تغییراتی در فرمولاسیون دوغاب سیمان ارائه شده در جدول ۳ ارائه شده است. این دوغاب برای تراوایی کمتر و زمان بندش بیشتر طراحی شده است که در جدول ۴ مربوط به طراحی این دوغاب، دمای استاتیک ته چاهی برابر با ۲۳۰ درجه فارنهایت (۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای گردش سیال حفاری در ته چاه برابر با ۲۰۰ درجه فارنهایت (۹۳ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است. مشخص می‌شود که با مقایسه جدول ۴ و ۵ با طراحی جدید و به‌کارگیری توزیع متفاوت ذرات می‌توان نسبت جامد به آب را تغییر داد و از این طریق به بهبود مقاومت تراکمی سیمان و کاهش میزان تراوایی کمک کرد. همچنین زمان بندش دوغاب افزایش یافته و میزان افت صافی آن کمتر شده است.

تخلخل و نفوذپذیری سنگ سیمان حاصله را کاهش داد. با توجه به داده‌های موجود از میداین نفتی ایران شرایط آزمایشگاهی برای نمونه‌های طراحی شده در آزمایشگاه تعیین شده‌اند. میزان زاویه انحراف چاه‌های مورد مطالعه در ۸۹۷۱ درجه است. دمای استاتیک ته چاهی محدوده در محدوده ۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد (۱۵۸ تا ۱۹۴ درجه فارنهایت) و دمای گردش گل در ته چاه در محدوده ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد (۱۲۲ تا ۱۵۸ درجه فارنهایت) تعیین شد. علی‌رغم اینکه شرایط میدان موجود در این مطالعه در محدوده دمایی فوق است ولی جهت تطبیق با شرایط سایر میداین در ایران، محدوده دمایی ۲۳۰ درجه فارنهایت برای سیمان سبک (وزن ۹۰ pcf) و ۲۶۰ درجه فارنهایت برای سیمان استاندارد با وزن ۱۱۹ pcf در نظر گرفته شد. پس از تعیین دما، می‌بایست محدوده وزن دوغاب سیمان را تعیین کرد که با توجه به دوغاب‌های طراحی شده از سوی شرکت‌های سیمان کاری برای چاه‌های میداین مورد مطالعه، دو نوع دوغاب سیمان یکی با وزن ۱۱۸ و دیگری با وزن حدود ۹۰ پوند بر فوت مکعب جهت طراحی تعیین شدند. سیمان پایه، سیمان کلاس G ساخت کارخانه سیمان کرمان در نظر گرفته شد. از آنجایی که سیمان کلاس G سیمانی بدون افزایه است می‌تواند به‌عنوان پایه طراحی در نظر گرفته شود تا در طول آزمایش‌ها و در صورت لزوم متناسب با نیاز فرمولاسیون از افزایه‌های مناسب استفاده شود. در مورد سایر افزایه‌ها، از بهترین افزایه‌های مرسوم و مورد استفاده در چاه‌های ایران استفاده شد تا در حد امکان بهترین طراحی انجام شود. در طراحی دوغاب سیمان سبک وزن، دو حالت در نظر گرفته شد: یکی طراحی با استفاده از جامدات سبک‌کننده (D124) و بدون استفاده از توزیع دانه‌بندی و بدون بهره‌گیری از خواص نانو



۵. معنی پایداری دوغاب سیمان بدون HSL و دوغاب سیمان دارای HSL و توزیع دانه‌بندی PSD در هر دو نمونه دوغاب سیمان

ردیف	دوغاب	مقادیر نفوذپذیری نمونه‌های دوغاب سیمان
۱	۱۱۸	۰۶۲۹۰
۲	۹۰ بدون ذرات نانو	۰۶۲۹۰
۳	۹۰ با ذرات نانو	۰۶۲۹۰ در دمای ۱۹۴ درجه فارنهایت
		۰۱۰ در دمای ۲۳۰ درجه فارنهایت

## ۲- بحث و نتایج

دوغاب وجود دارد، را به حداقل ممکن برساند.

### ۳- نتیجه گیری

الف: با توجه به مقایسه میزان نفوذپذیری سه نوع سیمان طراحی شده، نشان می‌دهد که دوغاب سیمان ۲۲pcf با استفاده از ذرات نانو دارای نفوذپذیری کمتری بوده و این خاصیت می‌تواند در سازندهای دشوارگاز و با آب نمک که احتمال نفوذ در سنگ دوغاب وجود دارد، را به حداقل ممکن برساند.

ب: با بررسی نمودار مقاومت تراکمی دوغاب‌های سیمان سبک (وزن دوغاب برابر با ۹۰ pcf) معلوم می‌شود میزان مقاومت تراکمی آنها مقادیر بسیار قابل قبولی است. با توجه به اینکه در پوند بر فوت مکعب معمولاً میزان استحکام تراکمی چندان زیاد نیست، میزان مقاومت تراکمی حاصله را می‌توان مربوط به افزایش‌های نانو و افزایش‌های پایه، مانند میکروبلاک و سبک‌کننده‌های میکرو اسفیری دانست. ج: در هر دو نمونه سیمان سبک با PSD&HSL، دوغاب سیمان پس از ۸ ساعت شروع به توسعه مقاومت تراکمی کرده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت به حداکثر میزان استحکام خود دست می‌یابد. در نمونه شماره ۴ (RIPI4) دوغاب سیمان پس از ۶ ساعت شروع به سخت شدن، کرده و طی مدت ۴۰ دقیقه مقاومت آن به ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع رسیده است. این خاصیت سبب کاهش زمان انتظار برای شروع حفاری سیمان و کاهش احتمال نفوذ سیالات مهاجم مانند گاز و سایر سیالات خورنده به داخل ستون سیمان پشت لوله جداري و آستری می‌شود.

د: روند توسعه استحکام تراکمی در دوغاب دارای HSL بسیار سریع‌تر از دوغاب سبک معمولی است به گونه‌ای که در مدتی حدود ۲۵ تا ۴۰ دقیقه مقاومت تراکمی سیمان از ۵۰ به ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع رسیده است در حالی که این میزان در سیمان سبک معمولی حدود ۷۵ دقیقه است.

ه: طراحی دوغاب سیمان در دو گروه وزنی سبک و سنگین با در نظر گرفتن الزامات طراحی دوغاب سیمان چاه‌های افقی (پارامترهای رئولوژیکی، استحکامی و پایداری) موفقیت‌آمیز بوده است اما سیمان طراحی شده با وزن ۹۰ pcf همراه با توزیع دانه‌بندی ذرات (استفاده از ذرات نانو) دارای خواص بهتری نسبت به سایر دوغاب‌ها است. ■

نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده در مورد سه گروه دوغاب سیمان طراحی شده فوق را از همدیگر تفکیک کرده و به بررسی هر کدام به طور مجزا پرداخته می‌شود. مقادیر نقطه واروی در هر سه گروه دوغاب سیمان طراحی شده تقریباً مشابه یکدیگر است که این امر نویددهنده وجود پایداری در دوغاب‌های سیمان به‌خصوص دوغاب‌های سبک وزن است. با توجه به مطالعات موردی موجود، میزان نقطه واروی و مقاومت ژله‌ای ۱۲ دقیقه پیشنهاد شده جهت انجام جابه‌جایی موثر سیال حفاری به‌خصوص در قسمت پایینی دالیز لوله جداري بین ۴،۸ تا ۱۹،۲ پاسکال می‌باشد. در طراحی صورت گرفته در آزمایشگاه، هر سه گروه دوغاب سیمان از این نقطه‌نظر در شرایط مطلوبی قرار داشته‌اند. جهت بررسی پایداری دوغاب سیمان می‌بایست به نتایج سه آزمایش شامل میزان آب آزاد، پروفیل پایداری و میزان افت صافی دوغاب سیمان رجوع کرد. در دوغاب سنگین با وزن ۱۱۸ پوند بر فوت مکعب میزان افت صافی برابر با ۵۰ سی‌سی در ۳۰ دقیقه آزمایش است و میزان آب آزاد در جهت افقی برابر با صفر است. با بررسی منحنی پایداری مغزه سیمانی (شکل ۲) معلوم می‌شود که اختلاف دانسیته بین بخش بالایی نمونه با بخش قاعده آن فقط در حدود ۲ پوند بر فوت مکعب است که این مقدار مورد تایید بوده و پیش‌بینی انجام شده بر اساس نتایج رئولوژیکی را تایید می‌کند. در دوغاب سبک بدون نانو ذرات، میزان افت صافی برابر با ۴۸ سی‌سی و میزان آب آزاد افقی برابر با صفر است. در این دوغاب سیمان اختلاف بین دانسیته بخش بالایی نمونه با بخش قاعده آن (شکل ۲) در حدود ۳،۷ پوند بر فوت مکعب است. این امر تاییدکننده روندی است که بر اساس نتایج رئولوژیکی نسبت بین قرائت‌ها - که در قسمت قبل به آن اشاره شد - قابل پیش‌بینی بود. در دوغاب سبک دارای نانو ذرات، میزان افت صافی به ۲۸ سی‌سی کاهش پیدا کرد و همانند دو گروه دوغاب قبلی میزان آب آزاد برابر با صفر بود. با بهینه‌سازی ترکیب سیمان سبک برای دماهای بالاتر، میزان افت صافی در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد هم با کاهش مواجه بوده و به ۱۸ سی‌سی رسیده است. با توجه به شکل ۵ اختلاف دانسیته بین بخش بالایی نمونه با بخش قاعده آن فقط در حدود ۰،۱۲ پوند بر فوت مکعب می‌باشد. با توجه به مقایسه میزان نفوذپذیری سه نوع سیمان طراحی شده نشان می‌دهد که دوغاب سیمان ۹۰ pcf با استفاده از ذرات نانو دارای نفوذپذیری کمتری بوده و این خاصیت می‌تواند در سازندهای دشوارگاز و با آب نمک که احتمال نفوذ در سنگ

## منابع

- [1] H.F.W. Taylor, Cement Chemistry, Thomas Telford, London, 1997.
- [2] Kong, X. and Ohadi, M. 2010. Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry overview of the recent progress. Proc., Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, Abu Dhabi, UAE, 1-4 November.
- [3] Krishnamoorti, R., 2006. Extracting the benefits of nanotechnology for the oil industry. J. Petroleum Technol., 58(11): 24-26.
- [4] James, S.G. and Boukhelifa, L., 2008. Zonal Isolation Modeling and Measurements - Past Myths and Today's Realities. SPE Drill. Completion, 23(1): 68-75.
- [5] Li, G.Y., Wang, P.M. and Zhao, X., 2005. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. Carbon, 43(6): 1239-1245.
- [6] Z., Liu, J., Liu, J., Li, C. and Zhou, H., 2011. Silica modified PP fiber for improving crack-resistance of cementitious composites. Adv. Mater. Res., 332-334: 2058-2064.
- [7] Zhang, T. et al. 2011. Engineered Nanoparticles as Harsh-Condition Emulsion and Foam Stabilizers and as Novel Sensors. Proc., Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2-5 May.
- [8] Changqing Zhao, Bin Feng, Shibin Liu, Fankun Zeng, Chengyou Fan, Yonghong Leng Cementing practices in horizontal sections of shale gas wells in the Sichuan Basin Nat Gas Ind, 32 (9) (2012), pp. 61-65.
- [9] Jianfang Jiao, Yong Yao, Qiugui Shu Cementing technologies of high pressure shale gas well in Southwest Sichuan area Drill Prod Technol, 38 (3) (2015), pp. 19-21.
- [10] Pourmazaheri, Y., Soltanian, H., Application of Particle Size Distribution Engineering and Nano-technology to Cement Recipes for some Highly Deviated Wellbores in Iran, Journal of Petroleum Science and Technology 2015, 5(2), 70-83.