

طراحی نوین دوغاب‌های سیمان فوق سبک با استفاده از فناوری نانو برای سیمان کاری آستری ۷ اینچ مخزن آسماری ۱۶ حلقه چاه میدان مارون

پژوهش نفت

سال بیست و سوم
شماره ۷۶

صفحه، ۱۶۸-۱۷۸ ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۱۹

حمید سلطانیان

پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی نفت، گروه پژوهش حفاری و تکمیل چاه

soltanianh@ripi.ir

کاهش می‌دهد و دارای مقاومت تراکمی ۲۴ ساعته ۲۰۰۰ psi در دمای ۱۹۰ درجه فارنهایت، تخلخل ۳۶٪ و نفوذپذیری ۰/۰۱ میلی داری برای وزن ۳۴ PPG می‌باشد. همچنین خواص ویژه افزودنی‌های مهار مهاجرت گاز، که شامل انقباض حجمی کم و توسعه مقاومت فشاری سریع است توسط دوغاب‌های جدید به‌طور غیر مستقیم فراهم شده است.

واژه‌های کلیدی: افت صافی، سیمان سبک، مقاومت تراکمی، نانو ذرات، توزیع دانه‌بندی

مقدمه

امروزه تنها به‌کارگیری روش‌های بهینه برای راندن دوغاب به چاه‌های نفت کافی نبوده و برای جداسازی منطقه‌ای طبقات زمین در دراز مدت که در طول عمر چاه تأثیر زیادی دارد، لازم است از تکنولوژی جدید بهینه‌سازی ساخت و راندن دوغاب به‌طور هم‌زمان و هماهنگ استفاده شود.

چاه سیمان شده بدون نشستی می‌تواند هدایت درست سیال از مخزن به سطح را تأمین کند. بنابراین عملیات سیمان‌کاری، تعیین کننده طول عمر چاه بوده و نشان

چکیده

طراحی دوغاب سیمان سبک وزن با استفاده از فناوری نانو هیچ‌گونه سابقه‌ای در دنیا نداشته، لیکن در کشورهای صنعتی صاحب تکنولوژی با استفاده از کف، میکرواسفرها و تکنولوژی لایت کریت دوغاب‌های سبک وزنی طراحی شده‌اند که با دوغاب‌های سیمان سبک وزن طراحی شده پژوهشگاه صنعت نفت قابل مقایسه نمی‌باشند. دوغاب‌های سبک وزن طراحی شده با استفاده از فناوری فوق معیبه همچون خواص رئولوژیکی نامطلوب، مقاومت تراکمی بسیار پایین، تخلخل و نفوذپذیری بالایی می‌باشند، اما در این تحقیق با کمک نانو ذرات HSL، میکرو اسفر، سیمان کلاس G و با استفاده از روش توزیع دانه بندی ذرات، علاوه بر سبک سازی دوغاب‌های سیمان تا وزن ۶۲ پوند بر فوت مکعب، دوغاب‌های سبک وزن مختلف با خصوصیات مورد انتظار در شرایط واقعی چاه طراحی شده‌اند. در این روش محدوده‌هایی از اندازه‌های ذرات جامد به دقت انتخاب شده‌اند به طوری که با افزایش ذرات جامد غیر یکنواخت علاوه بر رفع معایب سیمان‌های سبک که به آن اشاره شده زمان انتظار برای رسیدن به حداقل مقاومت تراکمی ۵۰۰ psi جهت شروع مجدد عملیات حفاری (WOC) دوغاب سیمان را به مدت زمان حداکثر ۸ ساعت

سطح می‌شود. با به‌کارگیری افزودنی‌ها برای تنظیم خواص دوغاب، نهایتاً باید دوغاب سیمان در زمان مورد نظر ببندد و با افزایش مقاومت تراکمی اولیه، کمترین زمان انتظار در حفاری برای بستن صرف شود، تا حفار در کمترین زمان ممکن بتواند به حفاری ادامه دهد.

سیمان‌های سبک وزن، نقش مهمی در سیمان‌کاری اولیه ایفا می‌کنند. دلیل اصلی استفاده از این‌گونه سیمان‌ها، کاهش فشار هیدرواستاتیک سیمان در برابر سازندهای ضعیف و افت فشار مخزن می‌باشد. سیمان‌کاری‌های آستری‌های بعضی از مخازن ایران سال‌های زیادی به‌عنوان یک معضل مطرح بوده است. در این مخازن به علت افت فشار مخزن و بالا بودن وزن دوغاب، همواره هرزروی شدید بوده و برای مهار این پدیده ضروری است که وزن دوغاب سیمان تا حدود $62/4 \text{ lb/ft}^3$ تنزل یابد به همین دلیل تحقیقات گسترده‌ای بر روی مواد افزودنی سبک وزن که تاثیر منفی روی استحکام تراکمی نداشته باشد انجام شده است. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی اندازه ذرات منجر به دست‌یابی به یک ماده سبک‌کننده ریز HSL با نتایج استثنایی شده است. در سیستم جدید طراحی به منظور حصول نتایج مطلوب و ویژه علاوه بر نوع اندازه ذرات، عوامل دیگری نیز به شرح زیر حائز اهمیت است که عبارتند از:

- حجم آب
- نوع و طبیعت جامدات در ترکیب خشک
- افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده در طراحی

روش طراحی دوغاب فوق سبک

در روش‌های جدید طراحی دوغاب فوق سبک با تکنولوژی نانو ذرات، سیستمی مشابه سیستم تولید بتن برای ساخت دوغاب ایجاد می‌شود که ضمن به‌سازی سیمان‌کاری چاه، کیفیت بالای مقاومت تراکمی را نیز به دنبال خواهد داشت. با کنترل توزیع اندازه ذرات جامد، تنظیم گرانیوی دوغاب با استفاده از تنوع اندازه ذرات بهتر انجام می‌شود که این امر برای ساخت دوغاب‌هایی به سبکی $62/4 \text{ lb/ft}^3$ در چاه‌هایی با نرخ فشار پایین حائز اهمیت می‌باشد. از آنجا که بعضی از دوغاب‌های سیمان از نظر اندازه ذرات جامد تک سایز هستند، ساختار آنها به صورت جعبه‌ای پر از فضاهای خالی بین ذرات جامد می‌باشد. مشابه شکل ۱،

می‌دهد که چاه تا چه مدت می‌تواند مولد و بدون نیاز به تعمیر باقی بماند. علاوه بر مسأله ایمنی و کاهش هزینه، مسأله زیست محیطی مربوط به مواد شیمیایی نیز با سیمان کاری مرتبط است که حفاظت سفره آب‌ها در حین و پس از حفاری از آن جمله است [۱].

طی عملیات سیمان‌کاری، نگهداری و حفظ فشار فضای حلقوی بین فشار سازند و فشار شکست سازند با اهمیت و بحرانی می‌باشد. چنانچه فشار فضای حلقوی کمتر از فشار سازند شود، سیال داخل سازند به چاه وارد شده و نهایتاً باعث ایجاد فوران می‌شود. چنانچه فشار ستون دوغاب سیمان در فضای حلقوی از فشار سازند بیشتر شود، نشست و نفوذ سیال به داخل سازند صورت می‌گیرد که هم شکست سازند و هم آسیب به چاه را به دنبال دارد. ضمن اینکه مقدار زیادی سیال حفاری یا سیمان در اثر شکست سازند به داخل زمین هرز می‌رود.

اولین پارامتر مؤثر در فشار هیدرواستاتیک چاه در حفاری و سیمان‌کاری، وزن حجمی سیالات مورد استفاده است که سازندهای اطراف چاه در معرض تماس و تحت فشار آنها خواهد بود. دومین عامل، رئولوژی سیال در حین جانشینی است. متخصصین معتقدند که پارامتر وزن دوغاب را می‌توان در فازهای طراحی و اجرا کنترل نمود، اما مسأله کنترل رئولوژی واقعی دوغاب نسبت به کنترل وزن مشکل‌تر است.

نرم‌افزار CEMCADE و دیگر نرم‌افزارهای ارزیابی و شبیه‌سازی را می‌توان جهت طراحی سیمان‌کاری و تعیین پارامترهای طراحی استفاده نمود. در حین عملیات لازم است که پارامترهای طراحی در حد معقول و منطقی خطای مجاز نگه داشته شوند [۲].

ذرات جامد موجود در دوغاب سیمان، در هر دو وضعیت استاتیک و دینامیک باید در حالت پایداری بوده و از فاز مایع در حالت‌های مختلف سکون یا حرکت جدا نشوند. همچنین فاز مایع دوغاب نباید در حالتی که فشار هیدرواستاتیک سیال از سازند بیشتر است، از آن جدا شود. این جدایی باعث افزایش گرانیوی و نهایتاً جانشینی ناقص دوغاب و کاهش حجم ستون سیمان پشت لوله جداری شده و یا باعث ایجاد کانال‌ها در ستون سیمان و عامل مهاجرت گاز از اعماق به

طراحی نمود، در حالی که دوغاب‌های سبک وزن با روش‌های متداول نتایج نامناسبی به دنبال خواهد داشت. ابداع این تکنولوژی نوین، تولید دوغاب‌های سیمان با وزن ۸/۳۴ پوند بر گالن را فراهم کرده است. این سیمان‌ها از لحاظ جداسازی لایه‌ای، عملکردی شبیه دوغاب‌های سنتی با وزن ۱۵/۸ پوند بر گالن را دارد [۴].

روش طراحی که بر اساس به‌سازی اختلاط است، مبتنی بر حداکثر نمودن (PVF) اختلاط خشک می‌باشد. PVF به‌عنوان حجم فضای اشغال شده توسط ذرات جامد تقسیم بر حجم فله‌ای ذرات، هنگامی که اختلاط خشک در حالت حداکثر تراکم قرار دارد، تعریف می‌گردد.

$$PVF = \frac{\sum \text{absolute volumes}}{\sum \text{bulk volumes}} \quad (1)$$

PVF را می‌توان به‌صورت زیر ذیل نیز توصیف نمود:

$$PVF = 1 - \text{تخلخل اختلاط خشک} \quad (2)$$

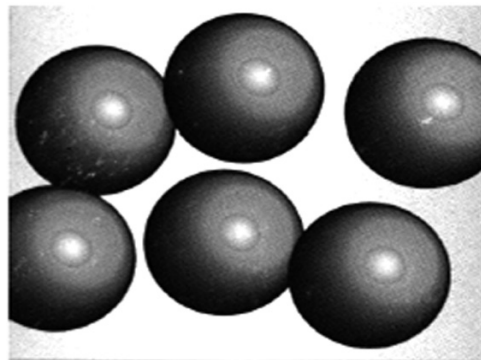
با تطابق اندازه ذرات، که به‌کمک استفاده از محصولات با کیفیت بالا امکان‌پذیر می‌گردد. می‌توان PVF را حداکثر نمود. جهت دستیابی به وزن مخصوص اختلاط و نهایتاً دوغاب با دانسیته موردنظر، ذرات مختلف با اندازه‌های درشت، متوسط و ریز انتخاب شد و مطابق با نسبت‌های حجمی مخصوص مخلوط گردید. ذرات ریز مابین ذرات متوسط قرار گرفته و ذرات متوسط بین ذرات درشت قرار می‌گیرند. از آنجا PVF مستقیماً با حداقل مقدار آب موردنیاز جهت مخلوط نمودن دوغاب در ارتباط است، لذا PVF نشان‌گر کیفیت اختلاط می‌باشد [۵و۴].

مدل دانه‌بندی مناسب

فرآوری سیمان‌های سنتی به‌گونه‌ای است که بیشتر ذرات کروی و هم‌اندازه بوده و یا دارای سایز نزدیک به هم هستند که این امر باعث ایجاد تخلخل قابل ملاحظه در بین آنها می‌شود. فضای خالی موجود بین ذرات باعث بروز مشکلاتی نظیر نفوذپذیری و مهاجرت گاز در سیمان سفت شده می‌گردد.

طبق مدل فرضی، اگر میزان دانه‌بندی را حداقل ۳ دسته در نظر بگیریم و به صورت تصادفی کنار هم قرار دهیم، این روزنه‌ها در کنار هم به صورت شش و جهی‌هایی خواهند

در یک دوغاب واقعی فضای خالی بین ذرات جامد توسط آب یا هوا پر می‌شود. در سیستم توزیع ذرات دوغاب، محدوده‌ای از اندازه‌های ذرات به دقت انتخاب می‌شوند. با افزایش ذرات جامد در دوغاب با سایزهای متفاوت، تخلخل و نفوذپذیری کاهش و مقاومت تراکمی افزایش می‌یابد. همچنین احتمال کنترل و مهار مهاجرت گاز در این روش به دلیل کاهش تخلخل و نفوذپذیری سیمان افزایش خواهد یافت. با تنظیم توزیع اندازه ذرات جامد در مخلوط خشک، مقدار ذرات جامد در واحد حجم دوغاب افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش مقاومت تراکمی و کاهش تخلخل و تراوایی می‌گردد [۳].



شکل ۱- اندازه ذرات در دوغاب‌های قدیمی و تخلخل ناشی از یکسان بودن اندازه ذرات

چگالی دوغاب عمدتاً به نسبت آب به جامد وابسته است. با افزایش این نسبت، ضعف در ایزولاسیون ناحیه‌ای بسیار محتمل است. بنابراین در روش جدید، با در نظر گرفتن حجم ثابت آب دوغاب سیمان، وزن مخصوص دوغاب سیمان با کمک مخلوط خشک تنظیم می‌گردد. تخلخل دوغاب با توجه به کارایی دوغاب موردنیاز تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال در سیمان‌کاری آستری مخزن میدان مارون، زمانی که مقاومت تراکمی بالا مورد نیاز است تخلخل کمتر از ۳۸٪ مد نظر خواهد بود. دوغاب‌های با تخلخل بسیار کم را می‌توان با بهینه‌سازی ترکیب به‌دست آورد. دستیابی به این گونه دوغاب‌ها بدون استفاده از توزیع دانه‌بندی ذرات غیر ممکن می‌باشد. بر مبنای فرضیه ابداعی با تنظیم اندازه ذرات متفاوت در ترکیب خشک دوغاب‌های سبک وزن با کارایی بالا را می‌توان در محدوده چگالی ۸/۳۴ تا ۱۲/۰۳ PPG

1. packing volume fraction

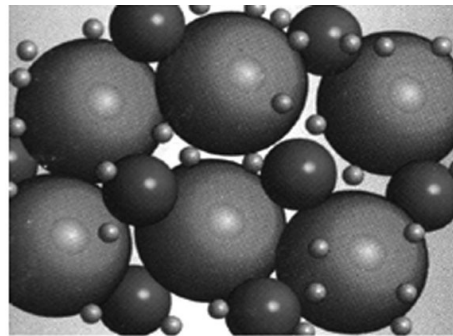
2. Multi-Stage Separation

با استفاده از روابط ریاضی و مثلثاتی، چهار ضلعی حاصل از مراکز ذرات دانه‌ریز درشت منظم فرض می‌شود که زوایای بین آنها ۹۰ درجه است. همان‌گونه در شکل ۲ نشان داده شده، اگر فرض یکنواختی اندازه ذرات متناظر را در نظر بگیریم، خطی که مرکز ذرات بزرگ را به ذره متوسط مرکز وصل می‌کند، نیمساز زاویه مربع است و از طرفی این نیمساز مجموع شعاع‌های متوسط و درشت ذرات است. با توجه با اینکه ضلع مربع نیز دو برابر شعاع ذره بزرگ‌تر می‌باشد، روابط زیر برقرار است:

$$(R_c + R_m) \cdot \cos(45) = R_c \rightarrow R_c = 2/4 R_m$$

یعنی شعاع ذره بزرگ باید تقریباً حداقل ۲/۴ برابر ذره کوچک‌تر باشد. البته فرضیه هم‌اندازه بودن ذرات بزرگ غیر ممکن است، اما در هیستوگرام فراوانی اندازه آنها باید به طور نرمال این نسبت برای ذرات درشت به متوسط رعایت شود. با این حال محاسبه نسبت اندازه ذرات دانه ریز R_f به سادگی این دو نیست. زیرا تعداد این ذرات مشخص نبوده و این ذرات به حدی ریز باشند که بتوانند در بین ذرات باید دیگر نقش پودر را بازی کنند. این امر با استفاده از سیستم نانو ذرات به کار رفته در این طراحی فراهم شده است. اکنون با فرضیات فوق دانه‌بندی مناسب قابل پیش‌بینی است، به طوری که حداقل سه نوع اندازه متفاوت باید انتخاب گردد. در فرآیند انتخاب دانه‌ها، باید قطر دانه‌های درشت حداقل ۲/۴ برابر قطر دانه‌های متوسط باشد. این تئوری صرفاً بر پایه محاسبات ریاضی است. نکته اصلی در این تکنولوژی، انتخاب درست این مواد از لحاظ نوع و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن می‌باشد تا بتوان به رئولوژی مناسبی دست یافت. به‌عنوان مثال برای ساخت دوغاب فوق سبک با وزن ۸/۳۴ PPG، ترکیب خشک متشکل از ۳۸/۷۵٪ سیمان کلاس G ۱۳/۵۸٪ کره‌های شیشه‌ای آلومینوسیلیکاته و ۳/۱۲٪ نانو ذرات HSL مورد نیاز است. ترکیبات کامل و خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است که در این جدول θ مقدار قرائت انحراف عقربه ویسکومتر در دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد [۶].

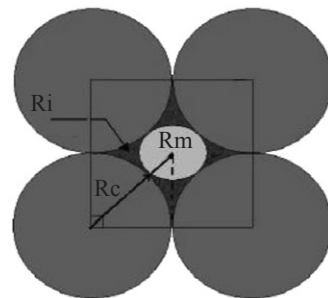
بود که هر ذره متوسط در میان چهار ذره دانه درشت قرار گرفته و ذرات ریز نیز فضاهای خالی بین آنها را پر می‌کنند (شکل ۲). در این مدل سه اندازه ذره در نظر گرفته می‌شود که به نام‌های ذرات درشت، متوسط و ریز نامیده می‌شوند. در این مدل ذرات درشت (سبک‌کننده‌های سیمان LW)، ذرات متوسط (دانه‌های سیمان پایه کلاس G) و ذرات ریز (HSL) در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲- تصویر فضایی قرارگیری سه اندازه مختلف ذرات در تکنولوژی بهینه دانه‌بندی

با استفاده از مدل فوق می‌توان دریافت که همواره یک ذره دانه متوسط در میان یک مکعب قرار می‌گیرد. در هر کنج این شش وجهی یک ذره دانه درشت قرار دارد و ذرات دانه‌ریز نیز فضاهای خالی ایجاد شده بین ذرات متوسط و درشت کروی را پر خواهند کرد. این ساختمان شش وجهی کنار هم تکرار می‌شود و مخلوط دانه‌ها را تشکیل می‌دهند.

اگر شش وجهی حاصل از دانه‌بندی فوق را از هر گوشه‌ای برش بزنیم، مربعی خواهد بود که یک ذره دانه متوسط در تماس با چهار ذره دانه درشت می‌باشد و ذرات دانه‌ریز نیز به صورت پودر در میان آنها قرار می‌گیرند. شکل (۳) این مقطع برش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شعاع نسبی ذرات در توزیع دانه‌بندی بهینه

در این مقطع شعاع ذرات درشت با R_c^1 ، شعاع ذرات متوسط با R_m^2 و ذرات دانه‌ریز با R_f^3 نشان داده شده‌اند.

1. Course Radius
2. Medium Radius
3. Fine Radius

نه تنها برای سیمان کاری اولیه بلکه برای مقاصد ثانویه و درمانی نیز موثر است. مقدار آب محتوای دوغاب‌های جدید در سیمان کاری اولیه مخاطرات و حوادث کمتری را نسبت به سیمان معمولی برای سیمان کاری ثانویه ایجاد می‌کند و هزینه‌های تعمیرات و اصلاح روش‌های قبلی را نیز کاهش می‌دهد. مزیت دیگر ساخت دوغاب‌های جدید این است که این روش به تجهیزات ویژه یا پرسنل متخصص نیاز ندارد. مخلوط خشک تهیه شده در این روش که متشکل از سیمان کلاس G، LW6 و نانو HSL می‌باشد می‌تواند با آب شیرین یا آب دریا مخلوط شوند و در دوغاب‌های حاصله می‌توان از ضد کف، تندکننده، کندکننده، پراکنده‌سازها و مواد کنترل‌کننده افت صافی و دیگر افزودنی‌های مهار مهاجرت گاز استفاده کرد. خواص ویژه افزودنی‌های مهار مهاجرت گاز که شامل انقباض حجمی کم و توسعه مقاومت فشاری سریع است توسط دوغاب‌های جدید به صورت غیر مستقیم فراهم شده است.

ساخت دوغاب

آخرین تکنولوژی ساخت دوغاب با نفوذپذیری کم، استفاده از دانه‌بندی غیر یکنواخت ذرات دوغاب برای کاهش فضای خالی بین ذرات است. بر همین اساس پژوهشگاه صنعت نفت از دو نوع توزیع دانه‌بندی ذرات برای طراحی دوغاب‌های فوق سبک استفاده نمود که با بهینه‌کردن اندازه ذرات جامد، دوغاب‌هایی با استحکام تراکمی اولیه بالا به دست آمد. اندازه ذرات میکروبلاک استفاده نمود در دوغاب سیمان در حدود ۰/۵ و تقریباً ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از ذرات سیمان است. همچنین قطر ذرات LW 6 و HSL به ترتیب بین ۶۰ تا ۳۱۵ و ۲۰ nm می‌باشد. بنابراین با استفاده از ماده‌ای بسیار دانه ریز نظیر HSL می‌توان فضای بین دانه‌های سیمان، LW 6 و میکروبلاک را پرکرد و میزان تخلخل و نفوذپذیری سنگ سیمان را کاهش داد. برای ساخت دوغاب‌های فوق سبک با D124 یا LW 6 (کره‌های شیشه‌ای آلومینوسیلیکاته سبک‌تر از آب) ابتدا سیمان و مواد سبک‌کننده (HSL + D124) با هم مخلوط شده و سپس اختلاط با آب صورت گرفت. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از شکستن کره‌ها، اختلاط مخلوط خشک با محلول در داخل مخلوط کن با دور ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ rpm صورت می‌پذیرد. این امر از بالا رفتن وزن دوغاب جلوگیری می‌کند. و مدت زمان اختلاط برای تمامی دوغاب‌ها یکسان و به

جدول ۱- ترکیبات دوغاب سیمان با وزن مخصوص ۸/۳۴ پوند بر گالن

مقدار مصرف	ترکیبات دوغاب
۱۱۰ پوند بر کیسه	مخلوط خشک
۱۰/۲۵ گالن بر کیسه	آب منطقه
۱/۵۳ گالن بر کیسه	میکروبلاک
۰/۵۱ گالن بر کیسه	ضد مهاجرت گاز
۰/۲۱ پوند بر کیسه	کنترل‌کننده افت صافی
۱/۴۹ پوند بر کیسه	کندکننده بندش
۰/۴۲ پوند بر کیسه	پراکنده‌ساز
۰/۳۴ پوند بر کیسه	ضد رسوب‌کننده
۰/۰۲ گالن بر کیسه	ضد کف

جدول ۲- خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان با وزن مخصوص ۸/۳۴ پوند بر گالن

دور بر دقیقه	قرائت عقربه
۶۰۰	۱۲۲
۳۰۰	۶۷
۲۰۰	۴۸
۱۰۰	۲۶
۶	۲
۳	۰/۵
گرانروی ظاهری (cP)	۶۱
گرانروی خمیری (cP)	۵۵
نقطه واروی lb/۱۰۰ ft ²	۱۲

در این طراحی اندازه دانه‌های درشت (کره‌های شیشه‌ای آلومینوسیلیکاته) در حدود ۱۱۵ μm است و اندازه متوسط دانه‌های سیمان کلاس G نیز در حدود ۴۶ می‌باشد که نسبت تقریبی ۲/۵ برای اندازه‌های درشت و متوسط رعایت شده است و برای دانه‌های ریز از ماده جدید نانو HSL که می‌تواند به‌طور مؤثری آب اضافی را به هم پیوند دهد استفاده می‌شود. تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند، دوغاب‌های سیمانی که متشکل از ذرات نانو HSL، می‌باشند در مقایسه با دوغاب‌های معمولی سبک با همان چگالی دارای استحکام تراکمی اولیه سریع‌تر (کمتر از ۸ ساعت) و بالاتری می‌باشند.

همچنین نانو HSL در دوغاب‌های به‌سازی شده باعث تسریع در بندش، بهبود خواص رئولوژیکی و از بین رفتن آب آزاد دوغاب می‌شود. ضمناً عملکرد دانه‌های ریز در بین دانه‌های درشت‌تر به‌عنوان عامل روان‌کننده، به اختلاط بهتر و پمپ‌شدن دوغاب کمک می‌کند. تکنولوژی نانو ذرات

با طراحی دوغاب سیمان با سیستم جدید، رشد استحکام تراکمی، سریع‌تر خواهد بود. در این سیستم از مواد افزودنی سبک وزن HSL جهت دستیابی به دوغاب‌های فوق سبک (۸/۵ ppg) استفاده شده است. این افزودنی سبک وزن نه تنها نفوذپذیری و سایر خواص دوغاب را بهبود می‌بخشد. بلکه استحکام تراکمی زود هنگامی را در دوغاب سیمان ایجاد می‌کند. آزمایش‌های استحکام تراکمی متعددی بر روی این سیمان‌ها انجام شده است. تست‌های انجام شده بر روی دوغاب‌ها با استفاده از دستگاه UCA و در فشار ۳۰۰۰ psi و در دمای ۲۲۰ °F و ۱۹۰ انجام شده است.

مدت ۴۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. به کارگیری HSL به عنوان عاملی برای معلق نگه داشتن مواد سبک‌کننده در داخل دوغاب (جهت جلوگیری از جدایش آن از محلول) و افزایش مقاومت تراکمی سنگ سیمان، منجر به دستیابی به دوغاب‌های مناسب با وزن‌های (۶۲-۹۰ PCF) گردید.

ترکیبات کامل دوغاب‌های سیمان طراحی شده با وزن‌ها و توزیع دانه‌بندی مختلف در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

استحکام تراکمی

از نتایج آزمایش‌های به دست آمده کاملاً مشهود است که

جدول ۳- فرمولاسیون دوغاب‌های سبک وزن به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۱ (PSD1)

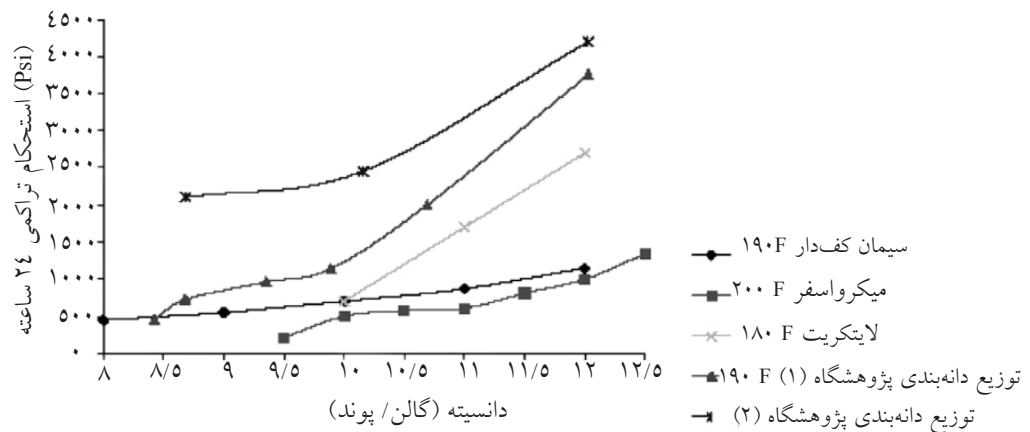
وزن مخصوص دوغاب	۸/۲۸ پوند بر گالن	۸/۵۵ پوند بر گالن	۹/۳۵ پوند بر گالن	۹/۸۹ پوند بر گالن	۱۰/۶۹ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
ترکیبات دوغاب	مقدار مصرف					
مخلوط خشک	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه
آب منطقه	۱۴/۲۶ گالن بر کیسه	۱۴/۸۶ گالن بر کیسه	۱۳/۳۷ گالن بر کیسه	۱۰/۸۷ گالن بر کیسه	۸/۵۲ گالن بر کیسه	۵/۹۵ گالن بر کیسه
میکرو بلاک	۲/۳ گالن بر کیسه	۲/۴۸ گالن بر کیسه	۲ گالن بر کیسه	۲/۳۳ گالن بر کیسه	۱/۷ گالن بر کیسه	۱/۹۸ گالن بر کیسه
ضد مهاجرت گاز	۰/۲۳ گالن بر کیسه	۰/۲۴۸ گالن بر کیسه	۰/۳۳ گالن بر کیسه	-	-	-
کنترل کننده افت صافی	۱/۳۴ پوند بر کیسه	۱/۴۴ پوند بر کیسه	-	-	-	-
کند کننده بندش	۰/۹۹ پوند بر کیسه	۱/۰۷ پوند بر کیسه	۱/۳۹ پوند بر کیسه	۱/۱ پوند بر کیسه	۰/۸۵ پوند بر کیسه	۰/۶۲ پوند بر کیسه
پراکنده ساز	۰/۴۶ پوند بر کیسه	۰/۴۹ پوند بر کیسه	۰/۶۷ پوند بر کیسه	۰/۵۱ پوند بر کیسه	۰/۸۵ پوند بر کیسه	۱/۲۴ پوند بر کیسه
ضد کف	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰۶ گالن بر کیسه	۰/۰۶ گالن بر کیسه	۰/۰۸ گالن بر کیسه

جدول ۴- فرمولاسیون دوغاب‌های سبک وزن به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲ (PSD2)

وزن مخصوص دوغاب	۸/۶۸ پوند بر گالن	۱۰/۱۶ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
ترکیبات دوغاب	مقدار مصرف		
مخلوط خشک	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه	۱۱۰ پوند بر کیسه
آب منطقه	۹/۲۲ گالن بر کیسه	۶/۸۷ گالن بر کیسه	۴/۴۹ گالن بر کیسه
میکرو بلاک	۱/۵۳ گالن بر کیسه	۱/۶۱ گالن بر کیسه	۱/۴۹ گالن بر کیسه
ضد مهاجرت گاز	۰/۵۱ گالن بر کیسه	۰/۴ گالن بر کیسه	۰/۴۹ گالن بر کیسه
کنترل کننده افت صافی	۰/۴۲ پوند بر کیسه	۰/۶۷ پوند بر کیسه	۰/۳۳ گالن بر کیسه
کند کننده بندش	۱/۷ پوند بر کیسه	۱ پوند بر کیسه	۰/۸۳ پوند بر کیسه
پراکنده ساز	۰/۶۴ پوند بر کیسه	۰/۶۷ پوند بر کیسه	۱/۶۶ پوند بر کیسه
ضد رسوب کننده	۰/۳۴ پوند بر کیسه	-	-
ضد کف	۰/۰۲ گالن بر کیسه	۰/۰۳ گالن بر کیسه	۰/۰۳ گالن بر کیسه

فرمولاسیون طراحی شده پژوهشگاه می‌باشد. در تمامی این فرمولاسیون‌ها زمان صرف شده برای رشد مقاومت تراکمی از ۵۰ تا ۵۰۰ psi عموماً بسیار کوتاه است که این مسئله باعث کوتاه‌تر شدن زمان WOC و ادامه سریع‌تر حفاری می‌شود. شکل (۴) نشان‌دهنده تغییرات استحکام تراکمی دوغاب‌های طراحی شده با توزیع دانه‌بندی شماره ۲ و سایر تکنولوژی‌ها می‌باشد. با استناد به نمودارهای ذیل و با توجه به ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مواد به کار رفته در سیمان Blend پژوهشگاه استحکام تراکمی سنگ سیمان حاصله در دماهای 190°F تا 220°F تغییر محسوسی پیدا نخواهد کرد. همچنین افزایش استحکام تراکمی دوغاب‌های سیمان سبک با روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲ به دلیل بهبود توزیع اندازه ذرات تشکیل دهنده دوغاب سیمان می‌باشد.

تست‌های انجام شده بر روی دوغاب‌ها با استفاده از دستگاه UCA و در فشار ۳۰۰۰ psi و در دمای 220°F و 190°F انجام شده است. استحکام تراکمی به دست آمده از دوغاب‌های سیمان، کاملاً به نسبت حجمی آب (به عبارت دیگر تخلخل دوغاب) و سیمان بستگی دارد. تخلخل یک دوغاب استاندارد با وزن $15/8\text{ppg}$ حدود ۵۸٪ می‌باشد. در این سیستم تخلخل تا حدود ۴۰٪ پایین نگه داشته شده است. سیمان پرتلند به دلیل تشکیل هیدرات‌های جامد، برای هیدراته شدن کامل و افزایش استحکام تراکمی فقط به ۲۰٪ آب نیاز دارد. آب اضافی برای ساختن دوغاب‌های قابل پمپ برای کاربردهای عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند افزایش استحکام تراکمی و مقادیر نهایی آن در مقایسه با دوغاب سیمان سبک وزن طراحی شده با افزودنی‌های مختلف و همچنین دوغاب طراحی شده توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب نشان‌گر برتری



شکل ۴- مقایسه تغییرات استحکام تراکمی ۲۴ ساعته دوغاب‌های سیمان طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت

آب آزاد

می‌دهد که فرمولاسیون دوغاب سیمان با توزیع دانه‌بندی شماره دو پژوهشگاه به مراتب بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد و با افزایش وزن دوغاب، مقادیر تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. مقادیر مختلف تخلخل و تراوایی سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت، در وزن‌های مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

آب آزاد دوغاب‌ها مطابق با روش استاندارد API جهت نشان دادن پایداری دوغاب‌ها در محدوده وسیعی از چگالی‌ها اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات، تمامی دوغاب‌های طراحی شده با استفاده از روش توزیع دانه بندی شماره ۱ و ۲ پژوهشگاه فاقد آب آزاد می‌باشند.

خواص رئولوژیکی

سیستم جدید دوغاب‌های سبک وزن به گونه‌ای طراحی شده اند که در تمامی محدوده های وزنی دارای خواص رئولوژیکی مطلوبی هستند. کلیه دوغاب‌ها دارای خاصیت تیکسوتراپیک بوده و با استفاده از پراکنده سازها از ویسکوزیته کمی برخوردار هستند. خواص رئولوژیکی دوغاب‌های سیمان سبک که دارای مقاومت تراکمی قابل قبولی بوده‌اند در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. تست‌های رئولوژیکی با استفاده از دستگاه Fann ۳۵ و مطابق با روش استاندارد API انجام شده است.

نفوذپذیری و تخلخل

مقادیر نفوذپذیری و تخلخل دوغاب سیمان طراحی شده بر اساس استاندارد API و با فشار جانبی ۳۰۰۰ psi در واحد پژوهش مغزه‌های نفتی پژوهشگاه صنعت نفت اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایشات نشان

مهاجرت گاز

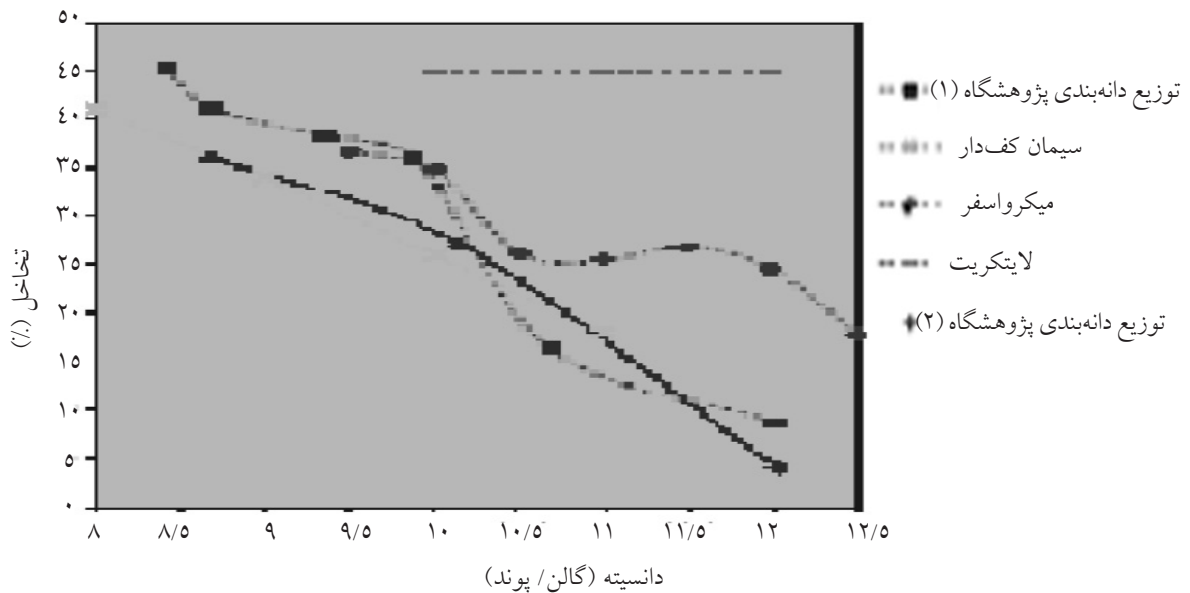
گاز می‌تواند تا زمانی که دوغاب سیمان حالت ژله‌ای داشته، یا وزن حجمی آن به خوبی طراحی نشده باشد و افت صافی و کاهش حجم آن زیاد باشد، مهاجرت نماید. در این گونه موارد، افزودنی‌های خاص مانند کاهنده‌های نفوذپذیری و منبسط کننده‌ها می‌توانند در توقف ورود گاز به فضای حلقوی چاه و مهاجرت آن مفید باشند. در مرحله دوم، ژلگی دوغاب، با جلوگیری از انتقال فشار هیدرواستاتیکی فشار را در مقابل منطقه گازدار کاهش می‌دهد. دوغاب‌هایی مناسب و مورد نیاز هستند که این دوره انتقالی را به حداقل برسانند تا در نهایت، سیمان به حالت یک جسم جامد غیر قابل نفوذ برسد. در چنین مواقعی، سیمان سخت شده باید مقاومت مکانیکی و حرارتی کافی از خود نشان دهد، زیرا شکاف می‌تواند یک مسیر آسان برای مهاجرت گاز باشد. در کنار کنترل وزن حجمی و طراحی دوغاب، جنبه دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، جداسازی مناسب لایه‌ای است.

جدول ۵- خواص رئولوژیکی دوغاب‌های طراحی شده به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۱

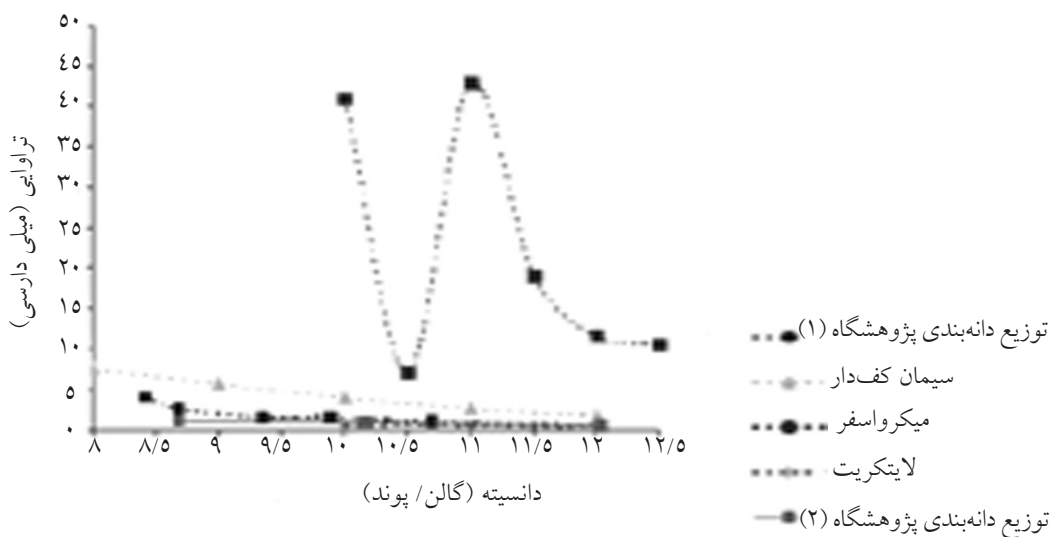
دور بر دقیقه	۸/۲۸ پوند بر گالن	۸/۵۵ پوند بر گالن	۹/۳۵ پوند بر گالن	۹/۸۹ پوند بر گالن	۱۰/۶۹ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
قرائت عقربه						
۶۰۰ θ	۷۶	۵۳	۷۴	۶۳	۷۳	۹۸
۳۰۰ θ	۴۰	۳۰	۴۵	۳۹	۴۵	۵۹
۲۰۰ θ	۳۰	۲۱	۳۳	۲۹	۳۳	۴۱
۱۰۰ θ	۱۸	۱۲	۲۳	۲۰	۲۲	۲۷
۶ θ	۸	۵	۱۲	۹	۱۰	۱۱
۳ θ	۷	۴	۱۳	۱۰	۱۱	۱۲
گرانروی ظاهری (cP)	۳۸	۲۶/۵	۳۷	۳۱/۵	۳۶/۵	۴۹
گرانروی خمیری (cP)	۳۳	۲۷	۳۳	۲۸/۵	۳۴/۵	۴۸
نقطه واروی (lb/۱۰۰ft ²)	۷	۳	۱۲	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۱

جدول ۶- خواص رئولوژیکی دوغاب‌های طراحی شده به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲

دور بر دقیقه	۸/۶۸ پوند بر گالن	۱۰/۱۶ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
قرائت عقربه			
۰ ۶۰۰	+۳۰۰	+۳۰۰	+۳۰۰
۰ ۳۰۰	۱۵۵	۲۱۵	۲۴۳
۰ ۲۰۰	۱۱۰	۱۵۲	۱۷۴
۰ ۱۰۰	۶۲	۸۶	۹۷
۰ ۶	۷	۱۰	۱۰
۰ ۳	۴	۵	۶
گرانروی ظاهری (cP)	+۱۵۰	+۱۵۰	+۱۵۰
گرانروی خمیری (cP)	۱۳۹/۵	۱۹۳/۵	۲۱۹
نقطه واروی (lb/۱۰۰ft ^۲)	۱۵/۵	۲۱/۵	۲۴



شکل ۵- مقایسه مقادیر تخلخل در وزن‌های متفاوت برای سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت



شکل ۶- مقایسه مقادیر نفوذپذیری در وزن‌های متفاوت برای سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت

سیمان افزایش می‌یابد، بلکه ساختار سیمان نیز تضعیف شده و کاهش فشار تشدید می‌گردد.

- زمان رسیدن به مقاومت ۵۰۰ psi کوتاه باشد.

- استحکام تراکمی سنگ سیمان، حتی المقدور در بالاترین حد خود باشد.

- استحکام کششی سنگ سیمان حداقل ۷٪ استحکام تراکمی آن باشد.

- کاهش حجم دوغاب از حالت سیالیت به بندش کامل حداقل باشد. خصوصاً در سیمان‌های شور به دلیل نیروی جاذبه بالا بین مولکول‌های آب و یون‌های آزاد شده نمک پس از عمل یونیزاسیون، کاهش حجمی دوغاب به حداکثر خود می‌رسد که باید در محاسبات مربوط به این دوغاب‌ها این مسئله مد نظر قرار گیرد.

- زمان نیم‌بندش دوغاب باید در حالت ایده‌آل و مطلوب باشد. لازم به ذکر است که سرعت غیر نرمال در بندش، و یا تاخیر غیر عادی در زمان بندش و یا تاخیر غیر عادی در زمان بندش، اشکالات متعددی در عملیات سیمان‌کاری ایجاد می‌کند.

- میزان افت صافی دوغاب حتی المقدور در پایین‌ترین سطح خود باشد، چرا که با کاهش میزان افت صافی، دوغاب‌ها می‌توانند وظایف خود را به خوبی انجام داده و در مجاورت سازندهای نفوذپذیر، مقاومت بهتری از خود نشان دهند.

- استحکام نخستین سنگ سیمانی باید در حدی باشد که بتواند در برابر لرزش‌های ناشی از انفجار و سوراخ شدن لوله جداری کمترین مقاومت را از خود نشان بدهد.

- زمان انتقال از حالت سیالیت به جامد شدن حداقل باشد.

شکل‌های ۷ تا ۹ تغییرات ویژگی‌های مؤثر در نفوذ گاز به سیمان با وزن دوغاب‌های مختلف را نشان می‌دهند.

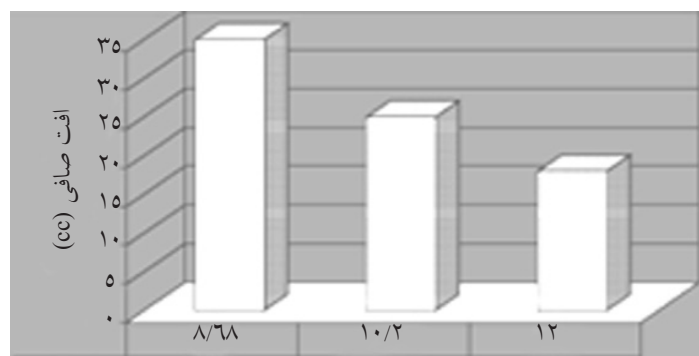
برطرف کردن کامل گل، اندود حفاری و خرده‌ها از فضای حلقوی اهمیت زیادی دارد. چون در صورت وجود این مواد، مسیرهایی برای حرکت گاز در فضای حلقوی چاه ایجاد خواهد شد. برای بهینه‌سازی و برطرف کردن این مواد، پارامترهای دینامیکی بر اساس داده‌های تجربی و مطالعه چگونگی سرعت سیال در فضای حلقوی از اهمیت بالایی برخوردار است. در کنار پارامترهای فوق، سایر فاکتورها از قبیل سرعت سیال، مرکزیت لوله جداری، شکل مقطع پروفیل تغییرات سرعت دوغاب سیمان که در فضای حلقوی جریان دارد و همچنین اختلاف بین نقطه تسلیم دوغاب سیمان و گل حفاری را می‌توان به عنوان عوامل مهم معرفی کرد. برای دستیابی به فرمولاسیون مطلوب که بتواند در شرایط موجود منطقه ($P=5000\text{psi}$, $T=94^{\circ}\text{C}$) توانایی مقابله با مشکلات احتمالی سازند بالاخص جلوگیری از نفوذ سیال به داخل فضای حلقوی را داشته باشد، دوغاب‌های سیمان مختلفی با استفاده از سیمان کلاس G کرمان تهیه شد و آزمایشات لازم بر روی آنها انجام گرفت. از نقطه نظر نیازمندی‌های عملیات سیمان‌کاری چاه‌ها، یک دوغاب خوب (با قابلیت مهار مهاجرت گاز) باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد که تمامی آنها با استفاده از تکنولوژی به کار گرفته شده در این مقاله به صورت غیر مستقیم فراهم شده است:

- نیم بندش اولیه دوغاب بین ۳۰-۱۰ CP باشد.

- لازم است سرعت افزایش نیم بند شدن بعد از گذشت ۳ ساعت، به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد.

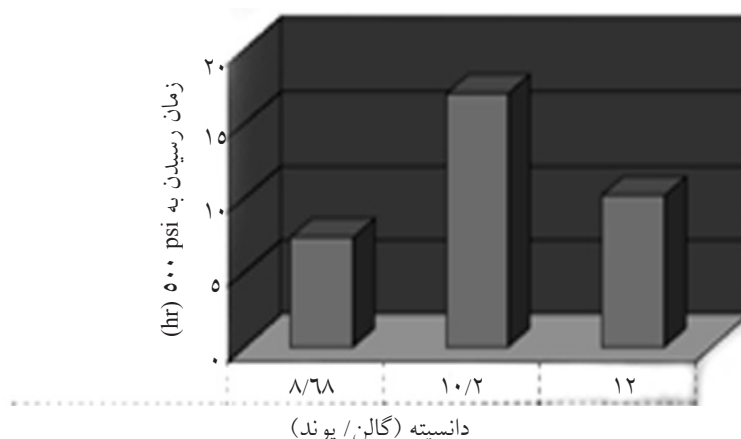
- سرعت استحکام تراکمی سیمان بعد از گذر زمان بندش بالا باشد.

- بر اساس استاندارد API مناسب‌ترین دوغاب از نظر مقابله با مهاجرت گاز دوغابی با افت صافی حداکثر ۵۰ CC در مدت زمان ۳۰ دقیقه می‌باشد. در مقادیر بیش از این، نه تنها نفوذپذیری



دانسیته (گالن / پوند)

شکل ۷- مقادیر افت صافی در وزن‌های متفاوت با توزیع دانه‌بندی شماره ۲



شکل ۸- مقادیر زمان رسیدن به استحکام تراکمی ۵۰۰ psi در وزن‌های متفاوت (با توزیع دانه‌بندی شماره ۲ در دمای ۱۹۰ F°)



شکل ۹- مقادیر زمان بندش در وزن‌های متفاوت (با توزیع دانه‌بندی شماره ۲ در دمای ۲۰۰ F°)

نتیجه‌گیری

- ۴- تخلخل ۳۶٪ و نفوذپذیری ۰/۰۱ میلی داری برای وزن PPG ۸/۳۴
- ۵- جایگزین شدن عملیات سیمان‌کاری تک مرحله‌ای به جای دو مرحله‌ای
- ۶- قابلیت مشبک کاری عالی
- ۸- هزینه کمتر در مقایسه با سیستم‌های متداول
- ۹- کاهش مدت زمان انتظار جهت شروع مجدد عملیات سیمان‌کاری به کمتر از ۸ ساعت برای وزن PPG ۸/۳۴
- ۱۰- قابلیت مهار مهاجرت گاز در وزن‌های مختلف

- ۱- استحکام تراکمی خیلی بالا ۲۰۰۰ psi و ۴۰۰۰ psi به ترتیب برای وزن‌های ۸/۶۸ و PPG ۱۲/۰۳.
- ۲- بهبود پایداری و کنترل افت صافی و در بیشتر حالات عدم وجود آب آزاد در مقایسه با سیستم‌های مرسوم.
- ۳- رشد سریع‌تر استحکام تراکمی

مراجع

- [1]. Smith Robert C., Amoco Production Co.; Powers, Charles A., Amoco Production Co.; Dobkins, Terrell A., Amoco Production Co., "A New Ultra-Lightweight Cement With Super Strength", Vol. 32, SPE Journal Paper, 1980, 8256
- [2]. Bengé O. G. and Spangle L. B., Dowell Division of Dow Chemical U.S.A.; Sauer Jr., C.W., Conoco, Inc., "Foamed Cement - Solving Old Problems with a New Technique", SPE Conference pp. 11204, 1982.
- [3]. Harris K. L., Halliburton Services, "New Lightweight Technology for the Primary Cementing of Oilfield Casings in Cold Environments", SPE Conference pp. 1991, 22065
- [4]. Hossam A., Elmoneim Schlumberger Dowell S., Zaki ADMA-OPCO Hussein Al - Arda, Dowell S., "Cementing the deepest 20 inch Casing in Abu Dhabi using a combination of Noval Light Weight Slurry and Fiber", SPE Conference Paper, 2000, 87283
- [5]. Philippe R. , Bipin J. and Dowell S., "A New Approach to Designing High-performance Lightweight Cement Slurries for Improved Zonal Isolation in Challenging Situations", SPE Conference pp. 47830, 1998.
- [6] Formica J., and Davis B., Dowell S., "Lightweight Cement, Ultrasonic Cement Evaluation, and Cased-Hole Dynamics Formation Pressure Tester Combine to Enhance Infill-Drilling Opportunities in Shallow Marine Shelf Deposits", Kern County, California, SPE Conference pp. 93959, 2005.