Archive of SID

بررسی تأثیر اندازه و سطح ویژه دانه‌های تشکیل دهنده سیمان بر روی خواص دوغاب و سنگ سیمان چاه‌های نفت و گاز

علی حسنی*، سید محمدجواد مجتهدی و سید علیرضا مرتضوی
پژوهشکده مهندسی نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پردیس پژوهش بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

پژوهش نفت
سال بیست و چهارم
شماره ۷۹
صفحه، ۷۱-۶۳ ۱۳۹۳
تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۶/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۶/۶

چکیده

در تحقیق حاضر یک فرمولاسیون اصلاح شده جدید جهت ساخت و تولید سیمان کلاس G چاه‌های نفت ارائه گردیده است. از آنجایی که سیمان‌های تولیدی کشور فاقد رئولوژی، زمان بندش و همچنین مقاومت مناسب می‌باشند لذا یک فرمولاسیون جدید جهت ساخت این سیمان در مقیاس آزمایشگاهی ارائه گردید [۱]. کلینکر مورد استفاده با استفاده از سرندهای آزمایشگاهی به اجزای مختلف با اندازه‌های متنوع طبقه‌بندی شده و در نهایت با درصد مشخصی از گچ مخلوط و سیمان مورد نظر آماده‌سازی گردید. سیمان آماده‌سازی شده یک محصول غیریکنواخت و دانه درشت‌تر نسبت به سیمان‌های موجود بوده و ۵۰٪ ذرات تشکیل دهنده آن در محدوده ۳ تا ۳۰ μ قرار گرفته‌اند که در مقایسه با سیمان‌های استاندارد کاهش ۲۰ تا ۳۰٪ در محدوده مورد نظر را دارا می‌باشد. علیرغم وجود خصوصیات رئولوژیکی مناسب، سازگاری با افزایه‌های مختلف، زمان بندش مطلوب و همچنین کاهش آب مصرفی دوغاب به اندازه ۱۰٪ که منجر به استحکام تراکمی ۲۴ ساعته بالاتر سیمان نسبت به سیمان‌های معمولی می‌شد از دیگر ویژگی‌های این نوع سیمان می‌باشند؛ اما سیمان مورد نظر به دلیل درشت دانه بودن دارای استحکام تراکمی ۸ ساعته کمتری نسبت به سیمان‌های استاندارد می‌باشد. لذا سیستم تولید این سیمان از حالت تولید با سیستم آسیاب و سرند به تولید کامل با آسیاب‌های گلوله‌ای تغییر یافته و محصولی کاملاً همگن با سطح ویژه یکسان آماده‌سازی شد. نتایج کنترل کیفی سیمان مورد نظر نشان می‌دهد که علاوه بر بهبود تمامی خصوصیات مورد بررسی، با کاهش آب به اندازه ۱۰٪، مقاومت تراکمی ۸ ساعته به اندازه ۲۱٪ نسبت به سیمان‌های استاندارد افزایش یافته است. همچنین این سیستم دارای قابلیت اجرایی کامل در کارخانجات تولیدی داخلی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توزیع دانه‌بندی، سیمان غیریکنواخت، سطح ویژه، استحکام تراکمی، دوغاب سیمان، سازگاری، سیمان دانه درشت، خصوصیات رئولوژیکی، زمان بندش، آسیاب

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی hassania@ripi.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

سیمان چاه نفت نوعی از سیمان پرتلند است که دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشد که تحت تأثیر شرایط مصرف و نوع کاربری این سیمان در اعماق چاه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه همراه با افزایش عمق چاه، درجه حرارت و فشار هیدرواستاتیک افزایش می‌یابد، 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 لوله‌های جداری است، عمل نماید. از سوی دیگر حرارت و فشار بالا می‌تواند دوغاب سیمان را در نیمه راه به قدری سفت کند که پمپاژ دوغاب غیر ممکن خواهد شد. بنابراین زمان بندش دوغاب سیمان چاه نفت نیز باید قابل کنترل باشد. این مسئله در سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد و عدم توجه به آن منجر به تحمل هزینه‌های بسیار زیاد و حتی در بدترین حالت از دست دادن چاه می‌شود.

توزیع اندازه ذرات، فاکتور یکنواختی و سطح ویژه[1]، پارامترهای فیزیکی مهم و تأثیرگذار بر خصوصیات سیمان می‌باشند. با استفاده از پارامترهای ذکر شده، نسبت ذرات ریز و درشت موجود در سیمان تعیین می‌گردد. نسبت‌های به دست آمده، میزان آب مورد نیاز، گیرش سیمان[2] و واکنش‌های هیدراتاسیون را کنترل می‌کنند [۵-۲]. شایان ذکر است که اندازه ذرات اجزاء دارای اهمیت بسیار بالایی در بهبود مقاومت زود[3] و دیر هنگام[4] می‌باشند.

توزیع اندازه ذرات، فاکتور یکنواختی و سطح ویژه، پارامترهای فیزیکی مهم و تأثیرگذار بر خصوصیات سیمان می‌باشند. این پارامترها به نسبت ذرات ریز و درشت موجود در سیمان اشاره می‌کنند. نسبت‌های یاد شده، میزان آب مورد نیاز، گیرش سیمان و واکنش‌های هیدراسیون را کنترل می‌کنند. نسبت‌های مختلف از اندازه ذرات، دارای اهمیت خاصی در تعیین خصوصیات شیمیایی و مکانیکی سیمان می‌باشند. به عنوان مثال، ممکن است فازهای SiO_2، CaO و آهک آزاد در محدوده اندازه ذرات معینی تجمع کرده و منجر به ایجاد ترکیبات مختلف از فازهای سیمانی گردد. اندازه ذرات اجزاء دارای اهمیت بسیار بالایی در بهبود مقاومت زود و دیر هنگام سیمان می‌باشد [۹-۶].

تاکنون تلاش‌های زیادی به منظور ایجاد ارتباط میان توزیع اندازه ذرات یا سطح ویژه سیمان با مقاومت تراکمی آن صورت گرفته است. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که مقاومت سیمان به طور قابل توجهی تحت تأثیر اندازه ذرات در بازه ۳ تا ۳۰ μ قرار گرفته و ذرات بزرگتر از ۶۰ μ تنها دارای خاصیت پرکنندگی بوده و نقش خاصی را در توسعه مقاومت سیمان ایفا نمی‌نمایند. افزایش ذرات خیلی ریز (کوچکتر از ۳ μ) نیز ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در طول گیرش سیمان از قبیل تغییرات حجمی ناخواسته و خصوصیات رئولوژیکی نامطلوب گردد [۱۳-۸].

تحقیق حاضر به تکمیل کار قبلی انجام شده در خصوص ارائه دانه بندی مناسب در تولید سیمان کلاس G می‌پردازد. کلینکر سیمان ابتدا توسط آسیاب گلوله‌ای تا یک سطح ویژه مشخص خرد و سپس به وسیله سرندهای آزمایشگاهی به محدوده‌های متنوع اندازه ذرات طبقه‌بندی شدند. بر اساس نتایج آنالیز لیزری ذرات، ۵۰٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا ۳۰ μ بوده و خصوصیات سیمان طراحی شده نظیر خواص رئولوژیکی، زمان بندش، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و سازگاری با افزایه های کندکننده و کنترل کننده افت صافاب بسیار خوب ارزیابی شد. اما پس از اندازه گیری مقاومت زودهنگام سیمان مورد نظر در دماهای ۱۰۰ و ۱۴۰ °F، مشخص گردید که مقاومت آن نسبت به سیمان‌های استاندارد به دلیل دانه درشت بودن ذرات کمتر می‌باشد. لذا سیستم تولید سیمان از حالت قبلی به آسیاب هم زمان کلینکر و گچ تغییر یافت. سیمان تولید شده یک سیمان غیر یکنواخت بوده که همانند سیمان قبلی ۵۰ ٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا ۳۰ μ قرار دارند. همچنین علاوه بر دارا بودن تمامی خصوصیات سیمان قبلی، مقاومت زودهنگام آن به اندازه ۲۱ ٪ نسبت به سیمان‌های استاندارد افزایش یافته است. مزیت بسیار مهم دیگر این سیمان این است که قابلیت تولید در کارخانجات سازنده سیمان را دارا می‌باشد.

1. Specific Surface Area (SSA)
2. Setting
3. Early Strength
4. Last Strength

www.SID.ir

Archive of SID

طراحی آزمایشات

در تحقیق حاضر، به منظور دستیابی به محدوده ۳ تا μ ۳۰ برای دانه‌بندی سیمان از سه شاخص زیر استفاده شده است:

- ضریب یکنواختی محصول (n)
- پارامتر نرمی یا پارامتر موقعیت (X′)
- سطح ویژه

دو شاخص اول در بحث طراحی دانه‌بندی سیمان و شاخص سوم به عنوان یک پارامتر کنترلی در کارخانجات سیمان مد نظر قرار می‌گیرند. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزایش سطح ویژه سیمان همواره به معنی بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب که ما از آن به عنوان محدوده مؤثر در مقاومت سیمان یاد می‌کنیم، نمی‌باشد. به منظور بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب، اصول زیر به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است [۶]:

- در یک سطح ویژه ثابت از سیمان، هنگامی‌که ضریب یکنواختی افزایش می‌یابد، پارامتر نرمی به طور اتوماتیک کاهش یافته و به جز مقاومت ۲ روزه، مقاومت استاندارد بالاتری را خواهیم داشت، زیرا مقاومت اولیه به شدت تحت تأثیر سطح ویژه می‌باشد.
- در یک ضریب یکنواختی ثابت از سیمان (n ثابت) و یک سطح ویژه یکسان، مقاومت یک سیمان به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامتر نرمی قرار می‌گیرد.
- در ضریب یکنواختی ثابت، با کاهش پارامتر نرمی سطح ویژه افزایش می‌یابد و این بدان معنی است که با افزایش سطح ویژه، سیمان در تمامی ابعاد نرم‌تر شده است و در این راستا مقاومت افزایش می‌یابد.
- در یک پارامتر نرمی ثابت از سیمان، با افزایش ضریب یکنواختی، سطح ویژه کاهش یافته و این نشان‌دهنده آن است که علیرغم یکنواختی ذرات که می‌تواند در بخش درشت دانه (زبره) سیمان متمرکز باشد، به دلیل تثبیت پارامتر نرمی، سطح ویژه کاهش می‌یابد [۸]. با توجه به اهمیت این سه شاخص، تأثیر هر یک از آنها بر مهمترین خواص تر و خشک دوغاب سیمان چاه‌های نفت بررسی می شود. این خواص عبارتند از:

- زمان بندش اتمسفریک دوغاب سیمان
- زمان بندش تحت فشار دوغاب سیمان
- مقاومت فشاری در دمای ۱۰۰ و ۱۴۰ °F
- آب آزاد[1]
- زمان بندش هنگام استفاده از (کند گیرکننده‌ها)[2] و میزان واکنش‌پذیری کندگیرکننده‌ها
- رئولوژی
- نفوذپذیری[3]
- تخلخل[4]

آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور آسیاب مواد از آسیاب آزمایشگاهی از نوع گلوله‌ای[5] استفاده شده است که این سیستم شباهت زیادی به سیستم آسیاب گلوله‌ای مدار باز[6] که در صنعت جهت ساخت سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارد. در آسیاب‌های مدار باز با توجه به اینکه مواد از یک طرف وارد شده و از طرف دیگر از سیستم خارج می‌گردند و هیچ گونه کنترلی روی توزیع اندازه ذرات آنها صورت نمی‌گیرد، لذا این سیمان از لحاظ کیفیت پایین‌تر از محصول تولیدی در آسیاب‌های مدار بسته خواهد بود.

طراحی نحوه آسیاب کردن برای دستیابی به دانه بندی مطلوب

با توجه به تجربیات عملی و مطالعات تئوری، می‌توان دریافت که سیستم آسیاب را باید در جهتی سوق دهیم که میزان ذرات ۳ تا μ ۳۰ را جهت وصول کیفیت بهتر سیمان تولیدی افزایش دهیم. این در حالی است که میزان ذرات تا μ ۳ همواره به طور طبیعی گسترش می‌یابد. هنگامی‌که ضریب یک‌نواختی سیمان به مقادیر نامطلوبی مثل ۰/۷ می‌رسد، کاهش زبره روی الک μ ۹۰ تأثیر زیادی بر روی افزایش درصد ذرات تا μ ۳ خواهد گذاشت، که از این دیدگاه دانه‌بندی مطلوب در مقاومت، پذیرفته نیست. روند تغییرات درصد ذرات ۳ تا μ ۳۰ با کاهش درصد زبره روی الک μ ۹۰ برای توزیع دانه‌بندی مطلوب‌تر

1. Free Water
2. Retardey
3. Permeability
4. Porosity
5. Ball Mill
6. Open Circuit Grinding Ball Mill

www.SID.ir

Archive of SID

(۱<n <۱/۲) به مراتب بالاتر از دانه بندی نامطلوب‌تر ۰/۷ است [۱].

مطالعه صورت گرفته قبلی به این ترتیب است که در ابتدا سیمان‌های استاندارد خارجی نظیر سیمان‌های نروژ و دایکرهاف به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و خواص دانه‌بندی آنها از قبیل ضریب یکنواختی، پارامتر نرمی و سطح ویژه سیمان مشخص گردید. ضریب یکنواختی سیمان‌های مذکور بین ۱/۱۱ تا ۱/۱۹ بوده و سطح ویژه آنها از ۳۲۵۰ تا ۳٤٥۰ cm^2/gr متغیر می‌باشد. اما اکثر سیمان‌های تولیدی داخل کشور دارای پارامتر نرمی بالاتر و ضریب یکنواختی کمتر می‌باشند. همچنین بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته، بهترین محدوده برای افزایش دانه‌بندی مطلوب از سطح ویژه ۳۰۰۰ cm^2/gr تا ٤۰۰۰ cm^2/gr است و از سطح ویژه ۵۰۰۰ cm^2/gr به بعد عملاً درصد ذرات مطلوب ۳ تا μ ۳۰ کاهش می‌یابد. حتی در یک ضریب یکنواختی ثابت از سیمان و یک سطح ویژه یکسان، مقاومت استاندارد به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامتر نرمی قرار می‌گیرد [٦].

سپس با استفاده از دستگاه اندازه گیری توزیع دانه‌بندی به روش لیزری مدل سیمپاتیک به اندازه‌گیری خواص سیمان‌های تولید داخل پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضریب یکنواختی سیمان‌های مذکور بین ۰/۹۸ تا ۱/۰۱ بوده و سطح ویژه آنها از ۳۰۰۰ تا ٤۰۰۰ cm^2/gr متغیر می‌باشد. اگر چه این مقادیر برای یک سیمان معمولی مطلوب است اما نحوه توزیع دانه‌بندی آن در مقایسه با نمونه‌های خارجی برای یک سیمان چاه نفت مناسب نیست. برای حل این مشکل و جهت دستیابی به مقاومت بالاتر، پارامتر نرمی باید کاهش داده شود. همچنین در صورتی‌که ضریب یکنواختی این سیمان کمی افزایش یابد و به حدود ۱/۲ نزدیک شود، خواص رئولوژیکی آن نیز بهبود می‌یابد.

در گام بعدی یک نرم‌افزار به منظور اندازه‌گیری تخلخل بین دانه‌ای سیمان توسعه داده شد. نحوه عملکرد این نرم‌افزار بدین صورت است که ابتدا محدوده اندازه ذرات به همراه درصد مورد انتظار و اندازه ظرف دربرگیرنده ذرات، به عنوان ورودی نرم‌افزار وارد می‌شوند سپس ظرف در برگیرنده که در ابتدا توسط ذرات درشت‌تر که اندازه آنها به وسیله کاربر مشخص شده جای‌گذاری شده و فضای خالی مابین آنها با استفاده از ذراتی با سایز متوسط و ریز پُر می‌شود. در مرحله بعدی درصدبندی وارد شده اصلاح و درصد تخلخل بین ذرات در حالت دو بعدی یا سه بعدی که توسط کاربر انتخاب می‌شود، محاسبه شده و نحوه چینش ذرات به صورت گرافیکی نمایش داده می‌شود. سپس با استفاده از درصدبندی‌های استخراج شده و کلینکرهای طبقه‌بندی شده با استفاده از سرندهای آزمایشگاهی سیمان مورد نظر که مخلوطی از کلینکر و گچ است آماده شد و در نهایت خصوصیات آن نظیر وزن، خواص رئولوژیکی، اندازه‌گیری مقاومت تراکمی در دمای ۱۰۰ و ^oF ۱٤۰ به مدت ۸ و ۲٤ ساعت و زمان بندش تعیین می‌شود. خصوصیات سیمان طراحی شده با خصوصیات سیمان‌های استاندارد خارجی مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده گردید که سیمان طراحی شده از خواص رئولوژیکی و مقاومت تراکمی بهتری نسبت به سیمان‌های خارجی برخوردار است. همچنین زمان بندش این سیمان در محدوده استاندارد قرار داشت. توزیع اندازه ذرات در سیمان طراحی شده به گونه‌ای است که در حدود ۵۰٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا μ ۳۰ قرار گرفته‌اند. این در حالی است که میزان محدوده مورد نظر در اکثر سیمان های موجود در صنعت بالاتر از ۷۰٪ می‌باشد. در این صورت انرژی کمتری جهت تولید سیمان با دانه بندی غیر یکنواخت طراحی شده مورد نیاز خواهد بود. میزان آب موجود در سیستم به دلیل خاصیت روانی بالای سیمان تا ۱۰٪ کاهش داده شد که علاوه بر افزایش مقاومت تراکمی، سیمانی سنگین بدون استفاده از افزایه‌های وزن افزا تولید گردد. همچنین سیمان طراحی شده از سازگاری بسیار خوبی با افزایه‌های کنترل کننده افت صافاب و کندگیرکننده برخوردار بود.

بررسی اجرایی بودن سیستم تولید سیمان طراحی شده و ارائه راهکار جدید

فرمولاسیون نهایی ارائه شده (سیستم آسیاب و طبقه‌بندی اندازه ذرات توسط الک‌های آزمایشگاهی) در آزمایشگاه

www.SID.ir

Archive of SID

سیمان اداره حفاری مناطق نفت‌خیز جنوب مورد ارزیابی قرار گرفت که این سیمان از خصوصیات رئولوژیکی عالی و زمان نیم‌بندش قابل قبولی برخوردار بوده اما مقاومت زود هنگام (مقاومت ۸ ساعته در دماهای ۱۰۰ و ۱٤۰ °F) آن نسبت به سیمان کرمان پائین‌تر بود. علت این امر، دانه‌بندی غیریکنواخت سیستم و درشت دانه بودن سیمان می‌باشد. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، به منظور حصول مقاومت زود هنگام می‌بایست آسیاب به گونه‌ای مهندسی و تنظیم گردد که اولاً محدوده اندازه ذرات کمتر بوده (دانه‌بندی یکنواخت) و ثانیاً درصد اندازه ذرات واقع در محدوده ۳ تا ۳۰ µ بیشترین مقدار (به‌طور معمول بیشتر از ۸۰٪) را به خود اختصاص دهد که در این صورت انرژی بیشتری جهت تولید سیستم مذکور صرف خواهد شد. چنانچه سیمان به صورت غیریکنواخت بوده و از دانه‌بندی درشت‌تری نسبت به سیستم مذکور برخوردار باشد، مقاومت دیر هنگام سیستم (۲٤ ساعته و بالاتر) به دلیل هیدراسیون کامل در طول زمان بیشتری اتفاق خواهد افتاد.

از این‌رو، جهت دستیابی به سیستمی که حالت ایده آل (دارا بودن مقاومت زود هنگام نزدیک به سیمان کرمان و مقاومت نهایی بیشتر از آن) را دارا باشد، سیستم تولید از حالت آسیاب جداگانه کلینکر و گچ به حالت آسیاب همزمان تغییر یافت که این سیستم فواید بیشتری را دارا می باشد. یکی از مهمترین فواید این سیستم، قابلیت اجرایی آن در کارخانجات تولیدی است. همچنین سرعت تولید این سیستم در مقایسه با سیستم قبلی افزایش یافته است. از آنجاییکه نمونه پس از خروج از آسیاب آماده انجام آزمایش بوده و همچنین میزان هواگیری سیمان در مقایسه با روش الک کردن کمتر است، لذا سرعت تولید بسیار بیشتری را خواهیم داشت. از دیگر مزیت‌های روشن و قابل دفاع این سیستم، تولید محصولی همگن می‌باشد چرا که گچ مورد استفاده به خوبی در کلینکر سیمان پخش شده است.

ارائه فرمولاسیون بهینه و انجام آزمایشات کنترل کیفی

آسیاب مطابق آنچه قبلاً ذکر شد، آماده و خوراک ورودی آن (مخلوط کلینکر و گچ) مطابق برنامه از پیش تعیین شده در درون محفظه‌های مربوطه قرار داده شد. محصول نهایی پس از خنک شدن برای انجام آزمایش‌های کنترل کیفی به آزمایشگاه سیمان منتقل گردید. درصدهای مختلفی از کلینکر و سیمان در طول ۱۰ آزمایش مختلف مورد آنالیز قرار گرفت و در نهایت فرمولاسیون دارای خصوصیات مورد نظر انتخاب گردید. آنالیز توزیع اندازه ذرات سیمان مذکور نشان می‌دهد که درصد ذرات واقع در محدوده ۳ تا ۳۰ µ برای نمونه مورد نظر در حدود ٥٦٪ بوده و از درصد یکنواختی کمتری (۰/۹٪ در مقایسه با درصد یکنواختی برابر ۱/۰۱٪ برای سیمان کرمان) نسبت به سیمان‌های استاندارد برخوردار است. پس می‌توان نتیجه گرفت که سیمان مذکور هم به طور قابل ملاحظه‌ای درشت دانه‌تر و هم محدوده وسیع‌تری از اندازه ذرات را داراست و همچنین تولید آن نسبت به سیمان‌های استاندارد موجود، بسیار به صرفه‌تر است.

نتایج آزمایش‌های کنترل کیفی سیمان مذکور در ادامه آورده شده است:

خصوصیات رئولوژیکی: جدول ۱ نشان‌دهنده این است که سیمان طراحی شده دارای حالت سیالی بسیار خوبی نسبت به سیمان کرمان می‌باشد (جدول ۱).

زمان بندش[1] نمونه مورد نظر برابر ۱۲٤ min می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات رئولوژیکی فرمولاسیون نهایی

θ_{600}	θ_{300}	θ_{200}	θ_{100}	θ_6	$*\theta_3$	ویسکوزیته پلاستیک[3] (cP)	نقطه واروی[2] ($lb/100\ ft^2$)
۸۰	٥۲/٥	٤٥	۳٥	۱۸	۱۲	۲٦/۲٥	۲٦/۲٥

* θ_n: انحراف عقربه ویسکومتر در دور n (n= ۳، ٦، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ٦۰۰).

1. Thickenig Time
2. Yield Pint (Y.P.)
3. Plastic Viscosity (P.V.)

www.SID.ir

Archive of SID

اندازه‌گیری استحکام تراکمی ۸ ساعته (زودهنگام)

نتایج حاصل نشـــان می دهد که ســـیمان طراحی شده به صورت همگن و دارای قابلیت تکرارپذیری است. مقاومت این ســـیمان در دمای ۱۰۰ °F در محدوده استاندارد و قابل قبول اســـت. در گام بعدی، مقاومت زود هنگام سیمان در دمـــای ۱۴۰ °F مورد ارزیابی قـــرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

از آنجایی‌که ســـیمان مذکور نسبت به ســـیمان کرمان دانه درشـــت تر و از یکنواختی کمتری برخوردار اســـت، لذا جذب آب کمتری به دلیل سطح ویژه کمتر نسبت به سیمان دانه ریز داشـــته و حالت سیالی بیشتری خواهد داشت. در حالت مذکور، میزان آب موجود در سیســـتم افزایش یافته و مقاومـــت زود هنگام به دلیل پدیده هیدراســـیون ناقص کاهش می یابد. چنانچه بتوان آب موجود در سیستم جدید را کاهـــش داد به گونه ای که رئولـــوژی در محدوده قابل قبول قرار داشـــته باشـــد، مقاومت زود هنگام نیز افزایش خواهد یافت.

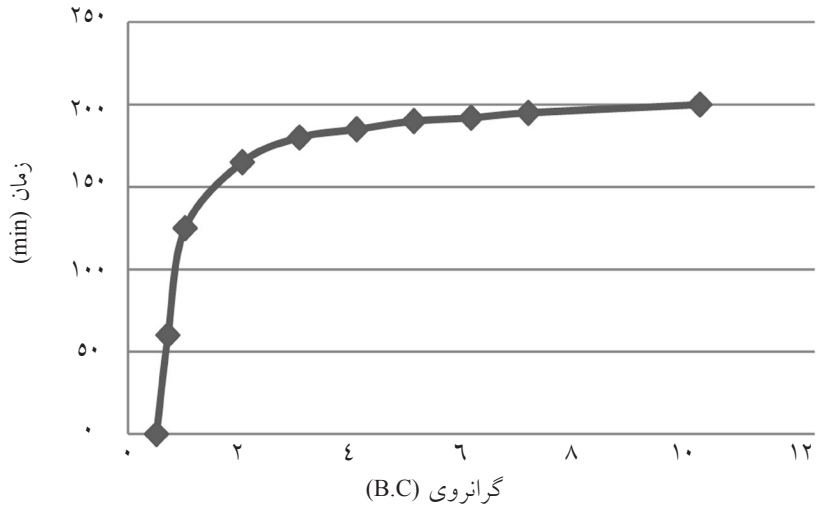
بررسی سازگاری سیمان با افزایه‌های مختلف

در این بخـــش از افزایه‌های کنترل کننـــده افت صافاب و کندگیرکننده اســـتفاده گردید تا میزان سازگاری سیمان با آنها مورد بررسی قرار گیرد. در این بررسی از فرمول ارائه شده توسط مناطق نفت خیز جنوب برای سیمان استاندارد کلاس G استفاده شده است. نمونه پس از عمل آوری، در دستگاه Atmospheric Consistometer تحت دمای ۱۸۵ °F (۸۵ °C) جهت انجام تست در دســـتگاه مذکور قرار داده شد و زمان‌های رسیدن به گرانروی‌های مختلف در واحد B.C.[1] به عنوان خروجی تست، در شکل ۱ نشان داده شده است.

نمونه مورد نظر از سازگاری بسیار خوبی در برابر افزایه‌های مذکور برخوردار اســـت به طوری‌که طبق اســـتاندارد ارائه شده، زمان رسیدن به گرانروی‌های ۷ و ۱۰ B.C. می‌بایست از ۱۵۰ min بیشـــتر باشد و فرمولاسیون ارائه شده نیز این شرط را برآورده می‌سازد.

جدول ۲- مقاومت تراکمی۸ ساعته سیمان کرمان و سیمان طراحی شده

نمونه	مقاومت تراکمی در دمای ۱۰۰ °F (psi)	مقاومت تراکمی در دمای ۱۴۰ °F (psi)
سیمان کرمان	۵۴۲	۱۴۴۲
سیمان طراحی شده	۶۴۰	۱۳۷۵



شکل ۱- نمودار توسعه گرانروی سیمان طراحی شده در دمای ۱۸۵ °F و فشار ۱ atm

1. Beurden of Consistency

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش میزان آب مورد نیاز سیستم به منظور بهبود مقاومت زودهنگام

همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، فرمولاسیون ارائه شده از رئولوژی بسیار خوبی برخوردار می‌باشد به‌طوری‌که می‌توان میزان آب مورد نیاز سیمان را به منظور دست‌یابی به مقاومت‌های زود هنگام کاهش داد. بدین منظور، نمونه کلینکر هوازده مورد استفاده قرار گرفت. جالب توجه است که تنها خصوصیات رئولوژیکی سیمان تولیدی با سیمان قبلی برابر بوده و تفاوت‌های فاحشی در زمان نیم‌بندش و مقاومت آن مشاهده می‌گردد. زمان نیم‌بندش نمونه سیمان مورد نظر پس از دو بار آزمایش برابر ۱۸٤ min می‌باشد در صورتی‌که این پارامتر برای نمونه قبلی، ۱۲٤ min بوده است. نتایج مقاومت تراکمی ۸ ساعته در دمای ۱٤۰ °F برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان در جدول ۳ آورده شده است.

به دلیل کمبود نمونه استاندارد کلینکر، سعی گردید تا برنامه کاهش آب سیمان به میزان‌های مختلف ۱۰ و ۱۵٪ با کلینکر جدید انجام شود. از آنجائی‌که کیفیت این کلینکر پایین می‌باشد، نتایج آن تنها به دلیل در اختیار داشتن یک حالت مقایسه‌ای و اطمینان از روند کاهش مقاومت سیمان در ازای کاهش آب نسبت به حالت استاندارد (استاندارد API) مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، نتایج زمان نیم بندش و استحکام تراکمی سیمان عمل‌آوری شده در دمای ۱٤۰ °F آورده شده است:

بر اساس استاندارد API، حداقل میزان استحکام تراکمی برای سیمان کلاس G در دمای ۱٤۰ °F برابر ۱۵۰۰ psi گزارش شده است [۱٤]. لذا، نمونه‌های مذکور فاقد استحکام تراکمی قابل قبول می باشند. نکته جالب توجه این آزمایش، افزایش میزان استحکام تراکمی از نسبت آب به سیمان W/C =۰/٤٤ به نسبت W/C =۰/۳۷۵ می‌باشد. زمان نیم بندش برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان در جدول ٤ آورده شده است.

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، کاهش آب مورد نیاز سیستم تا ۱۵٪ باعث کاهش زمان نیم‌بندش به میزان ۵٦ دقیقه (حدود ۱ ساعت) می‌گردد. شایان ذکر است که رئولوژی نمونه‌های به عمل آوری شده (حتی در نسبت W/C=۰/۳۷۵) در شرایط خوبی قرار داشته و ویسکوزیته آن به میزان کمی افزایش نشان داده است که می‌توان از آن به عنوان نقطه قوت فرمولاسیون ارائه شده یاد کرد. با توجه به محدود بودن میزان نمونه با کیفیت، نسبت آب به سیمان ۰/۳۹٦ با ۱۰ درصد کاهش آب به منظور تست استحکام تراکمی در نظر گرفته شد که میزان استحکام تراکمی میانگین آن (استحکام تراکمی ۸ ساعته در دمای ۱٤۰ °F) برابر با ۱۷۵۰ psi می باشد. میزان استحکام تراکمی میانگین برای نمونه مورد نظر با ۱۰٪ کاهش آب به اندازه ٤۰۰ psi (۲۱٪) نسبت به حالت استاندارد (W/C = ۰/٤٤) افزایش یافته است که زمان بندش نمونه مورد نظر برابر ۹۷ min می‌باشد. بنابراین می‌توان از فرمولاسیون با نسبت مطرح شده جهت تولید استفاده کرد که هم مقاومت بالایی را ایجاد کرده و هم از رئولوژی و زمان بندش بسیار خوبی نسبت به سیمان کرمان برخوردار است.

جدول ۳- مقاومت تراکمی۸ ساعته سیمان طراحی شده در نسبت‌های مختلف آب به سیمان

نسبت وزنی آب به سیمان / نمونه شماره	مقاومت تراکمی ۸ ساعته (psi) W/C= ۰/٤٤	مقاومت تراکمی ۸ ساعته (psi) W/C =۰/۳۹٦	مقاومت تراکمی ۸ ساعته (psi) W/C= ۰/۳۷۵
۱	۱۰۲۵	۱۲۵۰	۱۳۷۵
۲	۱۰۵۰	۱۲۷۵	۱۵۰۰

جدول ٤- زمان نیم‌بندش سیمان طراحی شده با نسبت‌های مختلف وزنی آب به سیمان

نسبت آب به سیمان	W/C = ۰/٤٤	W/C = ۰/۳۹٦	W/C = ۰/۳۷۵
زمان نیم بندش (min)	۱۸٦	۱۵۰	۱۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

یک سیمان کلاس G با توزیع غیر یکنواخت با تغییر سیستم تولید از حالت آسیاب و سرند به آسیاب همزمان کلینکر و گچ طراحی و ارائه شد.

– توزیع اندازه ذرات در سیمان طراحی شده به گونه ای است که در حدود ۵۰٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا ۳۰ μ قرار گرفته‌اند. این در حالی است که میزان محدوده مورد نظر در اکثر سیمان‌های موجود در صنعت بالاتر از ۷۰٪ می‌باشد. همچنین انرژی لازم جهت تولید سیمان با دانه‌بندی غیر یکنواخت نسبت به سیمان‌های استاندارد کمتر می‌باشد.

– مقاومت زودهنگام سیمان تولید شده با سیستم آسیاب و سرند در دماهای ۱۰۰ و ۱۴۰ °F به دلیل دانه درشت بودن نسبت به سیمان‌های استاندارد کمتر می‌باشد. لذا سیستم تولید از حالت آسیاب و سرند به آسیاب همزمان کلینکر و گچ تغییر یافت.

– سیمان طراحی شده علاوه بر دارا بودن تمامی خصوصیات سیمان قبلی نظیر خصوصیات رئولوژیکی و زمان بندش مناسب، مقاومت زودهنگام آن به اندازه ۲۱٪ نسبت به سیمان‌های استاندارد افزایش یافته است.

– به دلیل داشتن خاصیت روانی بالای سیمان طراحی شده، میزان آب موجود در سیستم تا ۱۰٪ کاهش داده شد که علاوه بر افزایش مقاومت تراکمی، سیمانی سنگین بدون استفاده از افزایه‌های وزن افزا ایجاد گردید. همچنین سیمان طراحی شده با سیستم جدید از سازگاری بسیار خوبی با افزایه‌های کنترل کننده افت صافاب و کندگیرکننده برخوردار بوده به‌طوری‌که ملزومات استاندارد API را برآورده می‌سازد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله موارد امتنان خود را از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران به جهت حمایت از تحقیقات منتهی به این نتایج، اعلام می‌دارند.

مراجع

[۱]. حسنی ع.، منوریان م. ر.، طراحی و بهینه‌سازی دانه‌بندی غیریکنواخت سیمان حفاری به منظور دستیابی به خواص مطلوب دوغاب و سنگ سیمان، مجله پژوهش نفت، ۱۳۹۱.

[2]. Bensted J. and Shaunak R., *Early hydration of class G oilwell cement*, Proc. 11th Int. conf. Cem. Microsc., New Orleans, pp. 198-224, 1989.

[3]. Lota J. S., Bensted J. and Pratt P. L., "*Characterisation of an unhydrated class G oil well cement*", L' Industrial Italiana del Cementom, No. 729, pp. 172-183, 1998.

[4]. Bullard J. W., Jennings H. M. and Livingson R. A., "*Mechanism of cement hydration", J*ournal of Cement and Concrete Research, Vol. 41, pp. 1715-1731, 2010.

[5]. Zhang J., Weissinger E. A. and Peethamparan S., "*Early hydration and setting of oil well cement*", Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1023-1033, 2010.

[6]. Bentz D. P., Garboezi E. J., Haecker C. J. and Jensen O. M., "*Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement based materials*", Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1663-1671, 1999.

[7]. Celick I. B., "*The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development*", Journal of Powder Technology, Vol. 188, pp. 272-276, 2009.

[8]. Bye G. C., *Portland cement: composition, production and properties*, Pergamon Press, UK, 1999.

[9]. Tsivilis S., Tsimas S., Benetatou E. and Haniotakis E., "*Study on the contribution of the fineness on cement*

www.SID.ir

Archive of SID

strength", ZKG 1, pp. 26-29, 1990.

[10]. Sprung S., Kuhlmann K. and Ellerbrock H. G., "*Particle size distribution and properties of cement*", Part 1: strength of Poetland cement, ZKG 6, pp. 136-145, 1985.

[11]. Ellerbrock H. G., Sprung S. and Kuhlmann K., "*Particle size distribution and properties of cement*", Part 3: Influence of grinding process, ZKG 3, pp. 275-281, 1990.

[12]. Sprung S., Kuhlmann K. and Ellerbrock H. G., "*Particle size distribution and properties of cement*", Part 2: Water demand of portland cement, ZKG 9, pp. 275-281, 1985.

[13]. Lawrence C. D., "*The constitution and specifications of Portland cements*", in: C. Hewlett Peter (Ed.), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, John Wiley&Sons, New York, pp. 131-188, 1998.

[14]. American Petroleum Institute, *Specification for materials and testing for well cements' API specification 10A*, American Petroleum Institute,Washington D.C., 1995.

www.SID.ir