طراحی و بهینه‌سازی دانه‌بندی غیریکنواخت سیمان حفاری به منظور دست‌یابی به خواص مطلوب دوغاب و سنگ سیمان

علی حسنی* و محمدرضا منوریان
پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پژوهشکده مهندسی نفت
hassania@ripi.ir

پژوهش نفت
سال بیست و سوم
شماره ۷۵
صفحه ۴۸-۴۰ ۱۳۹۲
تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۴/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۱/۱۶

چکیده

در تحقیق حاضر، ویژگی‌های یک فرمولاسیون پیشنهادی جهت ساخت و تولید سیمان کلاس G چاه نفت ارائه گردیده است. سیمان‌های تولیدی مورد استفاده در چاه‌های نفت کشور فاقد رئولوژی، زمان بندش و همچنین مقاومت مناسب می‌باشند. آنچه در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، تأثیر تغییرات توزیع دانه‌بندی به عنوان عامل مهم و اساسی بر روی خواص مهم سیمان نظیر خصوصیات رئولوژیکی، استحکام تراکمی، زمان بندش و همچنین سازگاری سیمان طراحی شده با افزایه‌های مورد مصرف در فرمولاسیون سیمان مانند کندکننده‌ها و افزایه کنترل کننده افت صافی می‌باشد. سیمان ارائه شده یک محصول غیریکنواخت و دانه درشت‌تر نسبت به سیمان‌های موجود بوده و ۵۰٪ ذرات تشکیل دهنده آن در محدوده ۳-۳۰ میکرون قرار گرفته‌اند، در صورتی‌که در سیمان‌های استاندارد موجود این مقدار بیشتر از ۷۰ ٪ می‌باشد. سیمان حاصل دارای خصوصیات رئولوژیکی مناسب بوده و انرژی کمتری برای تولید آن مورد نیاز است. همچنین میزان آب مصرفی دوغاب نیز به اندازه ۱۰ ٪ کاهش یافته تا استحکام تراکمی بالاتری نسبت به سیمان‌های معمولی حاصل شود. با توجه به اینکه افزودن افزایه‌های اضافی باعث افزایش هزینه در تولید سیمان سنگین می‌شود، سیمان ارائه شده به گونه‌ای طراحی شده است که بدون استفاده از افزایه‌های وزن افزا، سیمان سنگین به دست آید.

واژه‌های کلیدی: توزیع دانه‌بندی، سیمان غیریکنواخت، سطح ویژه، استحکام تراکمی، دوغاب سیمان

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 افزایش عمق چاه، درجه حرارت و فشار هیدرواستاتیک افزایش می‌یابد، لذا سنگ سیمان حاصل از دوغاب باید دارای مقاومت فشاری بالایی باشد تا بتواند فشار سازند

Archive of SID
www.SID.ir

را تحمل نماید. از سوی دیگر حرارت و فشار بالا می‌تواند دوغاب سیمان را در نیمه راه به‌قدری سفت کند که پمپاژ دوغاب غیر ممکن شود. بنابراین، زمان بندش دوغاب سیمان چاه نفت باید قابل کنترل باشد. این مسأله در سیمان‌کاری چاه نفت اهمیت فوق العاده‌ای دارد و عدم توجه به آن به تحمل هزینه‌های بسیار و حتی از دست دادن چاه می‌انجامد.

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 به‌دست آمده، میزان آب مورد نیاز، گیرش سیمان و واکنش‌های هیدراتاسیون را کنترل می‌کند [۱ و ۲]. شایان ذکر است که اندازه ذرات اجزا دارای اهمیت بسیار بالایی در بهبود مقاومت زود و دیر هنگام می‌باشد.

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 µm قرار می‌گیرد و ذرات بزرگ‌تر از ۶۰ µm، تنها دارای خاصیت پرکنندگی بوده و نقش خاصی در توسعه مقاومت سیمان ندارد. افزایش ذرات خیلی ریز (کوچک‌تر از ۳ µm) ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در طول گیرش سیمان از قبیل تغییرات حجمی ناخواسته و خصوصیات رئولوژیکی نامطلوب گردد [۳-۶]. هر چه سیمان ریز دانه‌تر باشد، مقاومت تراکمی آن افزایش و زمان بندش آن کاهش می‌یابد [۷]. با ثابت نگهداشتن میزان آب، چنانچه نرمی سیستم افزایش یابد، سیمان به حالت ژل در آمده و با کاهش بخش نرم در سیمان، میزان آب آزاد موجود در سیستم افزایش می‌یابد [۸ و ۹].

نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که با افزایش هوازدگی کلینکر، خصوصیات رئولوژیکی و به ویژه مقاومت سیمان کاهش خواهد یافت. هر چه میزان هوازدگی و جذب رطوبت کلینکر کمتر باشد، سیمان عمل‌آوری شده از آن نیز به همان نسبت از کیفیت بالاتری برخوردار خواهد بود [۷]. همچنین گچ موجود در ترکیب سیمان علاوه بر خاصیت کندکنندگی، مقاومت و خصوصیات رئولوژیکی آن را نیز بهبود می‌بخشد. با خردشدن بیشتر گچ که منجر به ریزدانه‌تر شدن آن می‌شود، علاوه بر ارتقاء مقاومت و خاصیت کند کنندگی، خواص رئولوژیکی نیز بهبود می‌یابد [۱۰].

از جمله خواص سیمان که بیشتر مورد نظر مصرف کننده قرار می‌گیرد، می‌توان به نرمی، بندش، مقاومت فشاری، افت صافی، خواص هیدرولیکی و گرمای هیدراتاسیون اشاره نمود. عواملی که تعیین کننده چگونگی خواص فوق می‌باشد، عبارتند از: مواد اولیه مورد استفاده در ساخت سیمان، چگونگی و روند پخت سیمان، توزیع دانه‌بندی سیمان، آبی که در ساخت ملات به کار می‌رود و شرایط محیطی کاربرد. در این مقاله اثر تغییرات یکی از عوامل مهم و اساسی یعنی توزیع دانه‌بندی بر روی خواص مهم سیمان یعنی مقاومت فشاری[2]، زمان بندش[3] و خواص رئولوژیکی[4] مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد [۱۱]. این پارامترها در شرایط عمل آوری یکسان و نسبت آب به سیمان ثابت، تابع ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و دانه‌بندی سیمان چاه نفت می‌باشند [۵].

در تحقیق حاضر پس از تعیین اندازه و محدوده توزیع دانه‌ها توسط نرم‌افزار طراحی شده، ترکیبی از اندازه ذرات که دارای تخلخل کمتری است، تعیین شد. کلینکر و گچ موجود، در ابتدا توسط آسیاب فکی و سپس با استفاده از آسیاب گلوله‌ای تا سطح ویژه معینی خرد شد و در ادامه توسط سرندهای آزمایشگاهی مختلف طبقه‌بندی گردید. نتایج آنالیز لیزری ذرات نشان می‌دهد که ۵۰٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا ۳۰ mµ واقع شده است. تست‌های آزمایشگاهی مختلف به منظور تعیین خصوصیات مهم سیمان نظیر خواص رئولوژیکی، زمان بندش و مقاومت فشاری سیمان در دمای ۱۰۰ و ۱۴۰ °F انجام گرفت.

1. Specific Surface Area (SSA)
2. Compressive Strength
3. Thickening Time
4. Rheological Properties

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج نشان می‌دهد که سیمان طراحی شده از خصوصیات رئولوژیکی و زمان بندش بسیار خوبی برخوردار بوده و مقاومت فشاری آن نیز به میزان ۱۰٪ نسبت به سیمان استاندارد دایکرهاف افزایش یافته است. همچنین سیمان طراحی شده از سازگاری بسیار خوبی با افزایه‌های کندکننده و کنترل کننده افت صافی برخوردار بوده و میزان آب مصرفی سیستم تا ۱۰٪ کاهش یافته است.

طراحی آزمایشات

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

۱- ضریب یکنواختی محصول (n)
۲- پارامتر نرمی یا پارامتر موقعیت (X')
۳- سطح ویژه

دو شاخص اول در بحث طراحی دانه‌بندی سیمان و شاخص سوم به عنوان یک پارامتر کنترلی در کارخانجات سیمان مد نظر قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزایش سطح ویژه سیمان همواره به معنی بهبود توزیع دانه بندی مطلوب که ما از آن به‌عنوان محدوده موثر در مقاومت سیمان یاد می‌کنیم، نمی‌باشد [٤]. به منظور بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب، اصول زیر به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده است:

۱- در یک سطح ویژه ثابت از سیمان، هنگامی‌که ضریب یکنواختی افزایش می‌یابد، پارامتر نرمی به‌طور اتوماتیک کاهش یافته و به‌جز مقاومت ۲ روزه مقاومت استاندارد بالاتری خواهیم داشت، زیرا مقاومت اولیه به شدت تحت تاثیر سطح ویژه می‌باشد.

۲- در یک ضریب یکنواختی ثابت از سیمان (n ثابت) و یک سطح ویژه یکسان، مقاومت سیمان به‌میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامتر نرمی قرار می‌گیرد.

۳- 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 و در این راستا مقاومت بیشتر می‌شود.

٤- در یک پارامتر نرمی ثابت از سیمان، با افزایش ضریب یکنواختی، سطح ویژه کاهش می‌یابد. بنابراین، علی‌رغم یکنواختی ذرات که می‌تواند در بخش زبره سیمان متمرکز باشد، به دلیل تثبیت پارامتر نرمی، سطح ویژه کاهش می‌یابد [۷].

با توجه به اهمیت این سه شاخص، تأثیر هر یک بر مهم‌ترین خواص تر و خشک دوغاب سیمان چاه نفت بررسی می‌شود. این خواص عبارتند از:

۱- زمان بندش اتمسفریک دوغاب سیمان
۲- زمان بندش تحت فشار دوغاب سیمان
۳- مقاومت فشاری در دمای °F ۱۰۰ و °F ۱٤۰
٤- آب آزاد[1]
۵- زمان بندش هنگام استفاده از ریتاردرها[2] (کند گیرکننده‌ها) و میزان واکنش‌پذیری ریتاردر
٦- رئولوژی
۷- نفوذپذیری
۸- تخلخل

آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور آسیاب مواد از آسیاب آزمایشگاهی نوع گلوله‌ای که شباهت زیادی به سیستم آسیاب گلوله‌ای مدار باز دارد، استفاده شده است. در آسیاب‌های مدار باز مواد از یک طرف وارد شده و از طرف دیگر از سیستم خارج می‌گردد و هیچ‌گونه 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 خردکردن برای دست‌یابی به دانه‌بندی مطلوب

نتایج حاصل از تجربیات عملی و مطالعات تئوری، نشان می‌دهد که سیستم خردکردن باید به گونه‌ای باشد که نرخ ذرات ۳ تا ۳۰ µm به منظور وصول کیفیت تولیدی، ماکزیمم گردد. این در حالی است که نرخ ذرات ۰ تا ۳ µm همواره به طور طبیعی گسترش می‌یابد.

1. Free Water
2. Retarder

Archive of SID
www.SID.ir

هنگامی‌که ضریب یکنواختی سیمان به مقادیر نامطلوبی مانند ۰/۷ می‌رسد، کاهش زبره روی الک ۹۰ µm تأثیر زیادی بر روی افزایش درصد ذرات ۰ تا ۳ µm خواهد گذاشت، که از این دیدگاه دانه‌بندی مطلوب در مقاومت، پذیرفته نیست. روند تغییرات درصد ذرات ۳ تا ۳۰ µm با کاهش درصد زبره روی الک ۹۰ µm برای توزیع دانه‌بندی مطلوب‌تر (n=۱/۲ و n=۱) به مراتب بالاتر از دانه‌بندی نامطلوب ۰/۷ است.

الگو برداری از سیمان‌های خارجی

اندازه‌گیری وتحلیل نتایج توزیع دانه‌بندی در سیمان‌های چاه نفت (کلاس G) دایکرهاف و نروژ

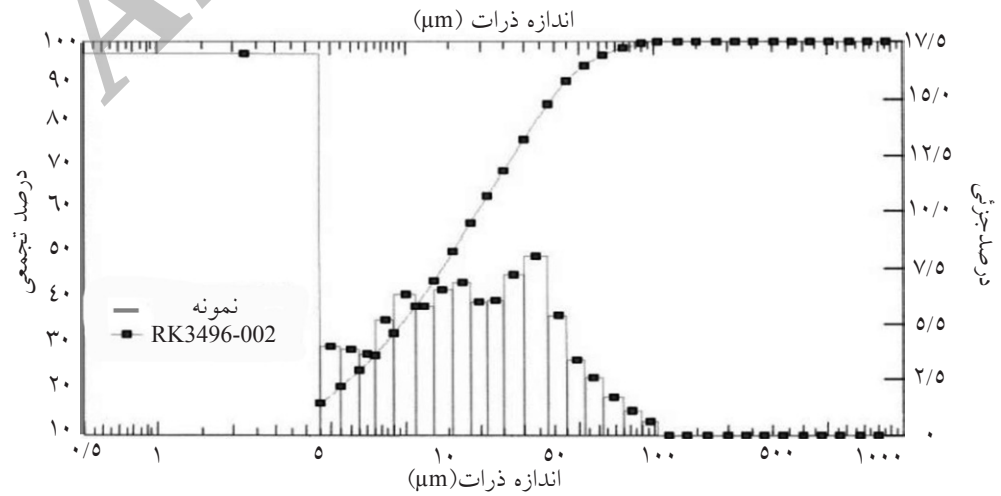
یکی از راه‌های مناسب برای دست‌یابی به سیمان با کیفیت بالا، الگو برداری و مقایسه توزیع دانه‌بندی سیمان‌های چاه نفت است. برای این منظور دو سیمان خارجی نمونه با خواص رئولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب که در شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب طی سال‌های اخیر استفاده شده، انتخاب گردید و توزیع دانه‌بندی آنها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی به روش لیزری[1] مدل سیمپاتک[2] تعیین شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۱ آنالیز توزیع دانه‌بندی نمونه سیمان دایکرهاف را با استفاده از روش لیزری نشان می‌دهد.

اکثر سیمان‌های تولیدی داخل کشور دارای پارامتر نرمی بالاتر و ضریب یکنواختی کمتر می‌باشند. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، پارامتر نرمی دو سیمان فوق تقریباً برابر است. بدین‌معنا که شرکت‌های تولیدکننده سیمان چاه نفت در خارج از کشور برای اصلاح توزیع دانه‌بندی سیمان، از میان سه پارامتر رایج کنترل دانه‌بندی یعنی سطح ویژه (cm^2/gr)، ضریب یکنواختی و پارامتر نرمی، روی پارامتر نرمی، توجه ویژه ای داشته و مقدار آنرا کنترل می‌نمایند.

نکته حائز اهمیت اینکه سطح ویژه این دو سیمان کاملاً متفاوت است. به عبارت دیگر، بر خلاف نظرات پذیرفته شده زیادی که معتقدند مقاومت نهایی سیمان از طریق سطح ویژه تعیین می‌شود، لازم است بگوییم که در عمل این‌گونه نیست و افزایش سطح ویژه همواره باعث بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب که از آن به عنوان محدوده موثر در مقاومت سیمان یاد می‌شود، نمی‌گردد. البته برخی مطالعات و تحقیق‌های قبلی نیز بر این گفته صحه‌گذاری نموده‌اند.

جدول ۱– خواص دانه‌بندی سیمان‌های خارجی

نمونه	ساخت	ضریب یکنواختی (n)	پارامتر نرمی (X')	سطح ویژه (cm^2/gr)
RK3495	نروژ	۱/۱۹	۲۰/۵۵	۳۲۵۰
RK3496	دایکرهاف	۱/۱۱	۱۹/۲۳	۳۴۵۰



شکل ۱– توزیع دانه‌بندی سیمان چاه نفت کلاس G شرکت دایکرهاف اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آنالیز لیزری

1. Lazer Particle Size Analyzer
2. Sympatec

Archive of SID

www.SID.ir

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 ۳۰ µm کاهش می‌یابد. در یک ضریب یکنواختی ثابت از سیمان و یک سطح ویژه یکسان، مقاومت استاندارد به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامتر نرمی قرار می‌گیرد [٤].

اندازه‌گیری و تحلیل نتایج توزیع دانه‌بندی در سیمان‌های چاه نفت (کلاس G) شرکت‌های سیمان داخلی کشور (سیمان A و B)

برای بررسی و شناخت توزیع دانه‌بندی شرکت‌های تولید کننده سیمان چاه نفت در داخل کشور، پس از تهیه این نوع سیمان‌ها از بازار، توزیع دانه‌بندی آنها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی به روش لیزری مدل سیمپاتک تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

توزیع دانه‌بندی سیمان چاه نفت A

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. این سیمان به دلیل پارامتر نرمی بالا و ضریب یکنواختی نسبتاً پایین، نسبت به نمونه‌های خارجی مقاومت کمتری دارد. اگر پارامتر نرمی این سیمان به محدوده ۲۰ برسد، شرایط بهتری از لحاظ مقاومت خواهد داشت.

جدول ۲- خواص دانه‌بندی سیمان‌های داخلی

نمونه	سیمان	ضریب یکنواختی (n)	پارامتر نرمی (X′)
RK2012	A	۰/۹۸	۳۰/۵۵
RK2013	B	۱/۰۱	۲۵

توزیع دانه‌بندی سیمان چاه نفت B

در این شرایط سیمان دارای مقاومت بهتری نسبت به سیمان A خواهد بود. اما پارامتر نرمی این سیمان نیز نسبت به نمونه‌های خارجی بالاتر بوده و جهت دست‌یابی به مقاومت بالاتر، لازم است پارامتر نرمی کاهش یابد. همچنین در صورتی‌که ضریب یکنواختی این سیمان کمی افزایش یابد و به حدود ۱/۲ برسد، خواص رئولوژیکی آن بهبود می‌یابد.

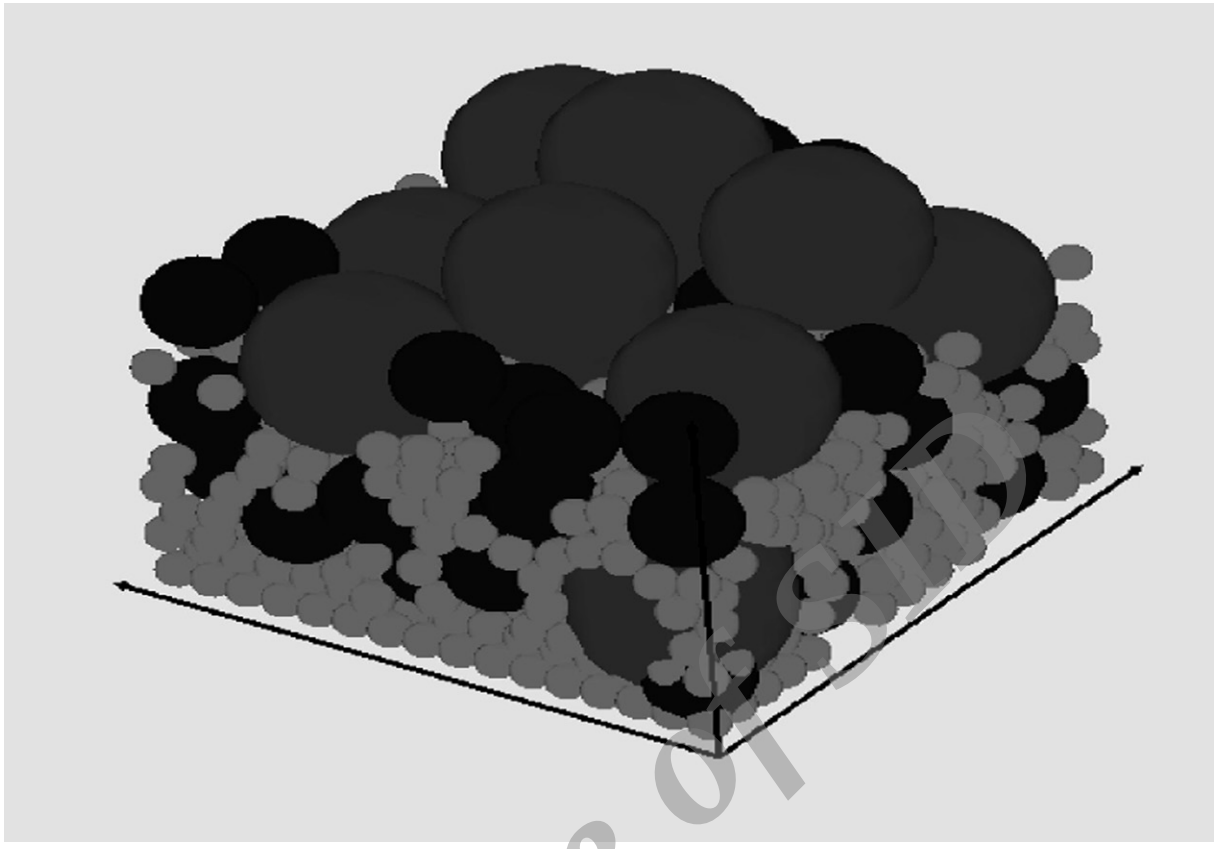
توسعه نرم‌افزار جهت اندازه‌گیری تخلخل بین دانه‌ای

این نرم‌افزار به منظور اندازه‌گیری تخلخل بین دانه‌ای سیمان توسعه داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، این نرم‌افزار قابلیت محاسبه و نمایش جورشدگی دانه‌ها را به صورت دو و سه بعدی داراست. تخلخل سیمان یکی از پارامترهای اساسی سیمان است که در کاهش کیفیت سیمان نقش بسزایی ایفا می‌کند. هر چه تخلخل سیمان بیشتر باشد، آب مصرفی آن افزایش یافته و باعث کاهش کیفیت (کاهش مقاومت) آن می‌گردد. لذا اگر بتوان با توزیع دانه‌بندی سیمان تخلخل آن را کاهش داد، می‌توان به سیمانی با کیفیت بالاتر دست یافت. برای شبیه‌سازی تخلخل دانه‌های سیمان، تمامی دانه‌ها را به شکل کروی در نظر می‌گیرند تا محاسبات ساده‌ترانجام شود، اما در واقع دانه‌های سیمان به صورت نامنظم می‌باشند. تخلخل یک سری ذرات کروی علاوه بر اندازه ذرات به دامنه اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد. به این معنی که با انتخاب مناسب اندازه دانه‌ها، هر چه دامنه اندازه دانه‌ها وسیع‌تر باشد، از میزان تخلخل کاسته می‌شود. ولی اگر دامنه اندازه دانه‌ها ثابت باشد، با کاهش اندازه دانه‌ها تخلخل کاهش نمی‌یابد. وسیع بودن دامنه اندازه دانه‌ها باعث جورشدگی بهتر می‌گردد. نحوه عملکرد نرم‌افزار بدین صورت است که پس از وارد نمودن محدوده اندازه ذرات به همراه درصد مورد انتظار و اندازه ظرف دربرگیرنده ذرات، در ابتدا ذرات درشت‌تر که اندازه آنها توسط کاربر مشخص شده در برگیرنده جای‌گذاری شده و فضای خالی مابین آنها با استفاده از ذراتی با سایز متوسط و ریز، پر می شود. 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 گردیده و نحوه چینش ذرات به صورت گرافیکی نمایش داده می‌شود.

فرمولاسیون سیمان دارای درصدبندی بهینه

در این روش، ابتدا درصدهای بهینه از نرم افزار استخراج می‌شود. سپس کلینکرهای خرد شده تا سطح ویژه معین توسط سرندهای آزمایشگاهی طبقه بندی می‌گردد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- نمایش سه بعدی دانه‌بندی طراحی شده و محاسبه تخلخل حاصل از آن

در نهایت با توجه به درصدهای استخراج شده، سیمان مورد نظر که مخلوطی از کلینکر و گچ است، آماده‌سازی می‌شود. پس از آماده‌سازی سیمان و اندازه‌گیری وزن و خواص رئولوژیکی آن، نمونه سیمان به قالب‌های فلزی منتقل می‌شود. سپس قالب مورد نظر در حمام آب داغ با دماهای ۱۰۰ °F و ۱٤۰ °F به مدت ۸ و ۲٤ ساعت قرار داده می‌شود. پس از اتمام زمان مورد نظر، نمونه‌ها از قالب جدا گشته و توسط دستگاه جک هیدرولیکی (UCS) تحت تنش یک محوره قرار می‌گیرد تا مقاومت تراکمی آن اندازه‌گیری شود. به منظور اندازه‌گیری زمان نیم بندش سیمان مورد نظر، نمونه‌ای دیگر از آن ساخته شده و در سل‌های مشخص دستگاه اندازه‌گیری زمان نیم بندش سیمان قرار داده می‌شود. این دستگاه تحت شرایط دمایی و فشار مشخص قرار می‌گیرد [۱۱]. زمان استاندارد برای بندش سیمان‌های استاندارد، ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه می‌باشد.

بررسی خواص رئولوژیکی و مقاومت تراکمی و تخلخل سیمان‌های متداول

هدف از انجام این اندازه‌گیری، به‌دست آوردن محدوده استاندارد خصوصیات مذکور جهت مقایسه با سیمان‌های عمل آوری شده می‌باشد. نمونه‌های سنگی حاصل از این دو سیمان، جهت مغزه‌گیری مجدد و تعیین تخلخل مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که سیمان استاندارد دایکرهاف از رئولوژی، مقاومت و همچنین تخلخل بهتری نسبت به سیمان کرمان برخوردار است. دلیل این امر ممکن است به دانه‌بندی یا توزیع فازهای مختلف در کلینکر سیمان و یا استفاده از افزودنی‌ها جهت رسیدن به خصوصیات بهینه مربوط باشد. نتایج بررسی‌های صورت گرفته در جداول ۳ و ٤ خلاصه شده است. به منظور اندازه‌گیری تخلخل، پلاگ‌های استوانه‌ای از نمونه‌های مکعبی سیمان تهیه شده و تخلخل مؤثر با استفاده از هوا به عنوان سیال عبوری محاسبه می‌گردد.

نتایج اندازه‌گیری در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه سیمان دایکرهاف نسبت به نمونه سیمان کرمان نفوذپذیری کمتری دارد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- خواص رئولوژیکی سیمان‌های استاندارد داخلی و خارجی

نمونه	θ_{600}	θ_{300}	θ_{200}	θ_{100}	θ_{6}	θ_{3}	ویسکوزیته پلاستیک (cP)	نقطه واروی ($lb/100\ ft^2$)
سیمان دایکرهاف	۱۳۲	۸۶	٦٦	٤٧	۱۸	۱٤	۵۸/۵	۲۷/۵
سیمان کرمان	۱۱۷	۷۱	۵۸	٤۳	۲۰	۱٤	٤۲	۲۹

جدول ٤- مقاومت تراکمی ۲٤ ساعته سیمان‌های استاندارد داخلی و خارجی

نمونه	مقاومت تراکمی در دمای ۱۰۰ °F (psi)	مقاومت تراکمی در دمای ۱٤۰ °F(psi)
سیمان دایکرهاف	۲۵۰۰	۳۹۲۰
سیمان کرمان	۱۸۷۰	۲۷۰۰

جدول ۵- اندازه‌گیری میزان تخلخل نمونه سنگ سیمان

نمونه		وزن (gr)	طول (cm)	قطر (cm)	تخلخل (٪)	دانسیته (gr/cm^3)
سیمان دایکرهاف	D_1	۷۲/٦۷۱۸	۳/٦۷۷	۳/۸۱۹	۱۹/۲	۲/۱۳٦
	D_2	٦٦/٦۳۱۳	۳/۳۷۹	۳/۸۱۵	۱۹/۱۰۹	۲/۱۳٤
سیمان کرمان	K_1	۷۳/۰۹۲۵	۳/۷۸۰	۳/۸۱٤	۲۵/۵٤٤	۲/۲٤٤
	K_2	۷٤/۰۸۰٤	۳/۸۳۲	۳/۸۱۸	۲٤/۱۱٦	۲/۲۲٦

جدول ٦- سازگاری سیمان‌ها با افزایه‌های کنترل‌کننده افت صافاب و ریتاردر

	میزان نیم‌بندش اولیه	نیم‌بندش بعد از گذشت ٦۰ (min)	زمان رسیدن به نیم‌بندش ۷(min)B.C	زمان رسیدن به نیم‌بندش ۱۰ (min) [1]B.C
سیمان دایکرهاف	۰/۸	۰/۵	بالاتر از ٤ ساعت	-----
سیمان کرمان	۰/۸	۱/۷	۱۸۰	۲۲۰

بررسی سازگاری دوغاب سیمان‌های دایکرهاف و کرمان با افزایه‌های مختلف

به منظور بررسی سازگاری، از افزایه‌های کنترل کننده افت صافاب و افزایه ریتاردر مطابق دستورالعمل ارسالی از مناطق نفت خیز جنوب استفاده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌های مختلف، گرانروی اولیه (در زمان صفر)، گرانروی بعد از گذشت ۱ ساعت و زمان رسیدن به گرانروی ۷ و ۱۰ B.C توسط دستگاه Consistometer بررسی شد که نتایج آن در جدول ٦ آورده شده است. زمان رسیدن به گرانروی ۷ B.C باید از ۱۵۰ min بیشتر باشد. لذا نمونه‌های مورد آزمایش سازگاری خوبی با افزایه‌های مورد استفاده دارند.

شرح فرمولاسیون نهایی سیستم آسیاب و سرند (طبقه‌بندی فراکسیون‌ها توسط الک)

در مجموعه آزمایش‌های انجام شده، ابتدا کلینکر سیمان کرمان توسط آسیاب فکی تا سطح ویژه خاصی خرد شد. سپس با استفاده از آسیاب گلوله‌ای به سطح ویژه موردنظر تبدیل گردید.

از آنجایی‌که سیمان، مخلوطی از کلینکر و گچ است، لذا گچ تنها توسط آسیاب فکی خرد شده و همانند کلینکر به دانه‌بندی‌های مختلف طبقه بندی شده است. به‌دلیل محرمانه بودن فرمولاسیون ابداعی، از آوردن توزیع دانه‌بندی آن خودداری شده و تنها به ذکر خصوصیات آن اکتفا می‌شود. گچ به منظور به تأخیر انداختن زمان بندش به سیمان افزوده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که این افزایه علاوه بر کندکنندگی، مقاومت و خصوصیات رئولوژیکی سیمان را نیز بهبود می‌بخشد [۵]. چنانچه سایز گچ تا حد ممکن ریز شود، علاوه بر ارتقاء مقاومت و خاصیت کند کنندگی، باعث بهبود خواص رئولوژیکی نیز می‌شود. البته باید به این نکته

1. Burden of Consistency

Archive of SID
www.SID.ir

توجه کرد که گچ نیز همانند کلینکر به شدت جاذب رطوبت است. بنابراین، خصوصیات آن تغییر کرده و نقش مطلوب خود را به خوبی ایفا نخواهد کرد. نمونه دوغاب سیمان جهت اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی، مقاومت تراکمی و زمان بندش آماده‌سازی گردید. جدول ۷ خصوصیات رئولوژیکی سیمان آماده را نشان می‌دهد. نمونه دارای خواص رئولوژیکی بسیار خوبی بوده و حالت روانی سیمان پس از گذشت زمان، ثابت و بدون تغییر می‌باشد که این خاصیت حاکی از وجود محصولی با شدت هوازدگی کم و وجود محدوده قابل قبول گچ در سیستم سیمان است. با توجه به دانه درشت بودن سیمان و خصوصیات رئولوژیکی مناسب، می‌توان میزان آب موجود در سیمان را کاهش داد که پس از کاهش آب تا ۱۰٪ در نمونه مورد نظر، خصوصیات رئولوژیکی به حد مطلوب رسیده و مقاومت تراکمی نمونه بهبود یافته است. سپس نمونه مورد نظر جهت اندازه‌گیری مقاومت تراکمی به قالب‌های مخصوص انتقال یافته و به مدت ٢٤ ساعت تحت دمای ١٤٠ °F در حمام آب داغ قرار داده شد. مقاومت تراکمی میانگین برای فرمولاسیون مذکور برابر ٤٢٥٠ psi می‌باشد که این مقدار حدود ۱۰ ٪ بیشتر از مقاومت تراکمی سیمان دایکرهاف و ٦٠ ٪ بیشتر از سیمان کرمان می‌باشد. نمونه مورد نظر فاقد آب آزاد است.

پس از به‌دست آوردن خصوصیات رئولوژیکی و مقاومت تراکمی مناسب، نمونه دیگری جهت بررسی سازگاری فرمولاسیون نهایی با افزایه‌های کنترل کننده افت صافاب و ریتاردر آماده‌سازی شد. نتایج حاصل از بررسی سازگاری با افزایه‌های مورد نظر در جدول ۸ آورده شده است.

نمونه مذکور سازگاری بسیار خوبی با افزایه‌های مورد استفاده دارد. زمان بندش نمونه مورد نظر برابر ۱۱۰ min می‌باشد که در محدوده زمانی تعریف شده توسط API (بین ۹۰ تا ۱۲۰ min) قرار دارد. بنابراین فرمولاسیون مورد نظر از کیفیت مطلوبی برخوردار بوده و با استفاده از نتایج ارائه شده می‌توان آن‌را به‌عنوان فرمولاسیونی با قابلیت و کارایی بالا ارائه نمود.

نتیجه‌گیری

۱- یک نرم‌افزار به‌منظور به‌دست آوردن توزیع بهینه اندازه ذرات و اندازه‌گیری تخلخل دانه‌ای ایجاد شد و توزیع بهینه اندازه ذرات به‌همراه درصدبندی بهینه آنها از نرم‌افزار استخراج گردید.

۲- توزیع اندازه ذرات در سیمان طراحی شده به گونه‌ای است که در حدود ۵۰٪ اندازه ذرات در محدوده ۳ تا ۳۰ μm قرار دارد. این در حالی است که میزان محدوده مورد نظر در اکثر سیمان‌های موجود در صنعت بالاتر از ۷۰٪ می‌باشد. در این‌صورت انرژی کمتری جهت تولید سیمان با دانه‌بندی غیر یکنواخت طراحی شده مورد نیاز خواهد بود.

۳- سیمان تولید شده با دانه‌بندی غیریکنواخت، علاوه بر داشتن خصوصیات رئولوژیکی و زمان بندش مناسب، مقاومت بسیار بالایی دارد. نتایج آزمایش مقاومت تراکمی نشان می‌دهد که مقاومت سیمان طراحی شده به اندازه ۱۰ ٪ نسبت به سیمان کلاس G دایکرهاف و ٦٠٪ نسبت به سیمان کلاس G کرمان افزایش یافته است.

٤- به‌دلیل وجود 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.

۵- سیمان طراحی شده از سازگاری بسیار خوبی با افزایه‌های کنترل کننده افت صافاب و ریتاردر برخوردار می‌باشد.

جدول ۷- خصوصیات رئولوژیکی فرمولاسیون نهایی

θ_{600}	θ_{300}	θ_{100}	θ_6	θ_3	ویسکوزیته پلاستیک (cP)	نقطه واروی ($lb/100\ ft^2$)
۸۹	۵۹	٤٠	۱۸	۱۳	۲۸/۵	۳۰/۵

جدول ۸- سازگاری فرمولاسیون نهایی با افزایه‌های کنترل‌کننده افت صافاب و ریتاردر

زمان رسیدن به گرانروی B.C ۱۰ (min)	زمان رسیدن به گرانروی B.C ۷ (min)	گرانروی بعد از گذشت ٦٠ (min) (B.C)	گرانروی اولیه (B.C)
۲۲۰	۲۱۰	۱/۲۵	۰/۷

Archive of SID

www.SID.ir

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

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

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

[3]. 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.

[4]. 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.

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

[6] Tsivilis S., Tsimas S., Benetatou E. and Haniotakis E., "*Study on the contribution of the fineness on cement strength*", ZKG 1, pp. 26-29, 1990.

[7]. 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.

[8]. 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.

[9]. 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.

[10]. 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.

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

Archive of SID

www.SID.ir