طراحی نوین دوغاب‌های سیمان فوق سبک با استفاده از فناوری نانو برای سیمان‌کاری آستری ۷ اینچ مخزن آسماری۱۶ حلقه چاه میدان مارون

حمید سلطانیان
پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی نفت، گروه پژوهش حفاری و تکمیل چاه
soltanianh@ripi.ir

پژوهش نفت
سال بیست و سوم
شماره ۷۶
صفحه، ۱۷۸-۱۶۸ ۱۳۹۲
تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۱۹

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 لایت‌کریت دوغاب‌های سبک وزنی طراحی شده‌اند که با دوغاب‌های سیمان سبک وزن طراحی شده پژوهشگاه صنعت نفت قابل مقایسه نمی‌باشند.دوغاب های سبک وزن طراحی شده با استفاده از فناوری فوق معایبی 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 ٦٢ پوند بر فوت مکعب، دوغاب‌های سبک وزن مختلف با خصوصیات مورد انتظار در شرایط واقعی چاه طراحی شده‌اند. در این روش محدوده هایی از اندازه‌های ذرات جامد به دقت انتخاب شده‌اند به‌طوری‌که 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 psi ۵۰۰ جهت شروع مجدد عملیات حفاری (WOC) دوغاب سیمان را به مدت زمان حداکثر ۸ ساعت کاهش می‌دهد و دارای مقاومت تراکمی ٢٤ ساعته psi ۲۰۰۰ در دمای ۱۹۰ درجه فارنهایت، تخلخل ۳٦٪ و نفوذپذیری ۰/۰۱ میلی دارسی برای وزن ٨/٣٤PPG می‌باشد.و همچنین خواص ویژه افزودنی‌های مهار مهاجرت گاز ،که شامل انقباض حجمی کم وتوسعه 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 عمرچاه تأثیر زیادی دارد، لازم است از تکنولوژی جدید بهینه‌سازی ساخت و راندن دوغاب به طور هم‌زمان و هماهنگ استفاده شود.

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

Archive of SID
www.SID.ir

می‌دهد که چاه تا چه مـدت می‌تواند مولد و بدون نیاز به تعمیـر باقی بماند. علاوه بر مسـأله 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 سـیمان‌کاری، نگهداری و حفظ فشار فضای حلقوی بین فشـار سازند و فشار شکست سازند با اهمیت و بحرانی می‌باشـد. چنانچه فشـار فضای حلقوی کمتر از فشـار سازند شود، سـیال داخل سـازند به چاه وارد شده و نهایتاً باعث ایجاد فوران می‌شـود. چنانچه فشـار ستون دوغاب سـیمان در فضای حلقوی از فشـار سـازند بیشتر شود، نشـت 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 سـیال حفاری یا سـیمان در اثر شکست سازند به داخل زمین هرز می‌رود.

اولین پارامتر مؤثر در فشـار هیدروسـتاتیک چاه در حفاری و سـیمان‌کاری، وزن حجمی سیالات مورد استفاده است که سـازندهای اطراف چاه در معرض تماس و تحت فشار آنها خواهد بود. دومین عامل، رئولوژی سـیال در حین جانشینی است. متخصصین معتقدند که پارامتر وزن دوغاب را می‌توان در فازهـای طراحـی و اجـرا کنترل نمود، اما مسـأله کنترل رئولوژی واقعی دوغاب نسبت به کنترل وزن مشکل‌تر است.

نرم‌افـزار CEMCADE و دیگـر نرم‌افزارهـای ارزیابی و شبیه‌سـازی را می‌توان جهت طراحی سیمان‌کاری و تعیین پارامترهای طراحی اسـتفاده نمـود. در حین عملیات لازم است که پارامترهای طراحی در حد معقول و منطقی خطای مجاز نگه داشته شوند [۲].

ذرات جامـد موجود در دوغاب سـیمان، 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 هیدروستاتیک سیال از سـازند بیشتر اسـت، از آن جدا شـود. این جدایی باعث افزایش گرانروی و نهایتاً جانشـینی ناقص دوغاب و کاهش حجم ستون سیمان پشت لوله جداری شده و یا باعث ایجاد کانال‌ها در سـتون سـیمان و عامل مهاجرت گاز از اعماق به سطح می‌شـود. 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 ۶۲/۴lb/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 اسـت. پیشـرفت‌های اخیر در تکنولوژی اندازه ذرات منجر به دست یابی به یک ماده سبک کننده 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

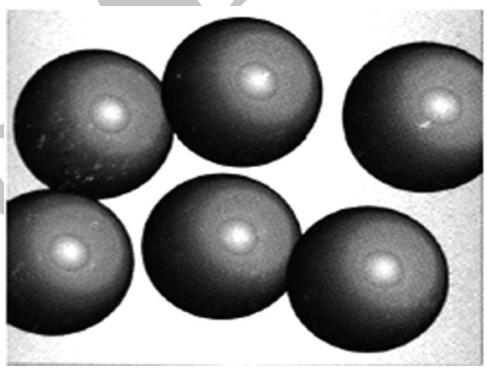
روش طراحی دوغاب فوق سبک

در روش‌های جدید طراحی دوغاب فوق سبک با تکنولوژی نانو ذرات، سیسـتمی مشابه سیستم تولید بتن برای ساخت دوغاب ایجاد می‌شـود که ضمن به‌سـازی سـیمان‌کاری چاه، کیفیت بـالای مقاومت تراکمی را نیز به دنبال خواهد داشـت. با کنترل توزیع اندازه ذرات جامد،تنظیم گرانروی دوغاب با اسـتفاده از تنوع اندازه ذرات بهتر انجام می‌شود که این امر برای سـاخت دوغاب‌هایی به سبکی ۶۲/۴lb/ft^3 در چاه‌هایی با نرخ فشـار پایین حائز اهمیت می‌باشـد. از آنجا که بعضی از دوغاب‌های سـیمان از نظر اندازه ذرات جامد تک سایز هستند، ساختار آنها به صورت جعبه‌ای پر از فضاهای خالی بین ذرات جامد می‌باشد. مشابه شکل ۱،

Archive of SID

www.SID.ir

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 کارآیی 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 کارآیی بالا را می‌توان در محدوده چگالی ۸/۳٤ تا ۱۲/۰۳ PPG طراحی نمود، در حالی‌که دوغاب‌های سبک وزن با روش‌های متداول نتایج نامناسبی به دنبال خواهد داشت. ابداع این تکنولوژی نوین، تولید دوغاب‌های سیمان با وزن ۸/۳٤ 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 [٤].

روش طراحی که بر اساس به‌سازی اختلاط است، مبتنی‌بر حداکثر نمودن (PVF)[1] اختلاط خشک می‌باشد. PVF به‌عنوان حجم فضای اشغال شده توسط ذرات جامد تقسیم بر حجم فله‌ای ذرات، هنگامی‌که اختلاط خشک در حالت حداکثر تراکم قرار دارد، تعریف می‌گردد.

$$PVF=\frac{\sum absulate\ volumes}{\sum bulk\ volumes} \qquad (۱)$$

PVF را می‌توان به‌صورت زیر ذیل نیز توصیف نمود:

PVF =۱ – تخلخل اختلاط خشک (۲)

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 [٤و٥].

مدل دانه‌بندی مناسب

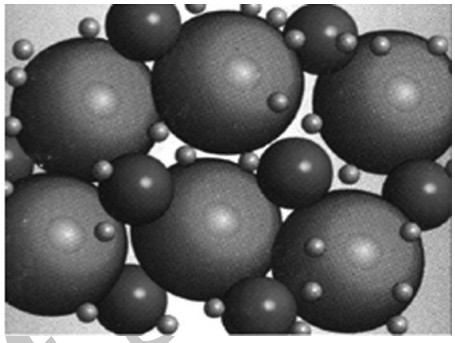
فرآوری سیمان‌های سنتی به‌گونه‌ای است که بیشتر ذرات کروی و هم‌اندازه بوده و یا دارای سایز نزدیک به هم هستند که این امر باعث ایجاد تخلخل قابل ملاحظه در بین آنها می‌شود. فضای خالی موجود بین ذرات باعث بروز مشکلاتی نظیر نفوذپذیری و مهاجرت گاز در سیمان سفت شده می‌گردد.

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 وجهی‌هایی خواهند

1. packing volume fraction
2. Multi-Stage Separation

Archive of SID
www.SID.ir

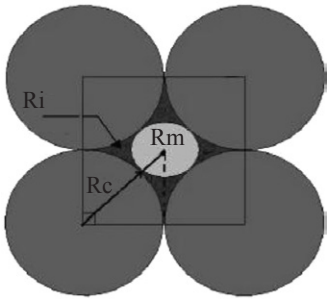
بود که هر ذره متوسط در میان چهار ذره دانه درشت قرار گرفته و ذرات ریز نیز فضاهای خالی بین آنها را پر می‌کنند (شکل ۲). در این مدل سه اندازه ذره در نظر گرفته می‌شود که به نام‌های ذرات درشت، متوسط و ریز نامیده می‌شوند. در این مدل ذرات درشت (سبک‌کننده‌های سیمان LW)، ذرات متوسط (دانه های سیمان پایه کلاس G)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

با استفاده از روابط ریاضی و مثلثاتی، چهار ضلعی حاصل از مراکز ذرات دانه‌ریز درشت منتظم 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:

$$(R_c + R_m)^* \text{Cos}(45) = R_c \rightarrow \quad R_c = 2/4\, R_m$$

یعنی شعاع ذره بزرگ باید تقریباً حداقل ۲/٤ 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، به‌طوری که حداقل سه نوع اندازه متفاوت باید انتخاب گردد. در فرآیند انتخاب دانه‌ها، باید قطر دانه‌های درشت حداقل ۲/٤ 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 ۸/۳٤PPG، 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 دورهای مختلف را نشان می دهد [٦].

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

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۱- ترکیبات دوغاب سیمان با وزن مخصوص ۸/۳٤ پوند بر گالن

ترکیبات دوغاب	مقدار مصرف
مخلوط خشک	۱۱۰ پوند بر کیسه
آب منطقه	۱۰/۲۵ گالن بر کیسه
میکروبلاک	۱/۵۳ گالن بر کیسه
ضد مهاجرت گاز	۰/۵۱ گالن بر کیسه
کنترل‌کننده افت صافی	۰/۲۱ پوند بر کیسه
کندکننده بندش	۱/٤۹ پوند بر کیسه
پراکنده‌ساز	۰/٤۲ پوند بر کیسه
ضد رسوب‌کننده	۰/۳٤ پوند بر کیسه
ضد کف	۰/۰۲ گالن بر کیسه

جدول ۲- خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان با وزن مخصوص ۸/۳٤ پوند بر گالن

دور بر دقیقه	قرائت عقربه
θ ٦۰۰	۱۲۲
θ ۳۰۰	٦۷
θ ۲۰۰	٤۸
θ ۱۰۰	۲٦
θ ٦	۲
θ ۳	۰/۵
گرانروی ظاهری (cP)	٦۱
گرانروی خمیری (cP)	۵۵
نقطه واروی $lb/100\ ft^2$	۱۲

دراین طراحی اندازه دانه‌های درشت (کره‌های شیشه‌ای آلومینوسیلیکاته) در حدود ۱۱۵ µm است و اندازه متوسط دانه‌های سیمان کلاس G نیز در حدود ٤٦ 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 به‌هم 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 نه تنها برای سیمان‌کاری اولیه بلکه برای مقاصد ثانویه و درمانی نیز موثر است. مقدار آب محتوای دوغاب‌های جدید در سیمان‌کاری اولیه مخاطرات و حوادث کمتری را نسبت به سیمان معمولی برای سیمان‌کاری 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 به‌صورت 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 ٦ و HSL به‌ترتیب بین ٦۰ تا ۳۱۵ و ۲۰ nm می‌باشد. بنابراین با استفاده از ماده‌ای بسیار دانه ریز نظیر HSLمی‌توان فضای بین دانه‌های سیمان، LW ٦ و میکروبلاک را پرکرد و میزان تخلخل و نفوذپذیری سنگ سیمان را کاهش داد. برای ساخت دوغاب‌های فوق سبک با D۱۲٤ یا LW ٦ (کره‌های شیشه‌ای آلومینوسیلیکاته سبک‌تر از آب) ابتدا سیمان و مواد سبک‌کننده (HSL +D۱۲٤) 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 ٤۰۰۰ تا ٦۰۰۰ rpm صورت می‌پذیرد. این امر از بالا رفتن وزن دوغاب جلوگیری می‌کند. و مدت زمان اختلاط برای تمامی دوغاب‌ها یکسان و به

Archive of SID

www.SID.ir

مدت ٤٥ ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌کارگیری HSL به‌عنوان 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 (PCF ۹۰-٦۲) گردید.

ترکیبات کامل دوغاب‌های سیمان طراحی شده با وزن‌ها و توزیع دانه‌بندی مختلف در جداول ۳ و ٤ ارائه شده است.

استحکام تراکمی

از نتایج آزمایش‌های به‌دست آمده کاملاً مشهود است که 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 (ppg ۸/۵) 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 psi ۳۰۰۰ و در دمای ۲۲۰ و $^{\circ}F$ ۱۹۰ انجام شده است.

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	۱۰/٦۹ 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	۱٤/۲٦ گالن بر کیسه	۱٤/۸٦ گالن بر کیسه	۱۳/۳۷ گالن بر کیسه	۱۰/۸۷ گالن بر کیسه	۸/۵۲ گالن بر کیسه	۵/۹۵ گالن بر کیسه
میکروبلاک	۲/۳ گالن بر کیسه	۲/٤۸ 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	۰/۲٤۸ گالن بر کیسه	۰/۳۳ گالن بر کیسه	–	–	–
کنترل‌کننده افت صافی	۱/۳٤ پوند بر کیسه	۱/٤٤ پوند بر کیسه	–	–	–	–
کندکننده 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	۰/٦۲ پوند بر کیسه
پراکنده‌ساز	۰/٤٦ پوند بر کیسه	۰/٤۹ پوند بر کیسه	۰/٦۷ پوند بر کیسه	۰/۵۱ پوند بر کیسه	۰/۸۵ پوند بر کیسه	۱/۲٤ پوند بر کیسه
ضد کف	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰۵ گالن بر کیسه	۰/۰٦ گالن بر کیسه	۰/۰٦ گالن بر کیسه	۰/۰۸ گالن بر کیسه

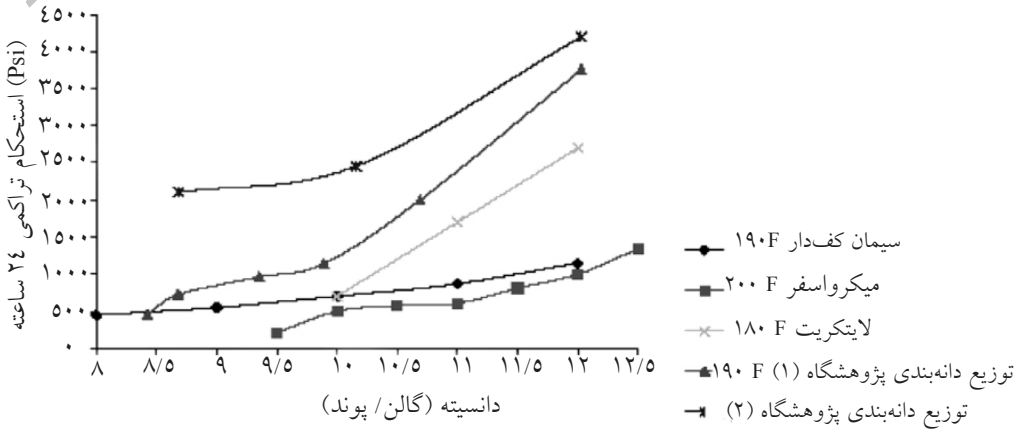
Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٤- فرمولاسیون دوغاب‌های سبک وزن به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲ (PSD2)

وزن مخصوص دوغاب	۸/٦۸ پوند بر گالن	۱۰/۱٦ 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	٦/۸۷ گالن بر کیسه	٤/٤۹ گالن بر کیسه
میکروبلاک	۱/۵۳ گالن بر کیسه	۱/٦۱ گالن بر کیسه	۱/٤۹ گالن بر کیسه
ضد مهاجرت گاز	۰/۵۱ گالن بر کیسه	۰/٤ گالن بر کیسه	۰/٤۹ گالن بر کیسه
کنترل کننده افت صافی	۰/٤۲ پوند بر کیسه	۰/٦۷ 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	۰/٦٤ پوند بر کیسه	۰/٦۷ پوند بر کیسه	۱/٦٦ پوند بر کیسه
ضدرسوب کننده	۰/۳٤ پوند بر کیسه	–	–
ضد کف	۰/۰۲ گالن بر کیسه	۰/۰۳ گالن بر کیسه	۰/۰۳ گالن بر کیسه

تست‌های انجام شده بر روی دوغاب‌ها با استفاده از دستگاه UCA و در فشار psi ۳۰۰۰ و در دمای ۲۲۰ و $^{\circ}F$ ۱۹۰ انجام شده است. استحکام تراکمی به‌دست آمده از دوغاب‌های سیمان، کاملا به نسبت حجمی آب (به عبارت دیگر تخلخل دوغاب) و سیمان بستگی دارد. تخلخل یک دوغاب استاندارد با وزن ۱۵/۸ppg حدود ۵۸ ٪ می‌باشد. در این سیستم تخلخل تا حدود ٤۰٪ پایین نگه داشته شده است. سیمان پرتلند به‌دلیل 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 درمقایسه با دوغاب سیمان سبک وزن طراحی شده با افزودنی‌های مختلف و همچنین دوغاب طراحی شده توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب نشان‌گر برتری فرمولاسیون طراحی شده پژوهشگاه می‌باشد. در تمامی این فرمولاسیون‌ها زمان صرف شده برای رشد مقاومت تراکمی از ۵۰ تا psi ۵۰۰ عموماً بسیار کوتاه است که این مسأله باعث کوتاه‌تر شدن زمان WOC و ادامه سریع‌تر حفاری می‌شود. شکل (٤) نشان‌دهنده تغییرات استحکام تراکمی دوغاب‌های طراحی شده با توزیع دانه‌بندی شماره ۱و۲ با سایر تکنولوژی‌ها می‌باشد. با استناد به نمودارهای ذیل و با توجه به ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مواد به‌کار رفته در سیمان Blend پژوهشگاه استحکام تراکمی سنگ سیمان حاصله در دماهای $^{\circ}F$ ۱۹۰ تا $^{\circ}F$ ۲۲۰ تغییر محسوسی پیدا نخواهد کرد. همچنین افزایش استحکام تراکمی دوغاب‌های سیمان سبک با روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲ به‌دلیل بهبود توزیع اندازه ذارات تشکیل‌دهنده دوغاب سیمان می‌باشد.



شکل ٤- مقایسه تغییرات استحکام تراکمی ۲٤ ساعته دوغاب‌های سیمان طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت

Archive of SID
www.SID.ir

آب آزاد

آب آزاد دوغاب‌هـا مطابـق با روش اسـتاندارد API جهت نشان‌دادن پایداری دوغاب‌ها در محدوده وسیعی از چگالی‌ها اندازه‌گیری شـده اسـت. بر اسـاس نتایج بدسـت 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

سیسـتم جدید دوغاب‌های سـبک وزن به‌گونه‌ای طراحی شـده اند که در تمامی محـدوده های وزنی دارای خواص رئولوژیکی مطلوبی هستند. کلیه دوغاب‌ها دارای خاصیت تیکسـوتراپیک بـوده و بـا اسـتفاده از پراکنده سـازها از ویسـکوزیته کمی برخوردار هسـتند. خواص رئولوژیکی دوغاب‌های سیمان سـبک که دارای مقاومت تراکمی قابل قبولـی بوده‌اند درجداول ۵ و ٦ نشـان داده شـده اسـت. تست‌های رئولوژیکی با استفاده از دستگاه Fann ۳۵ و مطابق با روش استاندارد API انجام شده است.

نفوذپذیری و تخلخل

مقادیر نفوذ پذیری و تخلخل دوغاب سیمان طراحی شده بر اسـاس استاندارد API و با فشار جانبی ۳۰۰۰ psi در واحد پژوهش مغزه‌های نفتی پژوهشگاه صنعت نفت اندازه‌گیری شـده اسـت. نتایج به‌دسـت آمده از این آزمایشات نشان می‌دهد که فرمولاسـیون دوغاب سیمان با توزیع دانه‌بندی شماره دو پژوهشگاه به مراتب بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد و با افزایـش وزن دوغاب، مقادیر تخلخـل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. مقادیر مختلف تخلخل و تراوایی سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت، در وزن‌های مختلف در شکل‌های ۵ و ٦ نشان داده شده است.

مهاجرت گاز

گاز می‌توانـد تا زمانی که دوغاب سـیمان حالت ژله‌ای داشـته، یا وزن حجمی آن به خوبی طراحی نشـده باشد و افت صافـی و کاهش حجم آن زیاد باشـد، مهاجرت نمایـد. در این‌گونه مـوارد، افزودنی‌های خـاص مانند کاهنده‌هـای نفوذپذیری و منبسـط کننده‌ها می‌توانند در توقـف ورود گاز به فضای حلقـوی چاه و مهاجرت آن مفید باشـند. در مرحله دوم، ژلگی دوغاب، با جلوگیری از انتقال فشـار هیدرواستاتیکی فشـار را در مقابل منطقه گازدار کاهـش می‌دهـد. دوغاب‌هایی مناسـب 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.

جدول۵- خواص رئولوژیکی دوغاب‌های طراحی شده به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۱

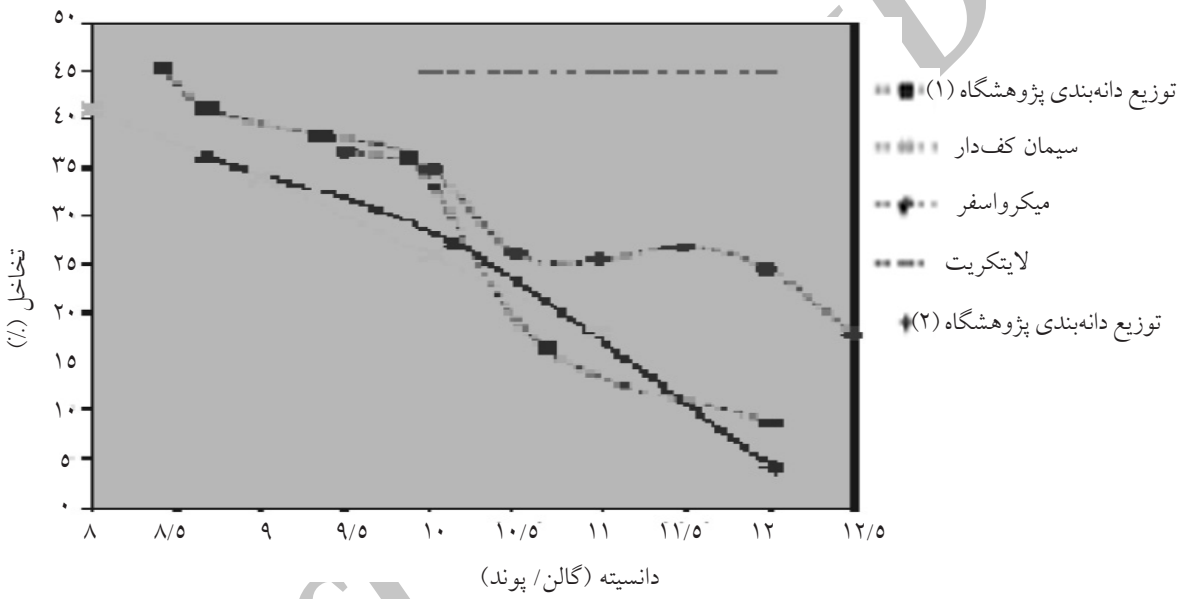
دور بر دقیقه	۸/۲۸ پوند بر گالن	۸/۵۵ پوند بر گالن	۹/۳۵ پوند بر گالن	۹/۸۹ پوند بر گالن	۱۰/٦۹ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
	قرائت عقربه					
θ ٦۰۰	۷٦	۵۳	۷٤	٦۳	۷۳	۹۸
θ ۳۰۰	٤۰	۳۰	٤۵	۳۹	٤۵	۵۹
θ ۲۰۰	۳۰	۲۱	۳۳	۲۹	۳۳	٤۱
θ ۱۰۰	۱۸	۱۲	۲۳	۲۰	۲۲	۲۷
θ ٦	۸	۵	۱۲	۹	۱۰	۱۱
θ ۳	۷	٤	۱۳	۱۰	۱۱	۱۲
گرانروی ظاهری (cP)	۳۸	۲٦/۵	۳۷	۳۱/۵	۳٦/۵	٤۹
گرانروی خمیری (cP)	۳۳	۲۷	۳۳	۲۸/۵	۳٤/۵	٤۸
نقطه واروی ($lb/100ft^2$)	۷	۳	۱۲	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۱

Archive of SID

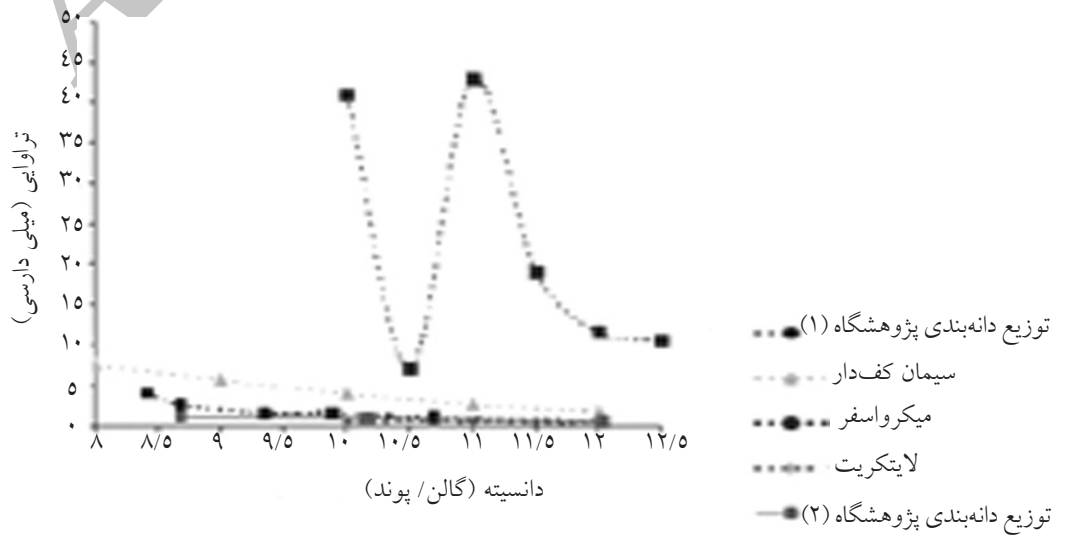
www.SID.ir

جدول٦- خواص رئولوژیکی دوغاب‌های طراحی شده به روش توزیع دانه‌بندی شماره ۲

دور بر دقیقه	۸/٦۸ پوند بر گالن	۱۰/۱٦ پوند بر گالن	۱۲/۰۳ پوند بر گالن
	قرائت عقربه		
θ ٦۰۰	+۳۰۰	+۳۰۰	+۳۰۰
θ ۳۰۰	۱۵۵	۲۱۵	۲٤۳
θ ۲۰۰	۱۱۰	۱۵۲	۱۷٤
θ ۱۰۰	٦۲	۸٦	۹۷
θ ٦	۷	۱۰	۱۰
θ ۳	٤	۵	٦
گرانروی ظاهری (cP)	+۱۵۰	+۱۵۰	+۱۵۰
گرانروی خمیری (cP)	۱۳۹/۵	۱۹۳/۵	۲۱۹
نقطه واروی ($lb/100ft^2$)	۱۵/۵	۲۱/۵	۲٤



شکل۵- مقایسه مقادیر تخلخل در وزن‌های متفاوت برای سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت



شکل٦- مقایسه مقادیر نفوذپذیری در وزن‌های متفاوت برای سیمان‌های طراحی شده با تکنولوژی‌های متفاوت

Archive of SID
www.SID.ir

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 ($P=5000psi, T=94^{oC}$) توانایی مقابله با مشکلات احتمالی سازند بالاخص جلوگیری از نفوذ سیال به‌داخل فضای حلقوی را داشته باشد، دوغاب‌های سیمان مختلفی با استفاده از سیمان کلاس G کرمان تهیه شد و آزمایشات لازم برروی 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 به‌کار گرفته شده در این مقاله به‌صورت 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، به‌صورت 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 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. خصوصا در سیمان‌های شور به‌دلیل 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.

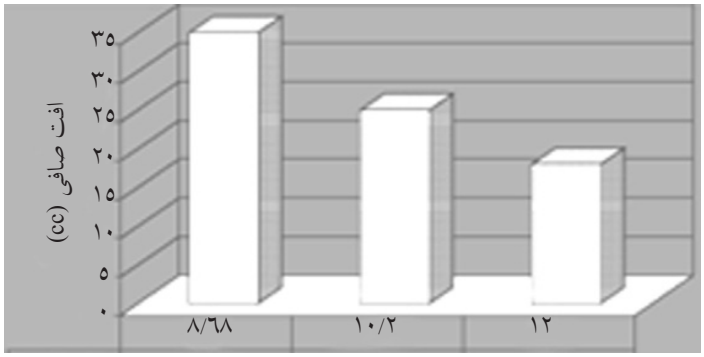
– زمان نیم‌بندش دوغاب باید در حالت ایده‌آل و مطلوب باشد. لازم به ذکر است که سرعت غیر نرمال در بندش، و یا تاخیر غیر عادی در زمان بندش و یا تاخیر غیرعادی در زمان بندش، اشکالات متعددی در عملیات سیمان‌کاری ایجاد می‌کند.

– 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.

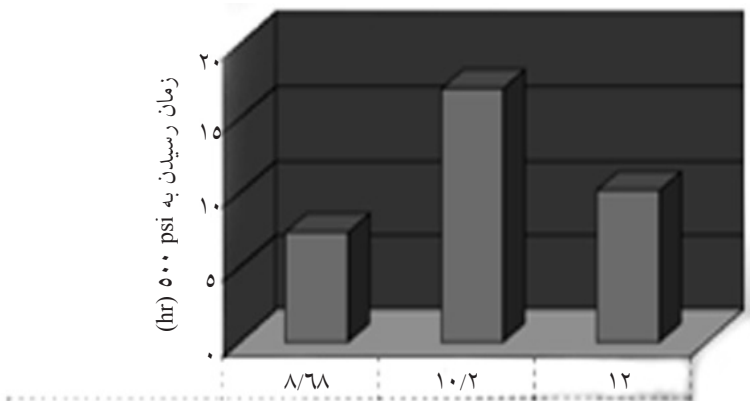
– زمان انتقال از حالت سیالیت به جامد شدن حداقل باشد.

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



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

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸- مقادیر زمان رسیدن به استحکام تراکمی psi ۵۰۰ در وزن‌های متفاوت (با توزیع دانه‌بندی شماره۲ در دمای F° ۱۹۰)

شکل۹- مقادیر زمان بندش در وزن‌های متفاوت (با توزیع دانه‌بندی شماره ۲ در دمای F° ۲۰۰)

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین مزایای دوغاب طراحی شده توسط این تکنولوژی در مقایسه با دوغاب‌های مشابه سنتی را می‌توان به شرح ذیل عنوان نمود.

۱- استحکام تراکمی خیلی بالا psi ۲۰۰۰و psi ۴۰۰۰ 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

۴- تخلخل ۳۶٪ و نفوذپذیری ۰/۰۱ میلی دارسی 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

Archive of SID

www.SID.ir

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]. Benge 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.

Archive of SID

www.SID.ir