



تاثیر افزایش های سیمانکاری بر خواص روانه شناسی، زمان نیم‌بندش و استحکام تراکمی سیمان در عملیات حفاری

محسن دودار*، سید محمد مهدی حسینی

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

سیمانکاری چاه نفت
طراحی دوغاب سیمان
استحکام تراکمی
خواص روانه شناسی
افزایش های سیمانکاری

خلاصه: پلاستیک‌ویسکوزیته، نقطه‌واروی، میزان صافاب دوغاب، زمان بندش و استحکام تراکمی سیمان از جمله پارامترهای مورد نیاز جهت یک عملیات موفقیت‌آمیز در سیمانکاری چاه هستند. در این پژوهش تاثیر پوشای حجم دهنده (بنتونایت و سدیم سیلیکات)، کنترل‌کننده صافاب (FLC)، شتاب‌دهنده بندش (کلسیم کلرید و سدیم کلرید) و کندکننده‌های بندش (کلسیم لیگنوسولفونات و کربوکسی متیل هیدروکسی اتیل سلولز) در قالب ۲۵ آزمایش مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی نتایج، با افزایش مقدار بنتونایت تا ۶٪ وزنی سیمان، مقدار صافاب را از ۳۸۰ CC به ۸۹ CC رساند در حالی که سدیم سیلیکات تا ۱۸۰ کاهش داد. با افزایش از ۰٪ تا ۶٪، کلسیم کلرید نسبت به سدیم کلرید اثر بیشتری بر زمان بندش سیمان دارد. در درصد های بالای (۳۰٪)، کلسیم کلرید، برای عملیات‌های سیمانکاری نتایج غیر قابل قبولی ارائه داد. افزایش کلسیم لیگنوسولفونات، زمان نیم بندش را با شیب ثابت و CMHEC به صورت غیر خطی افزایش دادند. با افزایش ۱٪ CMHEC به دوغاب سیمان مقدار صافاب از ۷۲ CC به ۴۲ CC کاهش پیدا کرده است در حالی که این کاهش برای کلسیم لیگنوسولفونات برابر با ۷ CC بوده است. با افزایش ۱٪ CMHEC به سیمان مقاومت تراکمی سیمان از ۲۴۰۰ psi تا ۱۷۳۰ psi کاهش پیدا کرد در حالی که برای کلسیم لیگنوسولفونات از ۲۴۰۰ psi تا ۱۱۲۰ psi کاهش یافت. اضافه نمودن FLC به آب لازم برای ساخت سیمان موجب تاخیر در زمان بندش و کاهش یافتن استحکام اولیه سیمان در ۲۴ hr اول شد.

۱- مقدمه

سیمان در آن شکل بگیرد که در واقع مسیری را برای جریان یافتن گاز سازندی ایجاد می‌نماید. لوله گذاری و سیمانکاری به طور قطع، از مهم‌ترین سرویس‌های عملیات حفاری هستند [۲]، که کلیه محاسن آن‌ها را می‌توان در دو کلمه محافظت [۳] و ممانعت [۴] خلاصه نمود.

طراحی مناسب دوغاب سیمان حفاری به عوامل مختلفی چون هندسه چاه، دما و فشار ته چاهی، نوع و خواص سیال حفاری و خواص سازند بستگی دارد. که هم‌زمان باید وزن مخصوص دوغاب [۵]، خواص روانه شناسی [۶]، مقدار صافاب [۷] و خواص مکانیکی سیمان از جمله زمان نیم‌بندش [۸] و استحکام تراکمی آن [۹] نیز مورد لحاظ قرار گیرند.

همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، چهارگانه به نام‌های تری کلسیم سیلیکات^۱ (C₃S)، دی کلسیم سیلیکات^۲ (C₂S)، تری کلسیم آلومینات^۳

مطالعه‌ای در سال ۱۹۹۵ میلادی نشان داد پانزده درصد از سیمانکاری‌های اولیه در ایالات متحده ناموفق بوده است که حدود یک سوم آن به دلیل نفوذ گاز و سیالات درون سیمان بوده است. طراحی و بهینه سازی دوغاب از مهم‌ترین ابزار موجود در فرآیند مبارزه با نفوذ گاز است. پارامترهای متعددی از دوغاب باید با بهینه‌سازی فرمولاسیون اصلاح شوند و به حد مطلوب برسند. در این زمینه می‌توان از ویژگی‌هایی چون دانسیته، آب آزاد، وضعیت ته‌نشینی ذرات، خواص رئولوژیکی، توسعه مقاومت ژله‌ای، تراوایی و آب از دست دادگی دوغاب نام برد. تک تک این موارد در حین ارزیابی دوغاب می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند تا استانداردهای مورد قبول حاصل شود. با این حال طراحی دوغاب بی نقص، تضمینی برای مقاومت کامل در برابر پدیده نفوذ گاز نیست. وجود گل حفاری و کیک گل داخل چاه علاوه بر آلوده نمودن سیمان [۱] باعث می‌شود میکروکانال‌هایی پس از بندش

- 1 Tricalcium silicate
- 2 Dicalcium silicate
- 3 Tricalcium aluminate

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dehvedar@aut.ac.ir



منفی به دور آن‌ها به وجود آورده و آن‌ها را از یکدیگر دفع می‌کند به این ترتیب زمان نیم‌بند شدن دوغاب به تعویق می‌افتد [۱۳]. کربوکسی متیل هیدروکسی اتیل سلولز و ترکیبات لیگنوسولفونات‌دار از جمله مهم‌ترین کند کننده‌ها محسوب می‌شوند [۱۴]. استفاده از دوغاب‌های سیمان دیربند در سیمانکاری فضای حلقوی پشت لوله‌های جداری و آستری توانسته است غلاف یکدستی از پوشش سیمان را برای لوله‌های آستری و جداری به وجود آورد [۱۵]. اگر تعمیر چاه مستلزم پاره‌ای کارهای درمانی نظیر سیمان ترریقی و غیره باشد با استفاده از روش سیمانکاری با دوغاب‌های دیربند در وقت و مخارج صرفه‌جویی به عمل می‌آید [۱۵].

در عملیات سیمانکاری چاه، معمولاً از دو دسته عوامل ضد کف به نام های اثرهای پلی‌گلیکولی و سیلیکون‌ها استفاده می‌شود. برای دستیابی به پیشگیری از تولید کف، معمولاً غلظت‌های بسیار کمی از ضدکف (کمتر از ۰/۱٪ وزنی آب) لازم است. کف‌زداها با نشستن به روی سطح کف و تشکیل یک فیلم نازک با کشش سطحی کمتر، باعث ترکیدن حباب‌های کف می‌شوند. همچنین با نفوذ به داخل کف و با توجه به مکانیزم تخلیه گرانشی باعث نازک شدن لایه کف شده و در نهایت حباب از بین می‌رود [۱۶]. پلی گلیکول اثرها و سیلیکون‌ها از جمله این مواد هستند.

پخش‌کننده‌ها، پلیمرهایی با بار منفی هستند که به قسمت‌های دارای بار مثبت سطح هیدراته شده دانه‌های سیمان می‌چسبند و باعث می‌شوند که بار منفی بگیرند و ذرات از هم دور شوند. به این ترتیب دانه‌های سیمان می‌توانند با فاصله از هم قرار گرفته و در دوغاب پخش شوند. عمل پخش شدن باعث می‌شود که دوغاب روان شود و پمپاژ آن راحت‌تر باشد [۱۷]. به کلیه موادی که دانسیته دوغاب را کاهش داده و یا می‌توانند جایگزین سیمان در زمان ساخت دوغاب شوند پوشای حجم دهنده می‌گویند. بنتونایت و پوزالان از جمله این مواد هستند [۱۸].

با حضور پخش‌کننده مناسب، نقطه واروی^۴ دوغاب سیمان به صفر خواهد رسید و مانند یک سیال نیوتنی رفتار خواهد کرد. چگونگی میزان تغییر نقطه واروی با تغییر درصد استفاده پراکنده‌سازها متفاوت است. مقدار نقطه واروی ابتدا با افزایش غلظت پراکنده‌ساز افزایش یافته و سپس به شدت به سمت صفر کاهش می‌یابد. کنترل‌کننده‌های هرزروی و افت صافاب از جمله افزایش‌دهنده‌های دیگری هستند که در سیمانکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در هرزروی کل دوغاب سیمان و در افت صافاب، آب آزاد سیمان از دست خواهد رفت. با افزایش ویسکوزیته دوغاب یا کاهش دادن فضای عبور سیال

(C₃A) و تترا کلسیم آلومینوفریت^۱ (C₄AF) اجزای اصلی تشکیل دهنده فرمولاسیون سیمان هستند. با قرارگیری این مواد در کنار افزایش‌های سیمانکاری و آب، خصوصیات مورد نظر خود مهندسین عملیات در سیمان شکل می‌گیرد. اندازه ذرات سیمان مقدار نسبت آب به سیمان را مشخص می‌کند. سیمان‌هایی با دانه‌های ریزتر به آب بیشتری احتیاج دارند [۱۰].



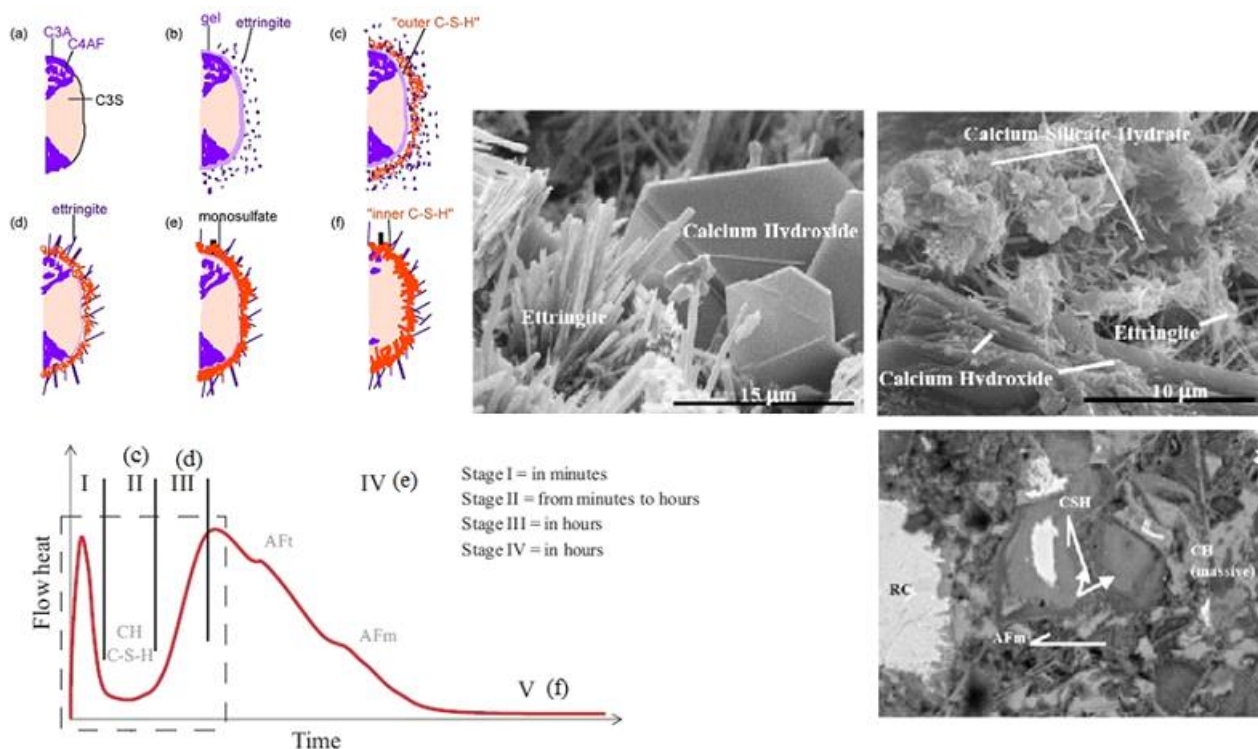
C₃A و C₄AF به طور عمده خواص روانه شناسی و C₂S و C₃S مقاومت مکانیکی و استحکام سیمان را تعیین می‌کنند. با در معرض قرارگیری دو ماده دوم در برابر آب، ماده‌ای ژله‌ای به نام کلسیم سیلیکات هیدرات^۲ (C-S-H) و کلسیم هیدروکسید^۳ (C-H) تشکیل می‌شود. این ژل عامل اصلی چسبندگی سیمان بوده و به آن سختی و استحکام می‌بخشد. واکنش‌های انجام گرفته به صورت زیر است [۱۰].

API بسته به ترکیب مواد خام، میزان نرمی دانه‌های سیمان، میزان و نوع افزایش‌هایی که در هنگام ساخت به سیمان اضافه می‌شوند، نه کلاس سیمانی را معرفی نموده است. یکی از شاخص‌ترین پارامترها در تنوع بخشی به هر کلاس سیمان مقاومت در برابر سولفات‌هاست. مواد معدنی روی دوغاب‌های سیمان اثر تندکننده و مواد آلی روی آنها اثر کندکننده دارد [۱۱]. یک کاهش اندک در نسبت آب به سیمان دوغاب موجب یک افزایش شدید در استحکام تراکمی سنگ سیمان آن می‌شود [۱۲]. کلسیم کلرید و سدیم کلرید از جمله مهم‌ترین شتاب دهنده‌ها هستند.

حرارت و فشار از جمله عواملی هستند که باعث تسریع بندش دوغاب‌های سیمان می‌شوند. با افزایش نسبت آب به سیمان دوغاب‌های سیمان اگر چه زمان بندش زیاد می‌شود اما این امر موجب کاهش وزن و کاهش گرانیوی دوغاب سیمان خواهد شد. دوغاب‌های کم وزن با گرانیوی کم، برای سیمانکاری چاه‌های عمیق و پر فشار مناسب نیستند. در ساختمان شیمیایی کند کننده‌ها یک یا چند رادیکال هیدروکسیل وجود دارد و همین عامل است که با چسبیدن به سطوح دانه‌های سیمان در دوغاب، غشایی

- 1 Tetra-calcium aluminoferrite
- 2 Calcium silicate hydrate
- 3 Calcium hydroxide

4 Yield point



شکل ۱. نمایی از نحوه رشد و قرارگیری کانی‌ها و عناصر تشکیل دهنده سیمان در کنار هم به همراه نمودار میزان حرارت تولیدی در مراحل مختلف رشد
Fig. 1. shows the stages of cement hardening at the same time as the growth load of its internal structures. The amount of heat released during the thickening time of the slurry. It also shows a view of the crystalline and amorphous structures of the cement structure.

شده است. قدرت ژل‌شدگی سیمان نیز توسط رئومتر در دو زمان مختلف ۱۰ sec و ۱۰ min ثبت می‌گردد. مقدار پلاستیک‌ویسکوزیته^۱ و نقطه واروی^۲ با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$PV = (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1.5 \quad (3)$$

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (4)$$

برای اینکه رئولوژی دوغاب شامل پلاستیک‌ویسکوزیته و نقطه واروی، ژل ۱۰ sec و ژل ۱۰ min در دمای چرخشی ته چاه اندازه‌گیری شود، دوغاب درون دستگاه اتمسفریک کانسیستومتر^۳ قرار می‌گیرد تا به مدت ۲۰ min در دمای ته چاه و با دور ۱۵۰ rpm چرخیده شود. سپس دوباره طبق دستورالعمل گفته شده رئولوژی آن قرائت می‌شود.

در داخل سنگ می‌توان از این دو مشکل جلوگیری به عمل آورد [۱۹]. گیلسونایت از جمله این مواد است.

۲- مواد و روش آزمایش

پس از اینکه فرمولاسیون ساخت سیمان طراحی شد؛ مقدار سیمان، آب و افزایش‌های سیمان به طور مشخص وزن می‌شوند. ترتیب ترکیب مواد به این صورت است که ابتدا آب درون ظرف همزن ریخته می‌شود، سپس هر کدام از افزایش‌ها به آن اضافه شده و به مدت ۱ min تا ۲ min با دور ۲۰۰۰ rpm مخلوط می‌شوند. سپس با دور ۴۰۰۰ rpm سیمان اضافه می‌شود. اضافه شدن سیمان باید طی ۱۵ sec باشد. سپس به مدت ۳۵ sec دوغاب با دور ۱۲۰۰۰ rpm چرخانده می‌شود.

بعد از آماده شدن دوغاب چند بار ظرف به ظرف می‌شود که فرایند همگن‌سازی بیشتر انجام گیرد. دوغاب درون ترازوی گل ریخته شده و با ضربه‌های مکرر به آن حباب‌های داخل دوغاب گرفته می‌شود. سپس برای اطمینان از صحت انجام محاسبات وزن دوغاب اندازه‌گیری می‌گردد. اندازه‌گیری خواص رئولوژی دوغاب در دورهای متفاوت (rpm) ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰، توسط دستگاه ویسکومتر فن مدل ۳۵ انجام

1 Plastic viscosity
 2 Yield point
 3 Atmospheric consistometer

گزارش می‌کنند.

اگر فشار وارد شده بر سیمان بیشتر از حد مقاومت تراکمی سیمان باشد، شانس ایجاد ترک و شکستگی در سیمان افزایش یافته و باعث ورود سیال و گاز به درون چاه می‌شود که این امر ممکن است منجر به بسته شدن چاه و یا هزینه‌های ناشی از عملیات ترمیمی شود. استحکام تراکمی سیمان را از طریق دو نوع آزمایش مجزا می‌توان محاسبه نمود. در هنگام استفاده از دستگاه تحلیلگر سیمان فراصوت^۲، دوغاب درون محفظه ریخته می‌شود و درون جکت حرارتی تعبیه شده درون دستگاه قرار داده می‌شود.

شرایط دما و فشاری ته چاه بر روی دوغاب اعمال می‌شود و دستگاه میزان استحکام و سفت‌شدگی سیمان را با استفاده از زمان عبور امواج صوتی از درون سیمان محاسبه می‌کند. طبق برنامه زمان‌بندی تعبیه شده برای دستگاه (بر اساس شرایط چاه) دستگاه شروع به کار می‌کند. استحکام تراکمی سیمان بعد از ۸ hr (بندش اولیه)، ۱۴ hr و ۲۴ hr اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد.

به جهت اینکه در آزمایش استحکام تراکمی سیمان با استفاده از دستگاه تحلیلگر سیمان فراصوت مقدار استحکام مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه با توجه به سرعت حرکت موج صوتی درون سیمان و تبدیل آن به استحکام توسط نمودارها، معمولاً مقدار استحکام تراکمی کمتر به دست خواهد آمد. لذا برای اینکه مقدار استحکام تراکمی سیمان دقیق‌تر و نزدیک‌تر به مقدار واقعی به دست آید از آزمایش کراش استفاده می‌شود. در این روش ابتدا دوغاب آماده می‌شود سپس درون مکعب‌هایی از جنس برنج با ابعاد ۲ اینچ ریخته می‌شود. سپس با ضربات مکرر به درون دوغاب حباب‌های به دام افتاده درون آن تخلیه می‌گردد. پس از آماده سازی مکعب و مهر و موم کردن آن، مکعب‌ها درون حمام آب اتمسفریک که در دمای استاتیک ته چاه تنظیم شده است قرار داده می‌شود. زمان شروع آزمایش همان زمان ورود مکعب‌ها به درون حمام آب ثبت می‌گردد. پس از ۲۴ hr آزمایش پایان یافته و مکعب‌های سیمانی آماده آزمایش می‌شوند. ۴۵ min قبل از اینکه آزمایش اتمام یابد و مکعب‌ها آماده شکستن شوند آن‌ها را از حمام آب در آورده و درون آب با دمای ۲۷ C قرار می‌گیرند تا ۲۴ hr تکمیل شود. سپس مکعب‌ها زیر دستگاه کراش آزمایش قرار می‌گیرند تا استحکام تراکمی آن‌ها اندازه‌گیری شوند [۲۰].

در این تحقیق افزاینده‌های گوناگونی جهت طراحی دوغاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای جلوگیری و کنترل صافاب سیمان از دو نوع افزاینده کنترل

سازند اطراف چاه ممکن است که دارای لایه‌های نفوذپذیر یا شکاف باشد. در طول حرکت سیمان در مقابل لایه‌های تراوا به دلیل اختلاف فشار هیدرواستاتیکی دوغاب و فشار منفذی سازند ممکن است که فاز مایع دوغاب جدا شده و به درون سازند نفوذ کند. به این پدیده افت صافاب سیمان گفته می‌شود که این عامل باعث تنزل استحکام سیمان و نفوذ سیال سازند به درون سیمان و از دست رفتن شدن چاه می‌گردد. بنابراین لازم است که این میزان کنترل شود و مقدار آن بسته به نوع عملیات متغیر است. این آزمایش توسط دستگاه فیلتراسیون دما بالا-فشار بالا انجام می‌گیرد.

وقتی که ذرات سیمان در معرض آب قرار می‌گیرند، واکنش‌های شیمیایی درون دوغاب رخ داده و عملیات هیدراسیون رخ می‌دهد. در عملیات هیدراته شدن، دوغاب سیمان از حالت مایع تبدیل به حالت جامد می‌شود. آزمایش زمان بندش مدت زمانی که دوغاب در حالت مایع قرار دارد و قابل پمپ است را اندازه‌گیری می‌کند. دما و فشار چاه بر زمان بندش سیمان اثر می‌گذارد. از تندکننده‌ها و کندکننده‌ها برای کاهش یا افزایش زمان بندش سیمان استفاده می‌شود.

برای آزمایش زمان بندش سیمان از دستگاه کانسیستومتر دما بالا فشار بالا^۱ استفاده می‌شود. دوغاب درون محفظه مربوطه ریخته شده و درون دستگاه قرار داده می‌شود و روی آن یک پتانسیومتر جهت اندازه‌گیری مقدار استحکام سیمان قرار داده می‌شود. واحد استحکام سیمان با BC اندازه‌گیری می‌گردد. دوغاب درون محفظه در حالت دینامیک قرار گرفته و شرایط ته چاه از جمله دما و فشار بر اساس زمان پمپاژ و برنامه زمان‌بندی انجام گرفته با توجه به عمق و سرعت پمپ شبیه‌سازی می‌شود. سپس دستگاه راه‌اندازی می‌گردد.

فشار و دما مطابق برنامه زمان‌بندی کم‌کم افزایش می‌یابد تا به فشار ته چاهی و دمای چرخشی ته چاه برسد که از آن لحظه به بعد دما و فشار ثابت شده و تا پایان آزمایش ثابت می‌ماند. فشار توسط یک پمپ با استفاده از روغن بر روی دوغاب اعمال شده و دما نیز توسط جکت حرارتی که دور محفظه قرار می‌گیرد به سیمان وارد می‌شود. مقدار استحکام سیمان هر ۳۰ sec توسط دیتالاگر دستگاه ثبت می‌شود. حداکثر زمان پمپ سیمان تا زمانی است که استحکام سیمان به BC ۳۵ برسد. سپس همین روند ادامه پیدا می‌کند تا اینکه استحکام سیمان به BC ۱۰۰ برسد. ۱۰۰ نشان دهنده این است که سیمان بسته است، اما به دلیل اینکه ممکن است در BC ۱۰۰ سیمان بسته شده به دستگاه آسیب بزند معمولاً بستن سیمان را در BC ۷۰

بنتونایت علاوه بر خاصیت پوشای حجم دهنده، کنترل کننده افت صاف آب نیز محسوب می شود. نفوذپذیری سیمان با افزایش غلظت آن افزایش می یابد. بنتونیت تا ۲۰٪ وزنی سیمان اضافه می شود. در غلظت های بالای ۶٪ وزنی بنتونایت، اضافه نمودن یک پراکنده ساز برای کاهش ویسکوزیته و استحکام ژله ای دوغاب ضروری است.

همان طور که از شکل ۲ مشخص است بنتونایت اثر بیشتری در کاهش زمان نیم بندش دارد. با افزایش مقدار سدیم سیلیکات از ۰/۴ گالن در هر کیسه به ۱ گالن در کیسه، زمان بندش تقریباً با BWC ۶٪ بنتونایت برابر است. استحکام تراکمی سیمانی که با بنتونایت ساخته شده است بیشتر از سیمان ساخته شده با سدیم سیلیکات کاهش یافته است. بنتونایت بیشتر می تواند سیمان را حجیم کند یعنی پوشای حجم دهنده بهتری نسبت به سدیم سیلیکات می باشد ولی سیمان ساخته شده با آن با کاهش استحکام تراکمی بیشتری مواجه است.

سیلیکات کمتر از بنتونایت می تواند صافاب دوغاب سیمان را کنترل کند. بنتونایت بهتر از سدیم سیلیکات می تواند آب را در سیستم سیمان نگه دارد و هرزروی دوغاب را کاهش دهد. (شکل ۳)

سیلیکات سدیم جامد، Na_2SiO_3 (متاسیلیکات سدیم)، معمولاً به صورت خشک با سیمان مخلوط می شود. اگر قبل از آماده سازی دوغاب به آب تازه اضافه شود، ممکن است ژلی تشکیل نشود مگر اینکه کلرید کلسیم نیز اضافه گردد. محدوده پیشنهادی برای استفاده از این ماده از ۰/۲ تا ۳٪ وزنی سیمان خشک است. به کمک این غلظت ها دامنه چگالی دوغاب از ۱۴/۵ lb/gal تا ۱۱ lb/gal (که معادل ۱/۷۵ gr/cm³ تا ۱/۳۵ gr/cm³) خواهد بود.

پوشاهای حجم دهنده سیلیکاتی با آهک در سیمان یا با کلرید کلسیم واکنش داده و ژل سیلیکات کلسیم ایجاد می کنند. ساختار ژل، ویسکوزیته کافی را فراهم می کند تا امکان استفاده از مقادیر زیادی آب بدون اینکه در داخل دوغاب آزاد و سرگردان باشند فراهم آید. این فرایند با فرآیندهای پوشای حجم دهنده رسی که آب را جذب می کنند کاملاً متمایز است. سیلیکات های سدیم مایع یا جامد بیشترین استفاده را در این خصوص دارند. مهم ترین مزیت سیلیکات ها تسهیل در ذخیره سازی و جابجایی است. با این حال، به دلیل تمایل آنها به شتاب دهی اثر سایر افزایش ها به خصوص تاخیردهنده ها و کنترل کنندگان، هرزروی و افت صافی کاهش می یابد.

صافاب^۱ با نام های تجاری loloss109LT و FLC-502 استفاده شده است. فقط از یک نوع پخش کننده^۲ با نام تجاری turbo-6 استفاده شده است. از بنتونایت و سدیم سیلیکات به عنوان افزایش های کنترل کننده وزن^۳ در طراحی دوغاب ها استفاده شده است.

متداول ترین تاخیردهنده های بندش سیمان های حفاری، نمک های سدیم و کلسیم اسیدهای لیگنوسولفونیک هستند، که در این مقاله، تاخیردهنده های مورد استفاده شامل کلسیم لیگنوسولفونات و CMHEC بودند. شتاب دهنده های مورد استفاده در این تحقیق شامل کلسیم کلرید (CaCl_2) و نمک سدیم کلرید (NaCl) می باشد. آنتی فوم^۴ مورد استفاده در این تحقیقات به نام تجاری defoam-802 مورد استفاده قرار گرفته است. برای مشخص کردن اثر افزایش های مختلف بر روی زمان بندش سیمان براساس نوع افزایش چندین آزمایش انجام گرفته است، که هر کدام به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند.

طراحی دوغاب سیمان بر اساس شرایط چاه، دما، فشار، عمق و سایر خصوصیات دیگر چاه حفاری انجام خواهد شد. هر کدام از افزایش هایی که به سیمان حفاری اضافه می شوند ممکن است اثرات جانبی دیگری نیز بر دوغاب بگذارند. برای بررسی اثرات هر کدام از افزایش های مورد استفاده در سیمان حفاری ۲۵ آزمایش جداگانه طراحی گردید. شمای کلی افزایش های مورد استفاده در آزمایش ها، در جدول (۱) شده است.

۳- نتایج آزمایش و بحث به روی آنها

نتایج حاصل از اندازه گیری خواص روانه شناسی، دانسیته، زمان نیم بندش و استحکام تراکمی مکعب های سیمانی فرمول های فوق در جدول (۲) شرح داده شده است.

۳-۱- اثر پوشای حجم دهنده

بنتونایت و سدیم سیلیکات به صورت عمده جهت افزایش حجم دوغاب و کاهش دانسیته در عملیات سیمانکاری استفاده می شوند. این گونه مواد، اثر ویژه ای بر خواص دوغاب از جمله زمان نیم بندش دوغاب و مقاومت تراکمی مکعب های سیمانی دارند.

- 1 Fluid loss controller
- 2 Dispersant
- 3 Extender
- 4 Retarder
- 5 Accelerator
- 6 Antifoam

جدول ۱. طراحی تست های انجام شده به همراه افزایش های مورد استفاده

Table 1. Designed tests and the relative additives

Test no	Density (pcf)	Cement (Kerman G) gr	Fresh water gr	Bentonite gr	Sodium silica gr	FLC-502 gr	Anti-gas gr	Loloss109LT gr	Cacl2 gr	NaCl gr	Turbo-6 gr	Cal- lignosulfonate gr	CMHEC gr	Defoam-802 gr
۱	۹۵	۴۵۶	۴۵۱/۸	.	.	.	.	۲/۲	.	.	.	.	۰/۷	۱/۲
۲	۹۵	۴۴۴/۲	۴۵۹/۶	۱۳/۲	.	.	.	۲/۱	.	.	.	.	۰/۶۶	۱/۱۵
۳	۹۵	۴۳۲/۷	۴۴۹/۵	۲۵/۹	.	.	.	۲	.	.	.	.	۰/۶۵	۱/۱۲
۴	۹۵	۴۵۶	۴۵۱/۶	.	.	.	.	۳/۱۹	.	.	.	.	۰/۶۸	۱/۱۸
۵	۹۵	۴۴۷	۴۴۷	.	۱۳/۵	.	.	۲/۱۲	.	.	.	.	۰/۶۷	۱/۱۶
۶	۹۵	۴۳۳	۴۳۳	.	۲۶	.	.	۲/۰۳	.	.	.	.	۰/۶۵	۱/۱۲
۷	۱۱۸	۷۷۶	۳۴۰/۶	.	.	۴/۶۵	.	.	.	.	۵/۴۳	.	.	۲/۰۲
۸	۱۱۸	۷۷۱	۳۳۹/۴	.	.	۴/۵۶	.	۲۲/۸	.	.	۵/۳۲	.	.	۱/۹۸
۹	۱۱۸	۷۶۴	۳۳۲/۲	.	.	۴/۴۷	.	۴۴/۷۶	.	.	۵/۲۲	.	.	۱/۹۴
۱۰	۱۱۸	۶۴۶	۲۸۳/۸	.	.	۳/۸۷	.	۱۹۳/۸	.	.	۴/۵۲	.	.	۱/۶۸
۱۱	۱۱۸	۷۷۶	۳۴۶/۶	.	.	۴/۶۵	.	.	.	.	۵/۴۳	.	.	۲/۰۶
۱۲	۱۱۸	۷۶۵	۳۴۶/۹	.	.	۴/۵۹	.	.	۱۰/۴	.	۵/۳۵	.	.	۱/۹۹
۱۳	۱۱۸	۷۵۵	۳۴۷/۱	.	.	۴/۵۳	.	.	۲۰/۸	.	۵/۲۸	.	.	۱/۹۶
۱۴	۱۱۸	۶۸۰	۳۴۱/۴	.	.	۴/۰۸	.	.	۱۰۲/۴	.	۴/۷۶	.	.	۱/۷۷
۱۵	۱۱۸	۷۷۷	۳۴۸/۳	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۳	.	.	۲/۰۲
۱۶	۱۱۸	۷۷۷	۳۴۸/۱	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۳	۰/۷۷	.	۲/۰۲
۱۷	۱۱۸	۷۷۶	۳۴۷/۱	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۲	۲/۱	.	۲/۰۲
۱۸	۱۱۸	۷۷۴	۳۴۵/۴	.	.	۵/۴۱	.	.	.	.	۲/۳۲	۶/۱۹	.	۲/۰۱
۱۹	۱۱۸	۷۷۷	۳۴۸/۳	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۳	.	.	۲/۰۲
۲۰	۱۱۸	۷۷۷	۳۴۸/۱	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۳	۰/۷۷	.	۲/۰۲
۲۱	۱۱۸	۷۷۶	۳۴۷/۱	.	.	۵/۴۳	.	.	.	.	۲/۳۲	۳/۱	.	۲/۰۲
۲۲	۱۱۸	۷۷۴	۳۴۵/۴	.	.	۵/۴۱	.	.	.	.	۲/۳۲	۶/۱۹	.	۲/۰۱
۲۳	۱۱۸	۷۶۰	۳۲۴/۳	.	.	۵/۳۲	۳۷/۷	.	.	.	۴/۵۶	۱/۱۴	.	۱/۹۸
۲۴	۱۱۸	۷۶۰	۳۲۳/۶	.	.	۶/۴۶	۳۷/۷	.	.	.	۴/۵۶	۱/۱۴	.	۱/۹۸
۲۵	۱۱۸	۷۶۰	۳۲۲/۹	.	.	۷/۶	۳۷/۷	.	.	.	۴/۵۶	۱/۱۴	.	۱/۹۸

جدول ۲. خواص رئولوژیکی، حجم فیلترات، زمان نیم بندش و استحکام تراکمی نمونه های مرتبط با هر تست

Table 2. Rheological properties, filtrate volume, thickening time and compressive strength of each test

Compressive strength (psi)	۹۰۰	۷۰۰	۴۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۵۰۰	۱۹۸۱	۲۲۱۰	۲۲۷۰	۲۱۸۰	۱۹۸۱	۲۱۷۰	۲۳۵۰	۱۸۹۰
Thickening time (min)	۲۸۰	۲۳۵	۱۹۲	۲۸۰	۲۷۰	۱۹۵	۴۱۴	۳۲۱	۲۰۲	-	۴۱۴	۳۵۵	۲۵۰	۵۹۸
Fluid loss (cc)	۲۸۰	۲۲۰	۸۹	۲۸۰	۲۶۰	۱۶۰	۴۸	۵۴	۶۴	-	۴۸	۵۱	۵۹	۶۷
Gel10MinDH	۱۴	۱۵	۳۰	۳۷	۲۵	۶۴	۷۰	۸۷	۲۱۷	GU [®]	۲۷	۷۲	۹۹	۶۷
Gel 10 min	۱۳	۱۸	۲۴	۱۵	۲۰	۶۷	۶۰	۷۶	۱۵۶	۲۰۰	۳۴	۴۲	۸۹	۱۲۰
Gel 10 s DH	۱	۲	۷	۹	۶	۱۱	۸	۸	۲۲	GU	۳	۹	۱۱	۵
Gel-10ss	۲	۳	۵	۵	۴	۱۲	۳	۷	۱۲	۱۹	۴	۷	۷	۶
YP DH	۲	۸	۱۴	۵	۲	۱۳	۴	۸	۲۲	GU	۱۶	۲۱	۲۱	۱۱
YP surface	۳	۱۲	۲۲	۱	۷	۱۳	۲	۴	۱۶	۳۴	۱۴	۱۵	۱۸	۱۳
PV DH (cp)	۱۵	۱۸	۲۱	۱۵	۲۱	۳۰	۴۳	۶۰	۶۴	GU	۱۹	۱۶	۲۱	۵۴
PV surface	۲۱	۲۵	۳۳	۱۹	۲۵	۳۹	۲۰	۵۵	۶۰	۶۳	۱۳	۱۵	۱۸	۶۳
θ 3 DH	۱	۳	۴	۲	۲	۷	۵	۳	۲۰	GU	۲	۸	۸	۳
θ 3 surface	۱	۵	۶	۱	۴	۸	۲	۲	۱۱	۱۷	۳	۵	۷	۶
θ 6 DH	۲	۴	۷	۳	۳	۸	۷	۴	۲۳	GU	۲	۹	۹	۴
θ 6 surface	۲	۷	۹	۲	۵	۹	۴	۳	۱۲	۱۸	۴	۶	۸	۷
θ 100 DH	۷	۱۴	۲۴	۲۲	۹	۲۳	۱۸	۲۸	۵۳	GU	۲۲	۲۶	۲۸	۲۹
θ 100 surface	۱۰	۲۰	۲۸	۷	۱۵	۲۶	۱۲	۲۲	۲۶	۵۵	۱۸	۲۰	۲۴	۳۴
θ 200 DH	۱۱	۱۹	۳۲	۲۸	۱۷	۲۶	۳۴	۵۴	۸۷	GU	۲۷	۳۲	۳۶	۴۶
θ 200 surface	۱۶	۲۷	۲۸	۱۴	۲۰	۳۴	۲۲	۴۷	۵۴	۷۹	۲۲	۲۶	۳۰	۵۴
θ 300 DH	۱۷	۲۶	۴۵	۳۲	۲۳	۴۳	۴۷	۶۸	۹۶	GU	۲۵	۳۷	۴۲	۶۵
θ 300 surface	۲۴	۳۷	۵۰	۲۰	۲۲	۵۲	۳۲	۵۹	۷۶	۹۷	۲۷	۳۰	۳۶	۷۶
Density (pcf)	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
Temperature (degF)	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶
Test no	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴

۱۸۹۰	۲۴۰۰	۲۳۳۰	۲۰۸۰	۱۷۳۰	۲۴۰۰	۲۳۱۰	۱۹۰۰	۱۱۲۰	۲۵۰۰	۲۴۰۰	۲۳۷۰
۵۹۸	۲۷۰	۳۱۰	۳۳۰	۶۳	۲۷۰	۳۱۵	۴۳۵	۷۶۰	۲۱۰	۲۳۲	۲۸۲
۶۷	۷۲	۷۰	۶۷	۵۳۰	۷۲	۶۷	۶۰	۴۸	-	-	-
۶۷	۱۲۴	۱۲۶	۱۱۵	۱۰۹	۱۳۱	۱۱۸	۱۱۸	۱۰۷	۱۱۰	۱۱۷	۱۲۴
۱۲۰	۱۴۵	۱۵۴	۱۳۸	۱۲۳	۱۲۰	۱۱۵	۱۰۹	۹۸	۴۸	۵۰	۵۱
۵	۱۳	۱۱	۱۰	۸	۹	۸	۵	۵	۸	۸	۱۰
۶	۱۵	۱۲	۱۱	۷	۹	۷	۶	۳	۴	۸	۹
۱۱	۲۵	۲۳	۱۵	۱۶	۲۳	۲۵	۲۱	۲۳	۱۸	۲۰	۲۱
۱۳	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳	۸	۸	۴	۱	۹	۱۱	۱۵
۵۴	۱۵۶	۱۵۳	۱۴۱	۱۲۶	۱۲۲	۱۱۲	۱۰۵	۹۴	۱۳۱	۱۴۳	۱۶۲
۶۳	۱۷۸	۱۷۷	۱۶۲	۱۵۳	۱۲۳	۱۱۸	۱۱۵	۱۰۸	۸۱	۹۲	۱۰۵
۳	۱۲	۱۲	۷	۶	۹	۶	۴	۵	۷	۷	۸
۶	۱۵	۱۲	۱۰	۷	۸	۸	۵	۴	۴	۵	۷
۴	۱۳	۱۳	۸	۷	۱۰	۷	۶	۶	۸	۸	۹
۷	۱۶	۱۴	۱۲	۸	۹	۹	۶	۵	۵	۶	۸
۲۹	۷۷	۷۴	۶۲	۵۸	۶۴	۶۲	۵۶	۵۴	۶۳	۶۸	۷۵
۲۴	۸۱	۷۸	۷۰	۶۴	۴۹	۴۷	۴۲	۳۷	۳۶	۴۲	۵۰
۴۶	۱۲۶	۱۰۷	۸۹	۷۳	۸۷	۸۵	۷۸	۷۴	۹۰	۹۲	۱۰۷
۵۴	۱۴۷	۱۲۶	۹۸	۸۳	۷۶	۷۴	۷۰	۶۲	۵۴	۶۸	۸۷
۵۵	۱۹۶	۱۷۶	۱۵۶	۱۴۲	۱۴۶	۱۳۷	۱۲۶	۱۱۷	۱۵۰	۱۴۳	۱۸۳
۷۶	۲۰۰	۱۹۶	۱۷۸	۱۶۶	۱۳۱	۱۲۶	۱۱۹	۱۰۹	۹۰	۱۰۳	۱۲۰
۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
۸۶	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۶۱	۱۶۱	۱۶۱
۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵

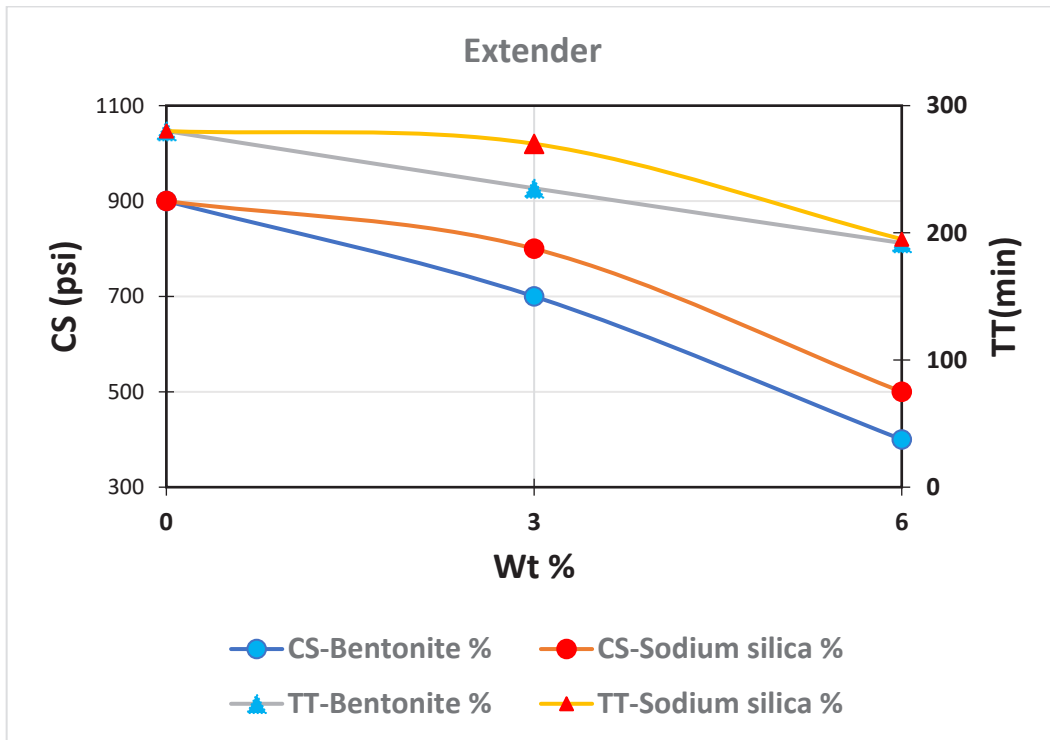
ژله ای شدن دوغاب سیمان GU Gell Up t:

می‌دارد و مانع از حضور آزاد آن در دوغاب می‌شود. با افزایش درصد بنتونایت مقاومت تراکمی سیمان کاهش پیدا خواهد کرد. با افزایش بنتونایت اگرچه زمان نیم بندش کاهش می‌یابد اما به علت افزایش حجم دوغاب در اثر اضافه حجم بنتونایت مقاومت تراکمی آن کاهش می‌یابد.

با افزایش غلظت سدیم سیلیکات از صفر تا یک گالن در کیسه، زمان بندش سیمان از ۲۸۰ min به ۱۹۵ min کاهش پیدا کرده است. مقدار پلاستیک ویسکوزیته و نقطه واروی افزایش می‌یابد، هم‌چنین میزان صافاب دوغاب از ۳۸۰ CC به ۱۶۰ CC در نیم ساعت کاهش پیدا می‌کند. با افزایش مقدار سدیم سیلیکات استحکام ۲۴ ساعته سیمان کاهش پیدا کرده است.

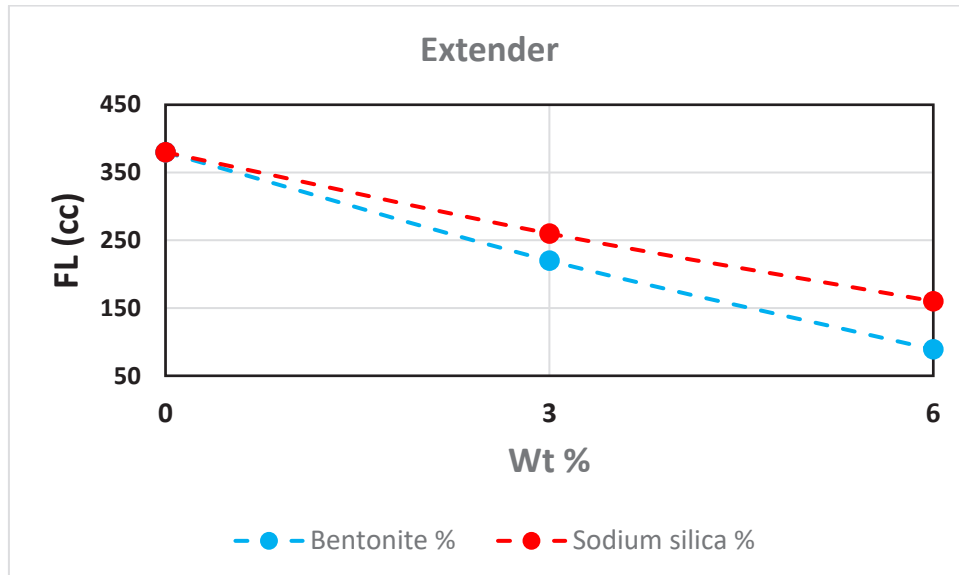
در سه آزمایش متوالی، با افزایش مقدار بنتونایت از ۰٪ به ۶٪، مقدار پلاستیک ویسکوزیته و نقطه واروی افزایش یافته است. با افزایش درصد بنتونایت از ۰٪ تا ۶٪، زمان بندش سیمان از ۲۸۰ min به ۱۹۲ min کاهش پیدا کرده است. اگرچه بنتونایت به عنوان افزایه کنترل وزن در ساخت دوغاب‌ها استفاده می‌شود اما این ماده خود می‌تواند به عنوان شتاب‌دهنده در دوغاب نقش داشته باشد و زمان بندش سیمان را کاهش دهد.

با این افزایش درصد استفاده بنتونایت در ساخت دوغاب سیمان، میزان صافاب دوغاب از ۳۸۰ CC در نیم ساعت به ۸۹ CC در نیم ساعت کاهش پیدا می‌کند زیرا بنتونایت آب را به خود جذب کرده و در سیستم دوغاب نگه



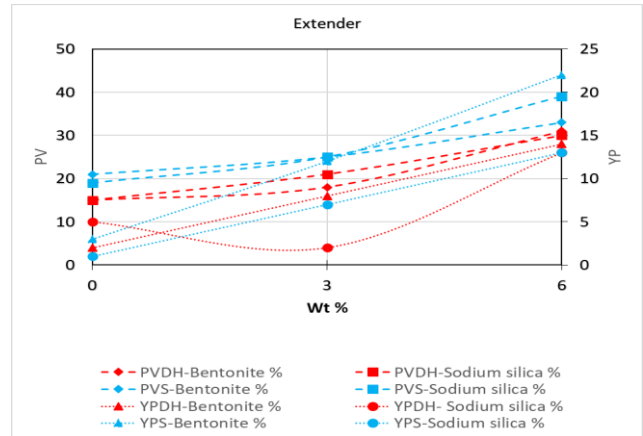
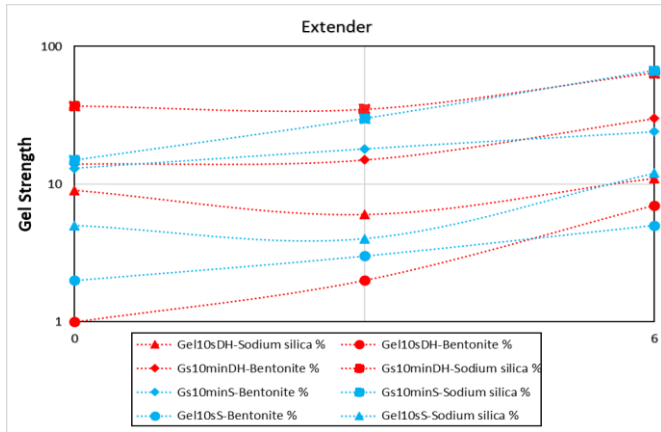
شکل ۲. مقایسه زمان بندش و استحکام تراکمی سیمان در درصد‌های مختلف بنتونایت و سدیم سیلیکات

Fig. 2. Thickening time and Compressive strength of Bentonite and Sodium Silicate as Extender



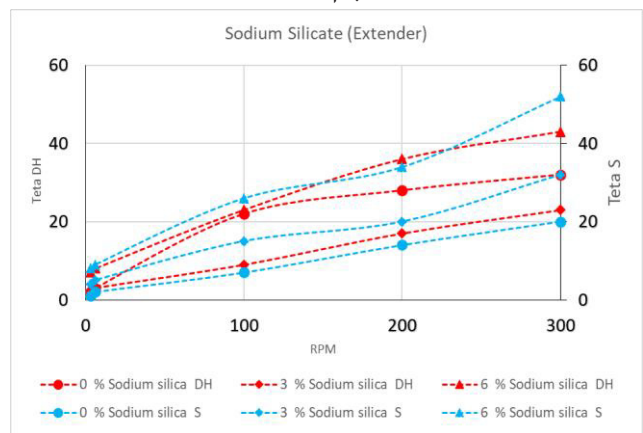
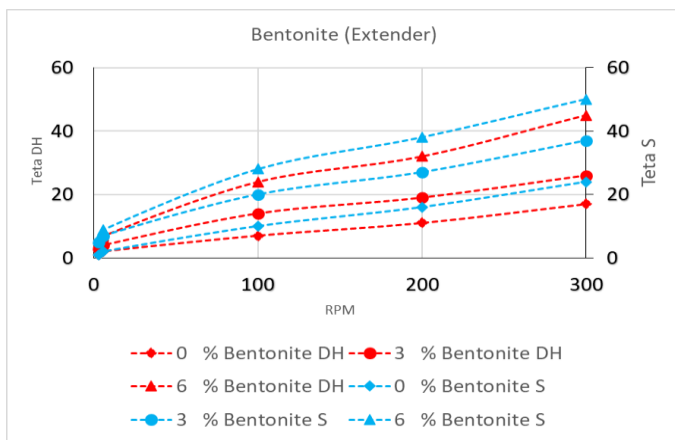
شکل ۳. مقایسه صافاب دو سیستم بنتونایتی و سدیم سیلیکات

Fig. 3. Fluid loss for Bentonite and Sodium Silicate as Extender



استحکام زله ای دوغاب حاوی پوشای حجم دهنده

ویسکوریته پلاستیک و تولید پوینت دوغاب سیمان حاوی پوشای حجم دهنده



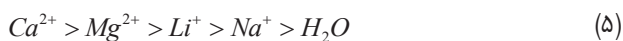
مقایسه تاثیر دمای سطح و ته چاهی بر دوغاب حاوی بنتونایت

مقایسه تاثیر دمای سطح و ته چاهی بر دوغاب حاوی سدیم سیلیکات

شکل ۴. مقایسه خواص روانه شناسی دوغاب سیمان حاوی بنتونایت و سدیم سیلیکات (پوشای حجم دهنده)

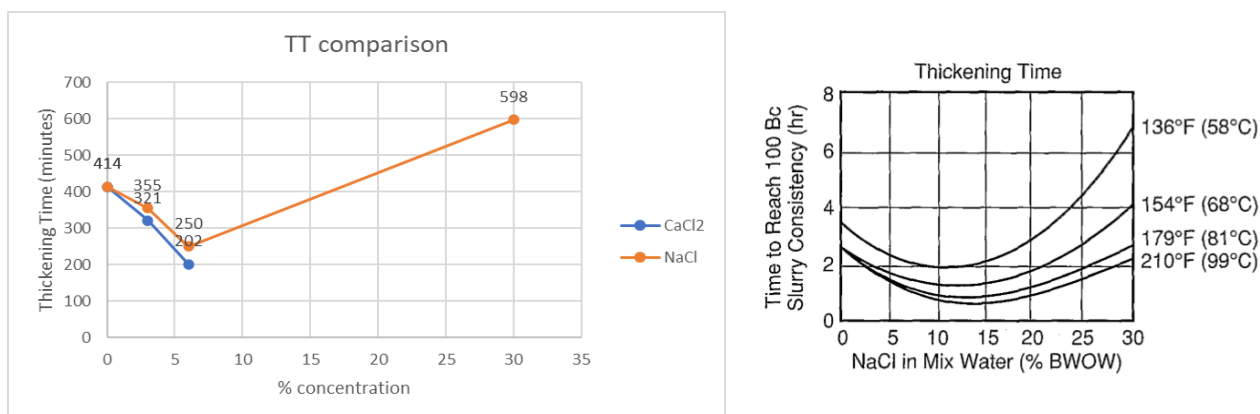
Fig. 4. Rheological properties of Bentonite and Sodium Silicate as Extender

درمیان کلریدها، عمل شتاب‌دهی با حرکت از کلریدهای تک ظرفیتی به دو ظرفیتی و سه ظرفیتی و با افزایش شعاع کاتیون همراه قوی‌تر می‌شود. کاتیون‌ها و آنیون‌ها با توجه به کارایی به عنوان شتاب‌دهنده برای سیمان پرتلند طبقه‌بندی می‌شوند.



۳-۲- اثر شتاب‌دهنده‌ها بر خواص دوغاب

شتاب‌دهنده‌ها به دوغاب سیمان اضافه می‌شوند تا زمان بندش در مراحل I و II و با سرعت بخشیدن به فرآیند سخت شدن در مراحل III و IV کوتاه شود. (شکل ۱). آن‌ها اغلب برای جبران تاخیر برخی افزایش‌ها مانند پخش‌کننده‌ها و عوامل کنترل افت صافی استفاده می‌شوند. بسیاری از نمک‌های غیرآلی شتاب‌دهنده سیمان پرتلند هستند. در این میان، کلریدها بیشتر شناخته شده هستند. با این حال، یک عمل شتاب‌دهی برای بسیاری از نمک‌های دیگر از جمله کربنات‌ها، سیلیکات‌ها (به ویژه سیلیکات سدیم)، آلومینات‌ها، نیترات‌ها، نیتريت‌ها، سولفات‌ها، تیوسولفات‌ها و بازهای قلیایی مانند هیدروکسیدهای سدیم، پتاسیم و آمونیوم گزارش شده است.



شکل ۵. مقایسه زمان بندش افزایه های شتاب‌دهنده (کلسیم کلرید و سدیم کلرید) در مقایسه با نمودار کتاب مرجع [۲۱]

Fig. 5. Comparison of thickening time for two different accelerators of calcium chloride and sodium chloride with the reference [21]

افزایش مقدار سدیم کلرید از ۰٪ تا ۶٪، مقدار پلاستیک ویسکوزیته و نقطه واروی ژل ۱۰ sec و ژل ۱۰ min افزایش می‌یابد، در حالی که وقتی مقدار نمک به ۳۰٪ می‌رسد مقدار نقطه واروی کم شده است.

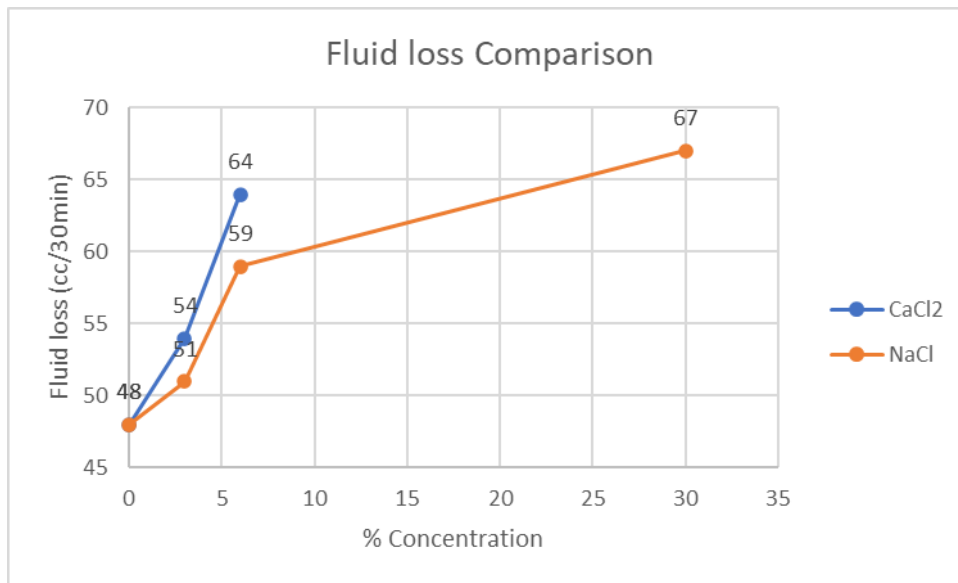
با افزایش درصد نمک تا ۶٪ وزنی آب، نمک به عنوان شتاب‌دهنده عمل کرده است و زمان بندش را از ۴۱۴ min به ۲۵۰ min کم کرده است. در حالی که با افزایش مقدار نمک به ۳۰٪، نمک به عنوان کند کننده عمل کرده و زمان بندش را تا ۵۹۸ min افزایش داده است.

همین عامل باعث می‌شود که سیمان ریتارد شده و سیمان روان تر شود و در نتیجه مقدار نقطه واروی آن نیز کاهش یابد. از طرفی دیگر افزایش زمان بندش سیمان نیز باعث می‌شود که سیمان دیرتر شروع به بستن کند و در نهایت مقاومت تراکمی آن نیز بعد ۲۴ hr کاهش یابد. با افزایش غلظت نمک و نمکی شدن دوغاب، قدرت کنترل‌کنندگی افزایه FLC-502 کاهش یافته که این خود منجر به افزایش مقدار صافاب شده است.

کلسیم کلرید به دلیل اینکه غلظت یون کلرید بیشتری نسبت به سدیم کلرید دارد به طور کلی زمان بندش را بیشتر تحت تاثیر قرار داده و بیشتر کاهش می‌دهد. سدیم کلرید در غلظت‌های کم (کمتر از ۱۰٪) به عنوان شتاب‌دهنده عمل کرده است در حالی که در غلظت‌های بالا دقیقاً نتیجه معکوس داده است و به عنوان یک کند کننده در سیستم دوغاب عمل کرده است. (شکل ۵)

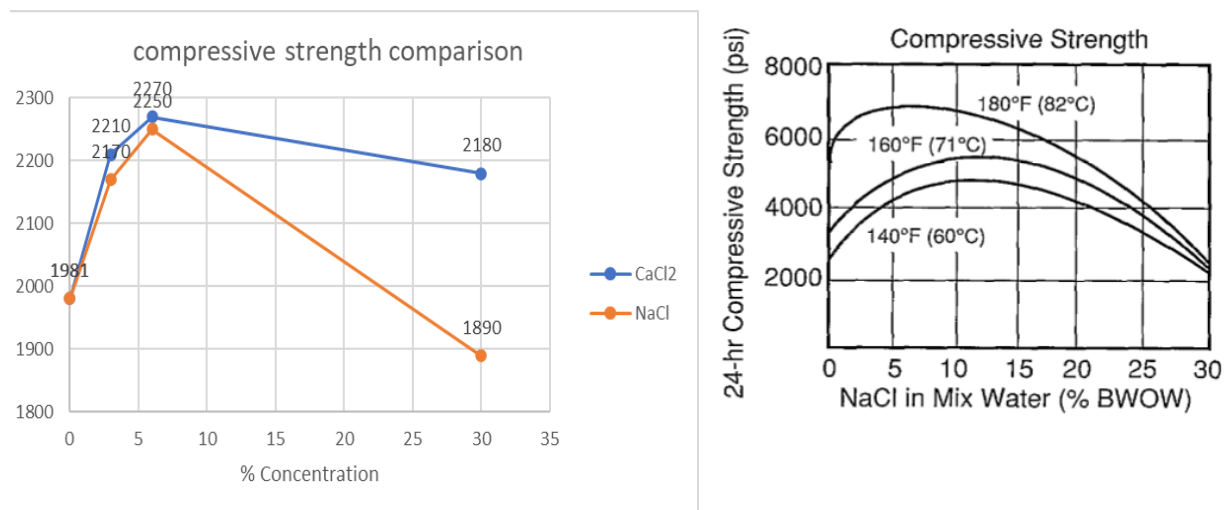
از دو نوع رایج شتاب‌دهنده در صنعت سیمانکاری یعنی کلسیم کلرید و سدیم کلرید جهت بررسی زمان بندش سیمان استفاده شده است. با افزایش مقدار CaCl_2 از ۰ BWOC به ۶ BWOC، مقادیر پلاستیک ویسکوزیته و نقطه واروی، ژل ۱۰ sec و ژل ۱۰ min افزایش می‌یابد، در حالی که دوغاب با ۳۰٪ کلسیم کلرید در دمای BHCT ژل می‌کند و نمی‌توان خواص آن را با ویسکومتر اندازه گرفت. با افزایش غلظت کلسیم کلرید از ۰٪ به ۳٪، زمان بندش سیمان از ۴۱۴ min به ۳۲۱ min می‌رسد که باعث می‌شود ۹۳ min کم شود. با افزایش از ۳٪ به ۶٪ زمان بندش ۱۱۹ min کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر از ۶٪، رفتار دوغاب قابل پیش‌بینی نیست. با افزایش غلظت سدیم کلرید مقدار صافاب از ۴۶ cc به ۶۴ cc در نیم ساعت می‌رسد. مشاهده می‌شود که با وجود افزایش نمک به ۳۰٪ مقدار صافاب به صورت جزئی زیاد می‌شود.

با افزایش درصد نمک کیفیت عملکرد افزایه کنترل صافاب کاهش یافته و مقدار صافاب افزایش می‌یابد. با افزایش درصد کلسیم کلرید زمان بندش کوتاه‌تر شده و سیمان زودتر می‌بندد و استحکام تراکمی آن در طی ۲۴ hr افزایش می‌یابد. شیب رشد استحکام تراکمی در درصدهای بالا کاهش می‌یابد و نهایتاً سیمان با ۳۰٪ کلسیم کلرید دارای استحکام ۲۱۸۰ psi خواهد بود. استحکام سیمان در درصدهای پایین‌تر از کلسیم کلرید افزایش بیشتری نسبت به درصدهای بالاتر دارد. کاهش استحکام نهایی در غلظت ۳۰٪ به دلیل این است که دانه‌های نمک در سیمان به دلیل غلظت زیاد دوباره تشکیل بلور خواهند داد و استحکام نهایی را کاهش می‌دهند. با



شکل ۶. مقایسه مقدار صافاب با دو شتاب‌دهنده مختلف کلسیم کلرید و سدیم کلرید

Fig. 6. Comparison of filtrate volume with two different accelerators of calcium chloride and sodium chloride



شکل ۷. مقایسه مقدار صافاب با دو شتاب‌دهنده مختلف کلسیم کلرید و سدیم کلرید و مقایسه با نمودار مرجع [۲۱]

Fig. 7. Comparison of Compressive Strength of two different accelerators (calcium chloride and sodium chloride) with the reference [21]

کلرید ژل بیشتری نسبت به سدیم کلرید ایجاد می‌کند و همین خاصیت باعث می‌شود که کیک سیمان به خوبی شکل نگیرد و منافذ بزرگ‌تری داشته باشد که در این صورت مقدار آب بیشتری از سیمان در اثر فشار خارج می‌شود. (شکل ۶)

افزایش کلسیم کلرید و سدیم کلرید تا ۶٪ باعث افزایش مقاومت تراکمی بعد از ۲۴ ساعت سیمان می‌شود. غلظت ۳۰٪ آن‌ها باعث ریتارد شدن دوغاب می‌شود و استحکام ۲۴ ساعته آن‌ها را کاهش می‌دهد. عامل کاهش استحکام تراکمی نهایی پدیده تشکیل کریستال می‌باشد. (شکل ۷)

همان‌گونه که در مقایسه دو نمودار فوق نشان داده شده است، رفتار کلرید سدیم مطابق با نتایج ارائه شده در آزمایشات قبلی بوده است. این مقایسه علاوه بر تاییدی بر درستی آزمایش‌های انجام شده استنتاج می‌شود که کلرید کلسیم نیز رفتاری مشابه داشته ولی در غلظت ۳۰٪ به دلیل ژله‌ای شدن دوغاب این اندازه‌گیری مقدور نبوده است.

کلسیم کلرید اثر بیشتری نسبت به سدیم کلرید بر محیط دوغاب سیمان دارد و باعث کم شدن اثر افزایش‌دهنده‌های کنترل‌کننده صافاب شده و مقدار صافاب در دوغاب‌های کلسیم کلریدی را افزایش می‌دهد. دوغاب دارای کلسیم

به ۳۱۵ min افزایش یافته است (۴۵ min) در حالی که با ۴ برابر کردن درصد کند کننده مقدار زمان بندش ۱۲۰ min افزایش یافته است که این تقریباً ۲/۶۷ برابر افزایش زمان بندش در حالت اول است. با افزایش این ماده، به ۱٪ میزان صافاب از ۷۲ به ۴۸ cc در نیم ساعت رسیده است. با توجه به کاهش ۲۴ ml صافاب، نشان می‌دهد که این نوع کند کننده اثر کنترل کنندگی صافاب را به صورت اثر جانبی دارد و تا حد قابل قبولی میزان صافاب را کنترل کرده است. با افزایش مقدار کند کننده، مقاومت تراکمی بعد از ۲۴ ساعت سیمان تنزل پیدا کرده است. به گونه‌ای که با افزایش ۱٪ کند کننده، مقدار استحکام تراکمی سیمان تا ۱۱۲۰ psi کاهش پیدا کرده است. (psi ۱۲۸۰)

با افزایش مقدار درصد کند کننده در سیستم دوغاب، کند کننده CMHEC زمان بندش را بیشتر تحت تاثیر قرار داده است و آن را طولانی‌تر می‌کند. این افزایش در زمان بندش برای کند کننده کلسیم لیگنوسولفونات تقریباً به صورت خطی عمل کرده است در حالی که کند کننده CMHEC به صورت غیر خطی و با شیب تندی افزایش پیدا کرده و در درصدهای بالا تر از ۰/۱٪ قوی‌تر از کلسیم لیگنوسولفونات عمل کرده است. (شکل ۸)

با افزایش غلظت کند کننده از ۰٪ به ۱٪، کند کننده CMHEC صافاب را به ۲۴ cc در نیم ساعت کاهش داده است در حالی که کلسیم لیگنوسولفونات فقط ۲۴ cc در نیم ساعت کاهش داده است. این مقایسه نشان می‌دهد که کند کننده CMHEC بهتر از کلسیم لیگنوسولفونات توانسته است صافاب را نیز کنترل کند. (شکل ۹)

استحکام تراکمی سیمان بعد از ۲۴ hr برای سیستمی که با CMH-EC ریتارد شده است کمتر از کلسیم لیگنوسولفونات است. با افزایش مقدار کند کننده به ۱٪ این اختلاف به ۶۱۰ psi رسیده است. دلیل این امر آن است که چون CMHEC سیمان را بیشتر ریتارد می‌کند باعث شده است که زمان بندش آن به تاخیر بیفتد و در نتیجه دیرتر استحکام بگیرد.

۳-۴- اثر کنترل کننده صافاب بر زمان نیم‌بندش

افزایه کنترل صافاب باعث بالارفتن ویسکوزیته دوغاب سیمان در سطح می‌شود ولی ویسکوزیته سیمان را در دمای بالای ته چاه تثبیت می‌کند و باعث می‌شود که سیمان روان بماند و ژل نکند. در شکل زیر همان‌طور که مشاهده می‌شود ۳٪ وزنی مختلف از افزایه کنترل فیلتراسیون با نام تجاری FLC را در یک گراف آورده و تفاوت هر کدام از نظر مدت زمان بندش مورد توجه قرار گرفته است.

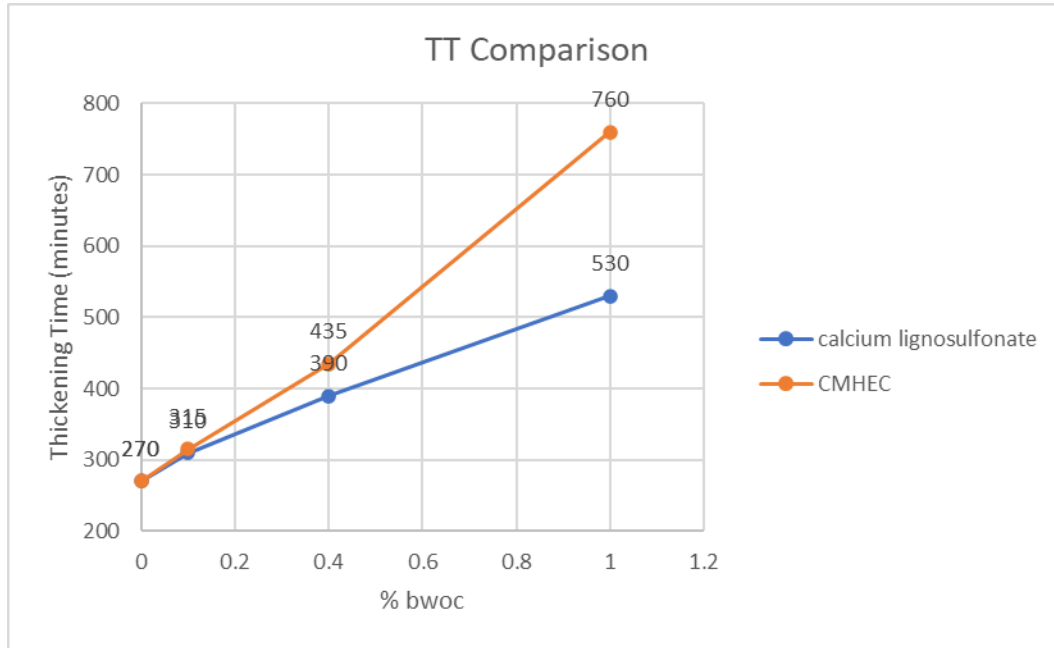
از مقایسه دو نمودار فوق استنتاج می‌شود که محل بیشینه و شکل منحنی روندی صحیح را برای آزمایشات صورت گرفته به همراه داشته‌اند. شکل حاصله برای کلرید سدیم با کلرید کلسیم اندکی متفاوت بوده و انتظار می‌رود شیب نمودارهای پیوسته برای این ماده از بعد بیشینه اندکی ملایم‌تر کلرید سدیم باشد. به عبارتی دیگر افزایش غلظت نمک کلسیمی تاثیر مخرب کمتری را نسبت به نمک سدیمی داشته است.

۳-۳- اثر کندکننده‌ها بر خواص دوغاب

کند کننده‌ها بسته به نوع و دمای که به کار گرفته می‌شوند اثرات مختلفی می‌توانند بر سیستم سیمان بگذارند. از دو نوع رایج کند کننده یعنی کلسیم لیگنوسولفونات و CMHEC جهت بررسی زمان بندش سیمان استفاده شده است. لیگنوسولفونات‌ها بیشتر به عنوان پراکنده‌ساز در فرمولاسیون گل حفاری استفاده می‌شوند اما در دوغاب سیمان نیز موثر هستند. با این حال، از آنجا که آن‌ها به طور هم‌زمان به عنوان کندکننده زمان بندش عمل می‌کنند، نمی‌توانند در دمای پایین استفاده شوند. با افزایش درصد کلسیم لیگنوسولفونات از ۰٪ تا ۱٪ وزنی سیمان، مقدار زمان بندش تقریباً با شیب ثابت در حال افزایش است. این نشان می‌دهد که کلسیم لیگنوسولفونات زمان افزایش دوغاب را با نسبت ثابتی افزایش می‌دهد. از این خاصیت می‌توان در طراحی بهتر سیمان‌ها استفاده کرد.

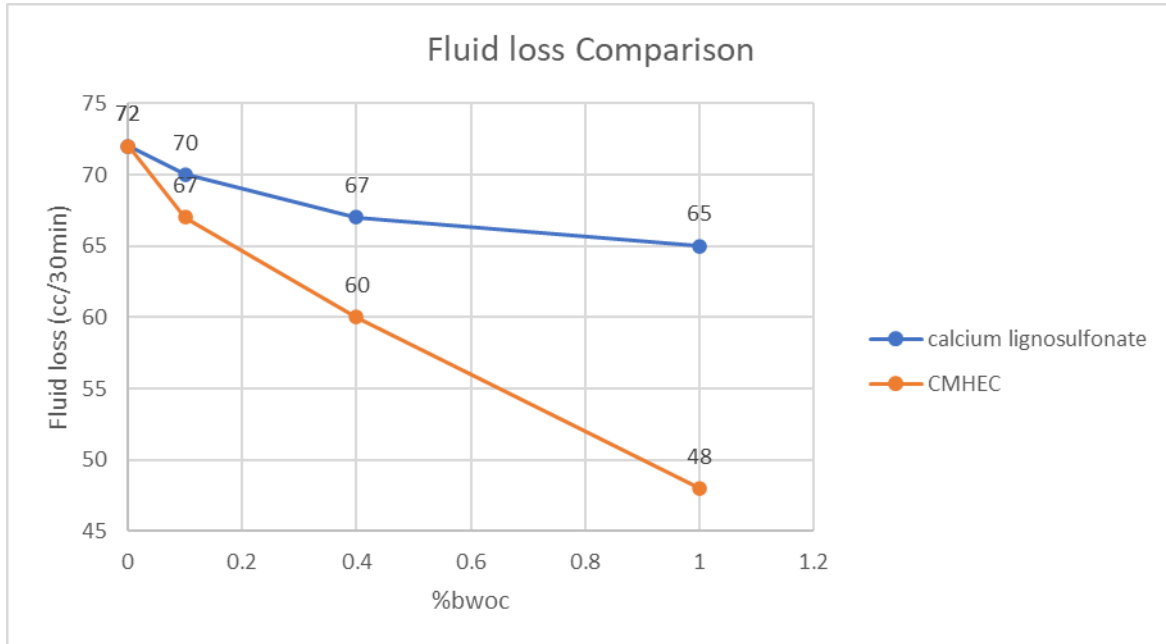
با افزایش غلظت کلسیم لیگنوسولفونات از ۰٪ تا ۱٪، مقدار صافاب فقط به اندازه ۲۴ cc در هر نیم ساعت تغییر کرده است. این نوع کند کننده دارای خاصیت کنترل کنندگی صافاب به صورت اثر جانبی را دارد. با افزایش میزان کند کننده، استحکام سیمان از ۲۴۰۰ psi به ۱۷۳۰ psi کاهش پیدا کرده است. افزایش زمان بندش باعث می‌شود که شروع تشکیل استحکام سیمان به تاخیر بیفتد که همین عامل باعث می‌شود که استحکام نهایی آن بعد از ۲۴ hr کم‌تر شود.

برای بررسی اثر CMHEC بر روی خواص دوغاب، ۴ آزمایش با غلظت‌های مختلف از این نوع کند کننده انجام گرفت، مقادیر پلاستیک‌ویسکوزیته و نقطه واروی کاهش یافته است. این عامل باعث روان‌تر شدن سیمان در هنگام پمپاژ آن می‌شود. این نشان می‌دهد که این نوع کند کننده باعث کاهش ویسکوزیته سیمان می‌شود که این عامل را می‌توان در طراحی عملیات سیمانکاری لحاظ کرد. با افزایش مقدار کند کننده، زمان بندش سیمان به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که هر چقدر مقدار کند کننده افزایش یابد، زمان بندش با شیب بیشتر زیاد می‌شود. با افزایش ۰/۱٪ CMHEC مقدار زمان بندش از ۲۷۰ min



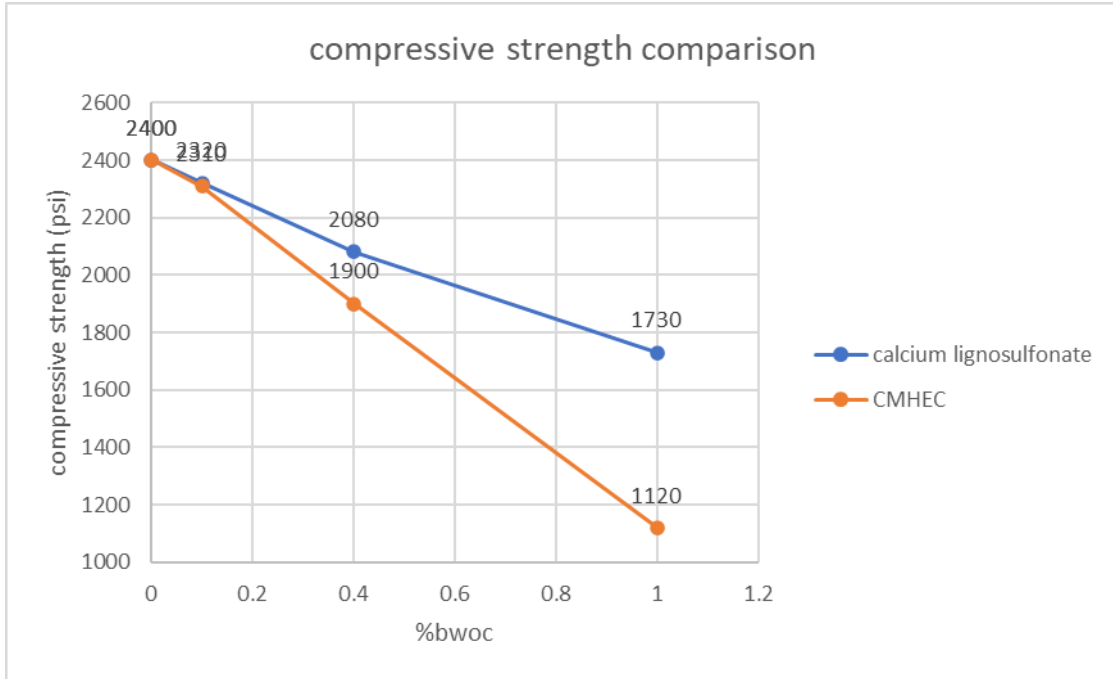
شکل ۸. مقایسه زمان بندش دوغاب با کند کننده‌های مختلف

Fig. 8. Comparison of Thickening Time for two different retarders



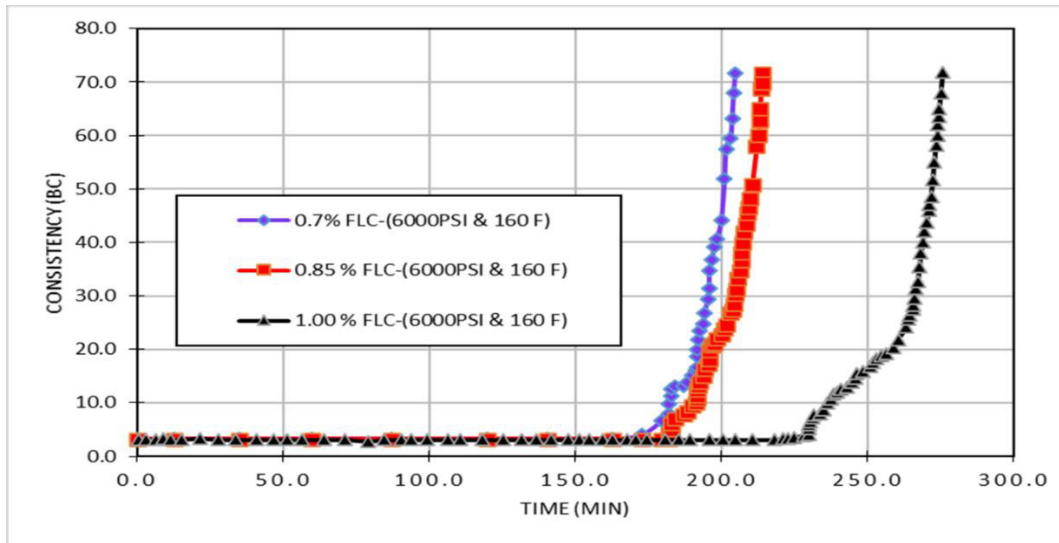
شکل ۹. قایسه مقدار صافاب دوغاب با کند کننده‌های مختلف

Fig. 9. Comparison of Fluid Loss for two different retarders



شکل ۱۰. مقایسه استحکام تراکمی برای دوغاب با کند کننده های مختلف

Fig. 10. Comparison of Compressive Strength for two different retarders



Job Type	SQ Plug	Depth (MD)	2250 m	TVD	2250 m
BHST	190 F	BHCT	161 F	BHP	5790 psi
Starting Temperature	80 F	Time to Temperature	38 min	Heating Rate	4/62 F/min
Starting Pressure	938	Time to Pressure	38 min		
Type of Cement		Density	Type of Water	Yield	
Kerman 'G'		118 pcf	Fresh Water	1/27	

شکل ۱۱. مقایسه زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان در حضور افزاینده کنترل کننده افت صافی

Fig. 11. Comparison of Slurry Thickening Time with presence of FLC

۹- CMHEC اثر بیشتری بر روی استحکام گذاشته و کاهش بیشتری را در پی داشته است به گونه‌ای که با افزایش ۱٪ CMHEC به سیمان مقاومت تراکمی سیمان از ۲۴۰۰ psi تا ۱۷۳۰ psi کاهش پیدا کرده است، در حالی که برای کلسیم لیگنوسولفونات از ۲۴۰۰ psi تا ۱۱۲۰ psi کاهش یافته است.

۱۰- افزایش کنترل‌کننده صافاب سیمان می‌تواند به صورت غیرمستقیم بر زمان بندش اثر بگذارد که همین امر باعث می‌شود که با افزایش این افزایش از ۰/۷٪ به ۱٪، زمان بندش ۷۲ min افزایش یابد. با افزایش ۰/۳٪ افزایش کنترل‌کننده صافاب، مقاومت تراکمی بعد از ۲۴ ساعت سیمان از ۲۵۰۰ psi تا ۲۳۷۰ psi کاهش پیدا کرده است.

منابع

- [1] A. Ahmed, A.A. Mahmoud, S. Elkatatny, W. Chen, The effect of weighting materials on oil-well cement properties while drilling deep wells, Sustainability, 11(23) (2019) 6776.
- [2] M.A. Zomorrodian, Wellbore Integrity: Modifying and Characterizing Oil Well Cement To Enhance Wellbore Logging and Prevent Perforating Damages in Hydraulic Fractured Wells, 2014.
- [3] G. Di Lullo, P. Rae, Cements for Long Term Isolation–Design Optimization by Computer Modelling and Prediction, in: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, OnePetro, 2000.
- [4] K. Johnstone, A. Gill, T. Conlon, M. Bahr, A. Waheed, Cementing Under Pressure in Well-Kill Operations: A Case History From the Eastern Mediterranean Sea, SPE Drilling & Completion, 23(02) (2008) 176-183.
- [5] J. Azar, G. Samuel, Drilling Engineering Pennwell Corporation, Tulsa, OK, (2007).
- [6] A. Shahriar, Investigation on rheology of oil well cement slurries, The University of Western Ontario (Canada), 2011.
- [7] L. Moran, T. Murray, Well cement fluid loss additive and method, 1991.
- [8] F.L. Sabins, D.L. Sutton, The Relationship of Thickening Time, Gel Strength, and Compressive Strength of Oilwell Cements, SPE Production Engineering, 1(02) (1986)

همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش درصد حضور افزایش کنترل‌کننده صافاب، موجب بالا رفتن زمان نیم‌بندش خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- افزایش بنتونایت و سدیم سیلیکات در دوغاب سیمان باعث افزایش نقطه واروی سیمان شده و با جذب آب دوغاب باعث می‌شود که مقدار صافاب کنترل شود به طوری که با افزایش مقدار بنتونایت تا ۶٪ وزنی سیمان، مقدار صافاب از CC۳۸۰ به CC۸۹ در نیم ساعت کاهش یابد. در حالی که سدیم سیلیکات تا CC۱۸۰ کاهش داده است.

۲- بنتونایت و سدیم سیلیکات هر دو زمان بندش سیمان را کاهش می‌دهند و به عنوان شتاب‌دهنده در سیستم سیمان نیز عمل می‌کنند. اثر جانبی شتاب‌دهندگی به سیمان در بنتونایت بیشتر از سدیم سیلیکات است.

۳- بنتونایت نسبت به سدیم سیلیکات اگرچه زمان بندش را کوتاه‌تر می‌کند اما باعث می‌شود که استحکام نهایی سیمان از ۹۰۰ psi تا ۴۰۰ psi کاهش یابد در حالی که سدیم سیلیکات اثر کمتری بر کاهش مقاومت دارد.

۴- کلسیم کلرید نسبت به سدیم کلرید اثر بیشتری بر زمان بندش سیمان دارد و با افزایش ۰٪ آنها از ۰ تا ۶٪، مقدار استحکام تراکمی سیمان از ۱۹۸۱ psi به ۲۱۸۰ psi و ۱۸۹۰ psi به ترتیب برای کلسیم کلرید و سدیم کلرید تغییر می‌دهد.

۵- در درصدهای بالا (۳۰٪) کلسیم کلرید باعث می‌شود که سیمان رئولوژی مناسبی ارائه ندهد و عملاً برای عملیات‌های سیمانکاری کاربردی ندارد و نتایج غیر قابل پیش بینی ارائه می‌کند.

۶- افزایش کلسیم لیگنوسولفونات باعث می‌شود که سیمان با شیب ثابتی افزایش یابد در حالی که با افزایش CMHEC زمان بندش به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد.

۷- کلسیم لیگنوسولفونات در مقایسه با CMHEC اثر کمتری بر روی زمان بندش دارد. به همین دلیل مقدار بیشتری از آن نسبت به CMHEC باید استفاده شود تا اثری مشابه با آن را داشته باشد.

۸- CMHEC مقدار صافات دوغاب را بیشتر از کلسیم لیگنوسولفونات کنترل می‌کند. به گونه‌ای که با افزایش ۱٪ CMHEC به دوغاب سیمان مقدار صافاب از CC ۷۲ به CC ۴۲ در نیم ساعت کاهش پیدا کرده است در حالی که این کاهش برای کلسیم لیگنوسولفونات برابر با CC ۷ در نیم ساعت است.

- [15] L.E. Brothers, D.W. Lindsey, D.T. Terry, Set retarded cement compositions and methods for well cementing, in, Google Patents, 1991.
- [16] S. Gruber, J. Plank, Preparation and effectiveness of a high-temperature anti-settling agent for well cement slurries, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81 (2020) 103416.
- [17] W.S. Bray, W.R. Wood, Well cementing method using a dispersant and fluid loss intensifier, in, Google Patents, 1992.
- [18] T. Kaduku, M. Daramola, F. Obazu, S. Iyuke, Synthesis of sodium silicate from South African coal fly ash and its use as an extender in oil well cement applications, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(12) (2015) 1175-1182.
- [19] S.C. Crema, C.H. Kucera, G. Konrad, H. Hartmann, Fluid loss control additives for oil well cementing compositions, in, Google Patents, 1991.
- [20] A.P. Institute, API Specification for cements and materials for well cementing: API Spec. 10A, in, American Petroleum Institute Washington, 2002.
- [21] E.B. Nelson, J.-F. Baret, M. Michaux, 3 Cement additives and mechanisms of action, in: *Developments in Petroleum Science*, Elsevier, 1990, pp. 3-1-3-37.
- 143-152.
- [9] W. Mahmood, A. Mohammed, K. Ghafor, Viscosity, yield stress and compressive strength of cement-based grout modified with polymers, *Results in materials*, 4 (2019) 100043.
- [10] H. Eskandari-Naddaf, R. Kazemi, ANN prediction of cement mortar compressive strength, influence of cement strength class, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 1-11.
- [11] K. Frenkenberger, S. Köhler, T. Heichele, K.-D. Hötzl, P. Weiss, A. Dressen, Cement accelerator, in, Google Patents, 2013.
- [12] N. Shanahan, A. Sedaghat, A. Zayed, Effect of cement mineralogy on the effectiveness of chloride-based accelerator, *Cement and Concrete Composites*, 73 (2016) 226-234.
- [13] J. Potgieter, S. Potgieter, R. McCrindle, C. Strydom, An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement, *Cement and concrete research*, 33(8) (2003) 1223-1227.
- [14] M. Zajac, J. Skocek, F. Bullerjahn, M.B. Haha, Effect of retarders on the early hydration of calcium-sulphoaluminate (CSA) type cements, *Cement and Concrete Research*, 84 (2016) 62-75.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Dehvedar, S. M. M. Hosseini, *The effect of cementing additives on the rheological properties, thickening time, and compressive strength in drilling operation*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(6) (2023) 1219-1236.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21171.7640



