Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(6) (2023) 261-264
DOI: 10.22060/ceej.2023.21171.7640

The effect of cementing additives on the rheological properties, thickening time, and compressive strength in drilling operation

M. Dehvedar*, S. M. M. Hosseini

Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Plastic viscosity (PV), yield point (YP), fluid loss volume, thickening time, and compressive strength of cement are the main parameters that are necessary for a successful operation. In this study, 25 tests were done to design different slurries and find the effect of various additives, including extenders (bentonite and sodium silicate), accelerators (calcium chloride and sodium chloride), retarders (calcium lignosulfonate and CMHEC), and fluid loss controller (FLC). Calcium chloride provides acceptable results up to 6% of the weight of cement. For more than 6%, it provides unpredictable results. The amount of sodium chloride in high concentrations (30%) also acts as a retarder. Calcium lignosulfonate slows down thickening timeless than CMHEC, while CMHEC can retard the slurry more and increase the closing time. The slurry setting time trend increases in calcium lignosulfonate almost linearly while CMHEC increases nonlinearly. addition of FLC to cement water causes water to be retained in the slurry system and this causes the increase of this additive in the slurry to increase the setting time of cement and reduce its short-term strength (24 hours).

Review History:

Received: Mar. 01, 2022
Revised: Apr. 03, 2023
Accepted: Apr. 17, 2023
Available Online: May, 29, 2023

Keywords:

Oil Well cementing
HPHT cement design
Thickening time
Compressive strength

1- Introduction

In 1995, a study found that 15 percent of primary cement work in the United States failed, about one-third of which was due to the penetration of gas and fluids into the cement. Slurry design and optimization are one of the most important tools in the process of gas migration blockage. Several parameters of the slurry must be modified by optimizing the formulation to the desired level. In this field, we can mention characteristics such as density, filtration, free water, particle settling status, rheological properties, development of gel strength, permeability, and water loss. Each of these should be considered during slurry evaluation to achieve acceptable standards.[1]

Four components called tricalcium silicate (C3S), dicalcium silicate (C2S), tricalcium aluminate (C3A), and tetracalcium aluminophosphate (C4AF) are the main components of the cement formulation. [2] By placing these materials along with cement and water additives, the desired characteristics of the operations engineers themselves in cement are formed. [3]

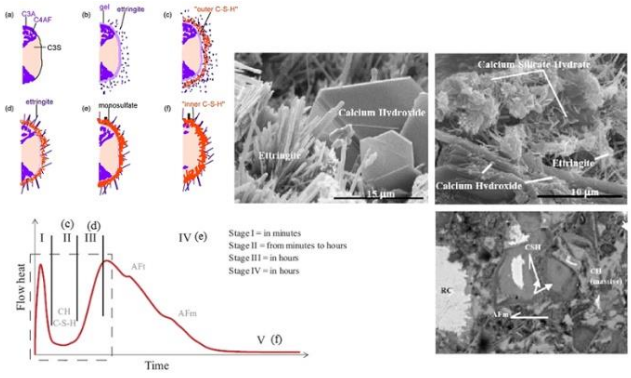


Fig. 1. shows the stages of cement hardening at the same time as the growth load of its internal structures. The amount of heat released during the thickening time of the slurry. It also shows a view of the crystalline and amorphous structures of the cement structure.

2- Materials and Methods

To measure the rheology of the slurry including PV, YP, 10-second gel, and 10-minute gel at the rotational temperature of the bottom of the well, the slurry is placed in an atmospheric consistometer to rotate for 20 minutes at the bottom of the well at 150 RPM. Then the rheology is read again according to the instructions.

In this research, various additives have been used to design the slurry. To prevent and control filtration, two types of filtration

*Corresponding author's email: dehvedar@aut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

controller additives with the brands loloss109LT and FLC-502 have been used. Only one type of dispersant (turbo-6) is used. Bentonite and sodium silicate has been used as an extender in the design of the slurries. Calcium lignosulfonate and CMHEC are used as retarders. Accelerators used are calcium chloride (CaCl2) and NaCl. The antifoam was used under the brand name defoam-802. With changing the additives, several tests have been performed on their effects on the setting time of cement.

3- Results & discussion

Increasing the amount of bentonite from 0% to 6%, the PV and YP increased. Increasing the amount of sodium silicate, the 24-hour the compressive strength of cement has decreased. The compressive strength of cement made with bentonite has decreased more than cement made with sodium silicate.

As the CaCl2 content increases from 0% BWOC to 6% BWOC, the values of PV, YP, gel for 10 seconds, and gel for 10 minutes increase, while the slurry gels with 30% calcium chloride at BHCT temperature and their properties cannot be determined by the viscometer was measured. Increasing the concentration of calcium chloride from 0% to 3%, the setting time of cement increases from 414 minutes to 321 minutes, which reduces 93 minutes. By increasing from 3% to 6%, the thickening time will decrease by 119 minutes. With an increase of more than 6%, the slurry behavior is not predictable.

As the concentration of sodium chloride increases, the filtrate volume increases from 46 cc/30min to 64. Despite the sharp increase of salt to 30%, the filtrate change increases slightly. By increasing the salt concentration, the performance of filtration control agents decreases. As a result the filtration volume increases, the thickening time is shortened and the cement reaches strength sooner, and finally, the rate of compressive strength growth declines at high percentages. Increasing the amount of sodium chloride from 0% to 6%, the amount of PV, YP, ten seconds, and ten minutes gel raised but when the amount of salt reaches 30%, the amount of YP decreases.

Increasing the percentage of salt to 6% by the weight of water, the salt acts as an accelerator, reducing the thickening time from 414 minutes to 250 minutes. Increasing the amount of salt to 30%, the salt acts as a retarder and increases the setting time to 598 minutes. Calcium chloride has a greater effect on the cement slurry than sodium chloride. It reduces the effect of filtration control additives and increases the amount of filtrate in calcium chloride slurries. The slurry containing calcium chloride produces more gel than sodium chloride. This property causes the cement cake to not form well and have larger pores, in which cases more water is removed from the cement due to pressure.

Increasing calcium chloride and sodium chloride by up to 6% increases the 24-hour compaction strength of cement. crystallization phenomenon in the concentration of 30% causes the slurry to be retarded and the 24-hour compressive strength declines.

As the percentage of calcium lignosulfonate increases from 0 to 1 wt% of cement, the setting time increases with an almost constant slope. This indicates that calcium lignosulfonate increases the slurry setting time by a constant ratio. This property can be used in the better design of cement and the appropriate amount of this retarder.

As the amount of retarder increases, the setting time of the cement increases nonlinearly, so that as the amount of retarder increases, the setting time of the cement increases sharply. As the amount of retarder increases, the 24-hour compressive strength of cement decreases. So that with a 1% increase in retarder, the amount of compressive strength of cement has decreased to 1120 psi. (1280 psi)

Increasing the percentage of retarders in the slurry system, the CMHEC retarder further affects the thickening time. This increase was almost linear for the calcium lignosulfonate retarder, while the CMHEC retarder increased nonlinearly with a steep slope and was stronger than calcium lignosulfonate at percentages higher than 0.1%.

4- Conclusion

Increasing bentonite and sodium silicate in cement slurry increase the YP of cement and absorbing the slurry water cause the amount of fluid loss to be controlled so that by increasing the amount of bentonite up to 6% by weight of cement, the amount of fluid loss decreases from 380 cc/30min to 89 While sodium silicate has dropped to 180.

Bentonite and sodium silicate both reduce the setting time of cement and also act as an accelerator in the cement system. The accelerating side effect of cement in bentonite is greater than that of sodium silicate.

Bentonite, compared to sodium silicate, shortens the setting time, and reduces the final strength of cement from 900 ppm to 400 ppm, while sodium silicate has less effect on reducing strength.

At high percentages (30%) calcium chloride causes the cement to not provide suitable rheology and is practically useless for cement operations and provides unpredictable results.

Calcium lignosulfonate has less effect on Thickening time than CMHEC.

CMHEC has a greater effect on strength and has led to a further decrease so that with a 1% increase in CMHEC to cement, the compressive strength of cement has decreased from 2400 psi to 1730 psi, while for calcium lignosulfonate decreased from 2400 psi. to 1120 feet.

References

[1] M.M. Pour, J. Moghadasi, New cement formulation that solves gas migration problems in Iranian south pars field condition, in: SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, OnePetro, 2007.

[2] 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.

[3] P. Hewlett, M. Liska, Lea's chemistry of cement and concrete, Butterworth-Heinemann, 2019.

HOW TO CITE THIS ARTICLE
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) 261-264.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21171.7640

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۶، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۲۱۹ تا ۱۲۳۶
DOI: 10.22060/ceej.2023.21171.7640

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

محسن دهودار*، سید محمد مهدی حسینی

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

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)، شتاب‌دهنده‌بندش (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 به۸۹ cc رساند در حالی که سدیم سیلیکات تا ۱۸۰ cc کاهش داد. با افزایش از ۰٪ تا ۶ ٪، کلسیم کلرید نسبت به سدیم کلرید اثر بیشتری بر زمان بندش سیمان دارد. در درصدهای 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.

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
افزایه های سیمانکاری

۱- مقدمه

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 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، چهارکانی به نام‌های تری کلسیم سیلیکات[1] (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات[2] (C_2S)، تری کلسیم آلومینات[3]

1 Tricalcium silicate
2 Dicalcium silicate
3 Tricalcium aluminate

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

(C_3A) و تترا کلسیم آلومینوفریت[1] (C_4AF) اجزای اصلی تشکیل دهنده فرمولاسیون سیمان هستند. با قرارگیری این مواد در کنار افزایه‌های 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].

$$2C_3S + 6H \rightarrow C-S-H + 3CH \quad (۱)$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C-S-H + CH \quad (۲)$$

C_3A و C_4AF به طور عمده خواص روانه شناسی و C_3S و C_2S 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[2] (C-S-H) و کلسیم هیدروکسید [3](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 افزایه‌هایی 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.

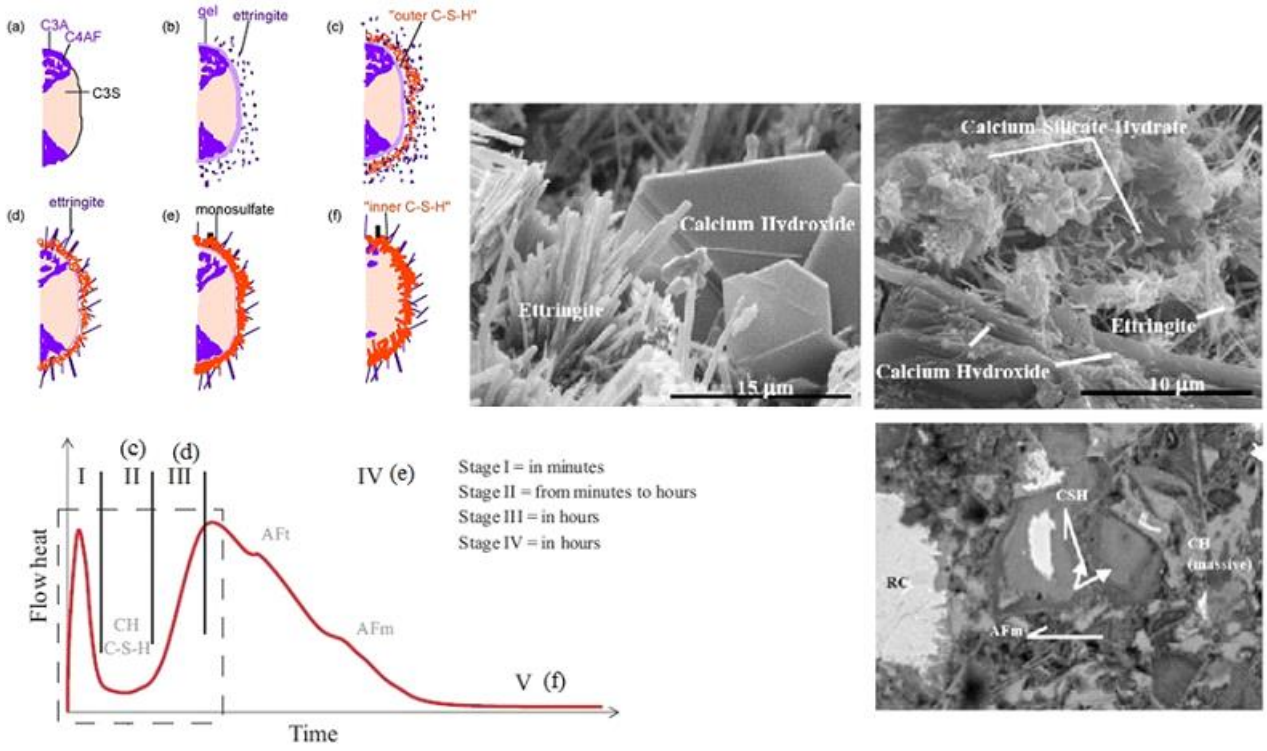
حرارت و فشار از جمله عواملی هستند که باعث تسریع بندش دوغاب‌های سیمان می‌شوند. با افزایش نسبت آب به سیمان دوغاب‌های سیمان اگر چه زمان بندش زیاد می‌شود اما این امر موجب کاهش وزن و کاهش گرانروی دوغاب سیمان خواهد شد. دوغاب‌های کم وزن با گرانروی کم، برای سیمانکاری چاه‌های عمیق و پرفشار مناسب نیستند. در ساختمان شیمیایی کند کننده ها یک یا چند رادیکال هیدروکسیل وجود دارد و همین عامل است که با چسبیدن به سطوح دانه‌های سیمان در دوغاب، غشایی 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 کننده ها 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 تزریقی 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 اترهای 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 اترها 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[4] 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. کنترل کننده‌های هرزروی و افت صافاب از جمله افزایه‌های 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

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.

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 افزایه‌های سیمان به طورمشخص وزن می‌شوند. ترتیب ترکیب مواد به این صورت است که ابتدا آب درون ظرف همزن ریخته می‌شود، سپس هر کدام از افزایه‌ها به آن اضافه شده و به مدت ۱ min تا ۲ min با دور حدود ۲۰۰۰rpm، 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 شده است. قدرت ژل‌شدگی سیمان نیز توسط رئومتر در دو زمان مختلف ۱۰ sec و ۱۰ min ثبت می‌گردد. مقدار پلاستیک‌ویسکوزیته[1] و نقطه واروی[2] با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$PV = (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1.5 \quad (۳)$$

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (۴)$$

برای اینکه رئولوژی دوغاب شامل پلاستیک‌ویسکوزیته و نقطه واروی، ژل ۱۰ sec و ژل ۱۰ min در دمای چرخشی ته چاه اندازه گیری شود، دوغاب درون دستگاه اتمسفریک کانسیستومتر[3] 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.

1 Plastic viscosity
2 Yield point
3 Atmospheric consistometer

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 می–گیرند، 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 فشارچاه 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[1] 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 اندازه گیری 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 sec ۳۰ 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 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[2]، 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 hr ۸ (بندش اولیه)، hr ۱۴ و hr ۲۴ 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 hr ۲۴ آزمایش پایان یافته و مکعب‌های سیمانی آماده آزمایش می‌شوند. min ۴۵ قبل از اینکه آزمایش اتمام یابد و مکعب‌ها آماده شکستن شوند آن‌ها را از حمام آب در آورده و درون آب با دمای C ۲۷ قرار میگیرند تا hr ۲۴ تکمیل شود. سپس مکعب‌ها زیر دستگاه کراش آزمایش قرار می‌گیرند تا استحکام تراکمی آن‌ها اندازه‌گیری شوند[۲۰].

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

1 HPHT Consistometer

2 UCA (Ultra Sonic Cement Analyzer)

صافاب[1] با نام‌های تجاری loloss109LT و FLC-502 استفاده شده است. فقط از یک نوع پخش کننده[2] با نام تجاری turbo-6 استفاده شده است. از بنتونایت و سدیم سیلیکات به عنوان افزایه‌های کنترل‌کننده وزن[3] در طراحی دوغاب‌ها استفاده شده است.

متداول‌ترین تاخیردهنده[4]های بندش سیمان‌های حفاری، نمک‌های سدیم و کلسیم اسیدهای لیگنوسولفونیک هستند، که در این مقاله، تاخیردهنده‌های مورد استفاده شامل کلسیم لیگنوسولفونات و CMHEC بودند. شتاب‌دهنده[5]های مورد استفاده در این تحقیق شامل کلسیم کلرید ($CaCl_2$) و نمک سدیم کلرید(NaCl)می‌باشد. آنتی‌فوم[6] مورد استفاده در این تحقیقات به نام تجاری defoam-802 مورد استفاده قرار گرفته است. برای مشخص کردن اثر افزایه‌های مختلف بر روی زمان بندش سیمان براساس نوع افزایه چندین آزمایش انجام گرفته است، که هر کدام به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

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

۳- نتایج آزمایش و بحث به روی آن‌ها

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص روانه شناسی، دانسیته، زمان نیم بندش و استحکام تراکمی مکعب‌های سیمانی فرمول‌های 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 می‌شوند. این‌گونه مواد، اثر ویژه‌ای بر خواص دوغاب از جمله زمان نیم بندش دوغاب و مقاومت تراکمی مکعب‌های سیمانی دارند.

بنتونایت علاوه بر خاصیت پوشای حجم دهنده، کنترل‌کننده افت صاف آب نیز محسوب می‌شود. نفوذپذیری سیمان با افزایش غلظت آن افزایش می‌یابد. بنتونیت تا ۲۰ ٪ وزنی سیمان اضافه می‌شود. در غلظت‌های بالای ۶ ٪ وزنی بنتونایت، اضافه نمودن یک پراکنده‌ساز برای کاهش ویسکوزیته و استحکام ژله‌ای دوغاب ضروری است.

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است بنتونایت اثر بیشتری در کاهش زمان نیم‌بندش دارد. با افزایش مقدار سدیم سیلیکات از ۰/۴ گالن در هر کیسه به ۱ گالن در کیسه، زمان بندش تقریباً با BWOC 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 می‌تواند سیمان را حجیم کند یعنی پوشای حجم دهنده بهتری نسبت به سدیم سیلیکات می‌باشد ولی سیمان ساخته شده با آن با کاهش استحکام تراکمی بیشتری مواجه است.

سیلیکات کمتر از بنتونایت می‌تواند صافاب دوغاب سیمان را کنترل کند. بنتونایت بهتر از سدیم سیلیکات می‌تواند 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 می‌شود. اگر قبل از آماده‌سازی 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 غلظت‌ها 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 می‌کنند. ساختار ژل، ویسکوزیته کافی را فراهم می‌کند تا امکان استفاده از مقادیر زیادی آب بدون اینکه در داخل دوغاب آزاد و سرگردان باشند فراهم آید. این فرایند با فرآیندهای پوشای حجم دهندهی رسی که آب را جذب می‌کنند کاملاً متمایز است. سیلیکات‌های سدیم مایع یا جامد بیش‌ترین استفاده را در این خصوص دارند. مهم‌ترین مزیت سیلیکات‌ها تسهیل در ذخیره‌سازی و جابجایی است. با این حال، به دلیل تمایل آنها به شتاب‌دهی اثر سایر افزایه‌ها به خصوص تاخیردهنده‌ها و کنترل‌کنندگان، هرزروی و افت صافی کاهش می‌یابد.

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

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

Table 1. Designed tests and the relative additives

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

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

Test no	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
Temperature (degF)	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۱۰۸	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶
Density (pcf)	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
θ 300 surface	۲۴	۲۷	۵۰	۲۰	۳۲	۵۲	۳۲	۵۹	۷۶	۹۷	۲۷	۳۰	۳۶	۷۶
θ 300 DH	۱۷	۲۶	۴۵	۲۲	۲۳	۴۳	۴۷	۶۸	۹۶	GU	۳۵	۳۷	۴۲	۶۵
θ 200 surface	۱۶	۲۷	۳۸	۱۴	۲۰	۳۴	۲۲	۴۷	۵۴	۷۹	۲۲	۲۶	۳۰	۵۴
θ 200 DH	۱۱	۱۹	۳۲	۲۸	۱۷	۲۶	۳۴	۵۴	۸۷	GU	۲۷	۳۲	۳۶	۴۶
θ 100 surface	۱۰	۲۰	۲۸	۷	۱۵	۲۶	۱۲	۲۲	۳۶	۵۵	۱۸	۲۰	۲۴	۳۴
θ 100 DH	۷	۱۴	۲۴	۲۲	۹	۲۳	۱۸	۲۸	۵۳	GU	۲۲	۲۶	۲۸	۲۹
θ 6 surface	۲	۷	۹	۲	۵	۹	۴	۲	۱۲	۱۸	۴	۶	۸	۷
θ 6 DH	۲	۴	۷	۳	۳	۸	۷	۴	۲۳	GU	۳	۹	۹	۴
θ 3 surface	۱	۵	۶	۱	۴	۴	۲	۲	۱۱	۱۷	۳	۵	۷	۶
θ 3 DH	۱	۳	۴	۲	۲	۷	۵	۳	۲۰	GU	۲	۸	۸	۳
PV surface	۲۱	۲۵	۳۳	۱۹	۲۵	۳۹	۳۰	۵۵	۶۰	۶۳	۱۳	۱۵	۱۸	۶۳
PV DH (cp)	۱۵	۱۸	۳۱	۱۵	۲۱	۳۰	۴۳	۶۰	۶۴	GU	۱۹	۱۶	۲۱	۵۴
YP surface	۳	۱۲	۲۲	۱	۷	۱۳	۲	۴	۱۶	۳۴	۱۴	۱۵	۱۸	۱۳
YP DH	۲	۸	۱۴	۵	۲	۱۳	۴	۸	۲۲	GU	۱۶	۲۱	۲۱	۱۱
Gel-10ss	۲	۳	۵	۵	۴	۱۲	۳	۷	۱۲	۱۹	۴	۷	۷	۶
Gel 10 s DH	۱	۲	۷	۹	۶	۱۱	۸	۸	۲۲	GU	۳	۹	۱۱	۵
Gel 10 min	۱۳	۱۸	۲۴	۱۵	۳۰	۶۷	۶۰	۷۶	۱۵۶	۳۰۰	۳۴	۴۲	۸۹	۱۲۰
Gel10MinDH	۱۴	۱۵	۳۰	۳۷	۳۵	۶۴	۷۰	۸۷	۲۱۷	GU	۲۷	۷۲	۹۹	۶۷
Fluid loss (cc)	۳۸۰	۲۲۰	۸۹	۳۸۰	۲۶۰	۱۶۰	۴۸	۵۴	۶۴	–	۴۸	۵۱	۵۹	۶۷
Thickening time (min)	۲۸۰	۲۳۵	۱۹۲	۲۸۰	۲۷۰	۱۹۵	۴۱۴	۲۲۱	۲۰۲	–	۴۱۴	۲۵۵	۲۵۰	۵۹۸
Compressive strength (psi)	۹۰۰	۷۰۰	۴۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۵۰۰	۱۹۸۱	۲۲۱۰	۲۲۷۰	۲۱۸۰	۱۹۸۱	۲۱۷۰	۲۲۵۰	۱۸۹۰

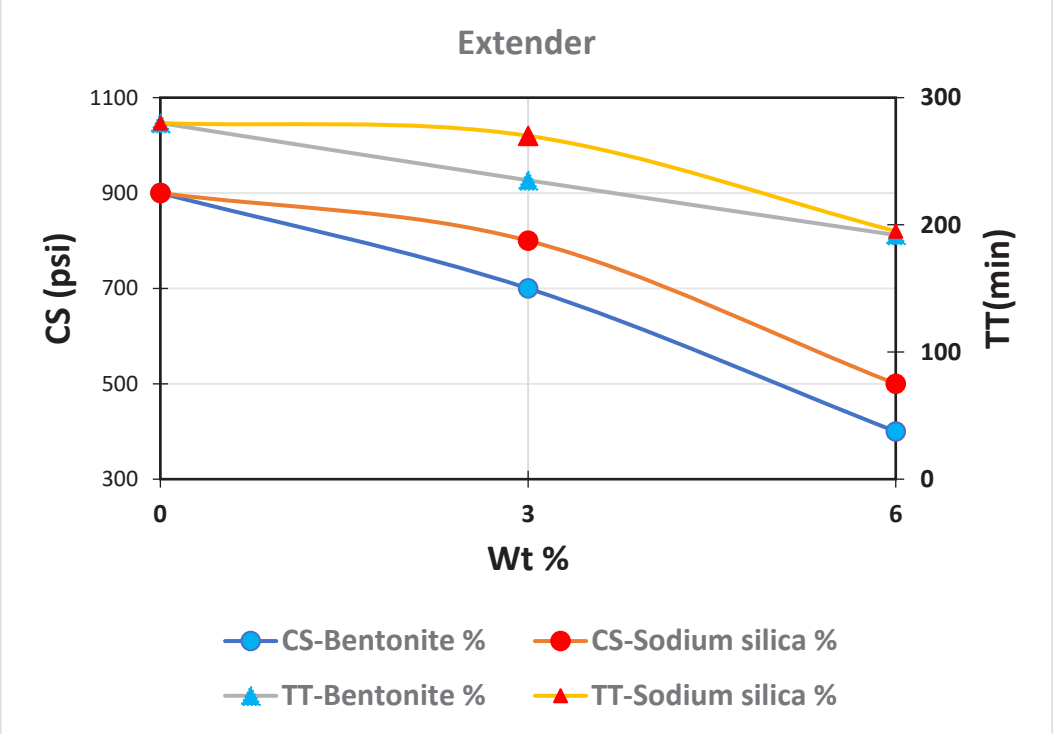
۱۴	۸۶	۱۱۸	۷۶	۶۵	۵۴	۴۶	۳۴	۲۹	۷	۴	۶	۳	۶۳	۵۴	۱۳	۱۱	۶	۵	۱۲۰	۶۷	۶۷	۵۹۸	۱۸۹۰
۱۵	۱۲۳	۱۱۸	۲۰۰	۱۹۶	۱۴۷	۱۲۶	۸۱	۷۷	۱۶	۱۳	۱۵	۱۲	۱۷۸	۱۵۶	۲۲	۲۵	۱۵	۱۳	۱۶۵	۱۲۴	۷۲	۲۷۰	۲۴۰۰
۱۶	۱۲۳	۱۱۸	۱۹۶	۱۷۶	۱۲۶	۱۰۷	۷۸	۷۴	۱۴	۱۳	۱۲	۱۲	۱۷۷	۱۵۳	۱۹	۲۳	۱۲	۱۱	۱۵۴	۱۲۶	۷۰	۳۱۰	۲۳۲۰
۱۷	۱۲۳	۱۱۸	۱۷۸	۱۵۶	۹۸	۸۹	۷۰	۶۲	۱۲	۸	۱۰	۷	۱۶۲	۱۴۱	۱۶	۱۵	۱۱	۱۰	۱۳۸	۱۱۵	۶۷	۳۳۰	۲۰۸۰
۱۸	۱۲۳	۱۱۸	۱۶۶	۱۴۲	۸۳	۷۳	۶۴	۵۸	۸	۷	۷	۶	۱۵۳	۱۲۶	۱۳	۱۶	۷	۸	۱۲۳	۱۰۹	۵۳۰	۶۳	۱۷۳۰
۱۹	۱۲۳	۱۱۸	۱۳۱	۱۴۶	۷۶	۸۷	۴۹	۶۴	۹	۱۰	۸	۹	۱۲۳	۱۲۳	۸	۲۳	۹	۹	۱۲۰	۱۳۱	۷۲	۲۷۰	۲۴۰۰
۲۰	۱۲۳	۱۱۸	۱۲۶	۱۳۷	۷۴	۸۵	۴۷	۶۲	۹	۷	۸	۶	۱۱۸	۱۱۲	۸	۲۵	۷	۸	۱۱۵	۱۱۸	۶۷	۳۱۵	۲۳۱۰
۲۱	۱۲۳	۱۱۸	۱۱۹	۱۲۶	۷۰	۷۸	۴۲	۵۶	۶	۶	۵	۴	۱۱۵	۱۰۵	۴	۲۱	۶	۵	۱۰۹	۱۱۸	۶۰	۴۳۵	۱۹۰۰
۲۲	۱۲۳	۱۱۸	۱۰۹	۱۱۷	۶۲	۷۴	۳۷	۵۴	۵	۶	۴	۵	۱۰۸	۹۴	۱	۲۳	۳	۵	۹۸	۱۰۷	۴۸	۷۶۰	۱۱۲۰
۲۳	۱۶۱	۱۱۸	۹۰	۱۵۰	۵۴	۹۰	۳۶	۶۳	۵	۸	۴	۷	۸۱	۱۳۱	۹	۱۸	۴	۸	۴۸	۱۱۰	–	۲۱۰	۲۵۰۰
۲۴	۱۶۱	۱۱۸	۱۰۳	۱۴۳	۶۸	۹۲	۴۲	۶۸	۶	۸	۵	۷	۹۲	۱۴۳	۱۱	۲۰	۸	۸	۵۰	۱۱۷	–	۲۳۲	۲۴۰۰
۲۵	۱۶۱	۱۱۸	۱۲۰	۱۸۳	۸۷	۱۰۷	۵۰	۷۵	۸	۹	۷	۸	۱۰۵	۱۶۲	۱۵	۲۱	۹	۱۰	۵۱	۱۲۴	–	۲۸۲	۲۳۷۰

I: GU Gell Up ژله ای شدن دوغاب سیمان

در سه آزمایش متوالی، با افزایش مقدار بنتونایت از ۰ ٪ به ۶ ٪ ، مقدار پلاستیک‌ویسکوزیته 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 به‌عنوان 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.

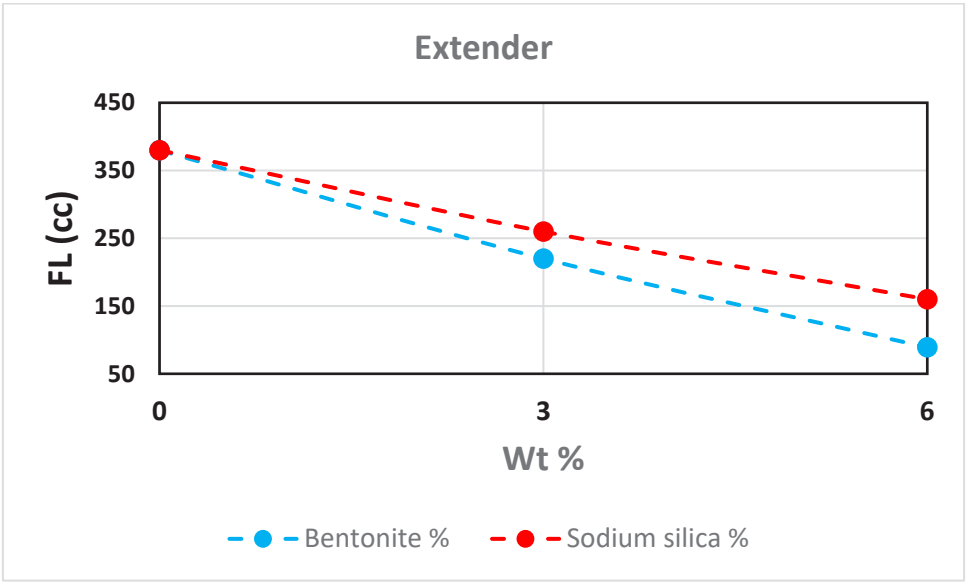
با این افزایش درصد استفاده بنتونایت در ساخت دوغاب سیمان، میزان صافاب دوغاب از ۳۸۰ cc در نیم ساعت به ۸۹ cc در نیم ساعت کاهش پیدا می‌کند زیرا بنتونایت آب را به خود جذب کرده و در سیستم دوغاب نگه می‌دارد و مانع از حضور آزاد آن در دوغاب می‌شود. با افزایش درصد بنتونایت مقاومت تراکمی سیمان کاهش پیدا خواهد کرد. 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.



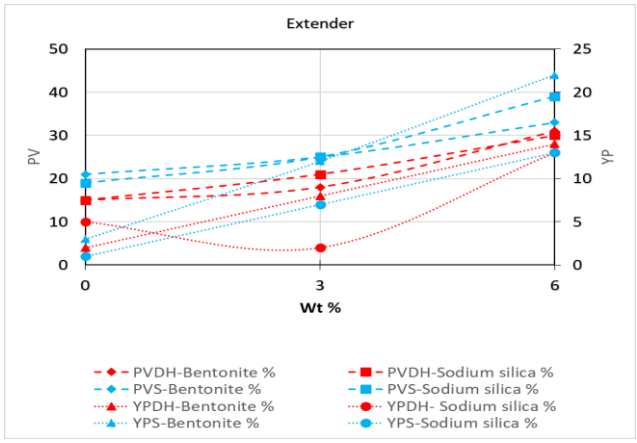
شکل ۲. مقایسه زمان بندش و استحکام تراکمی سیمان در درصدهای مختلف بنتونایت و سدیم سیلیکات

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

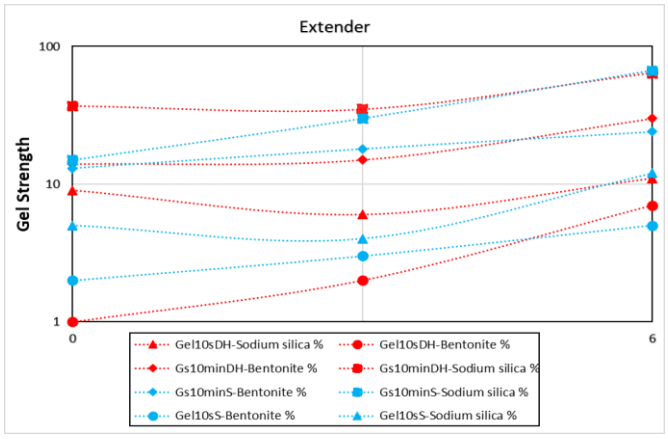


شکل ۳. مقایسه صافاب دو سیستم بنتونایتی و سدیم سیلیکات

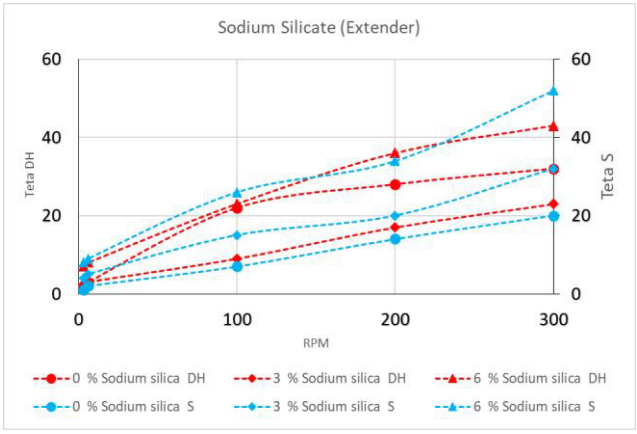
Fig. 3. Fluid loss for Bentonite and Sodium Silicate as Extender



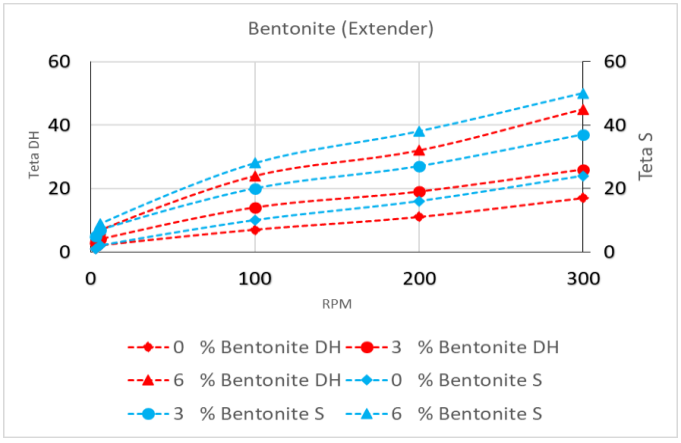
ویسکوریته پلاستیک و ئیلد پوینت دوغاب سیمان حاوی پوشای حجم دهنده



استحکام ژله ای دوغاب حاوی پوشای حجم دهنده



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



مقایسه تاثیر دمای سطح و ته چاهی بر دوغاب حاوی بنتونایت

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

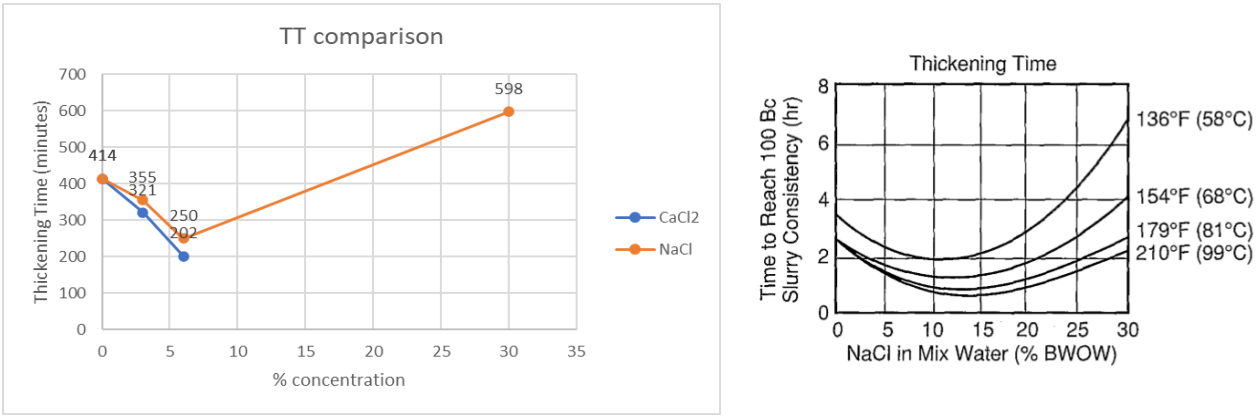
۳- ۲- اثر شتاب‌دهنده‌ها بر خواص دوغاب

شتاب‌دهنده‌ها به دوغاب سیمان اضافه می‌شوند تا زمان بندش در مراحل I و II وبا سرعت بخشیدن به فرآیند سخت شدن در مراحل III و IV کوتاه شود. (شکل۱). آن‌ها اغلب برای جبران تاخیر برخی افزایه‌ها 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، نیتریت‌ها، سولفات‌ها، تیوسولفات‌ها و بازهای قلیایی مانند هیدروکسیدهای سدیم، پتاسیم و آمونیوم گزارش شده است.

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 کارآیی به عنوان شتاب‌دهنده برای سیمان پرتلند طبقه‌بندی می‌شوند.

$$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Li^{+} > Na^{+} > H_2O \qquad (۵)$$

$$OH^{-} > Cl^{-} > Br^{-} > NO_3^{-} > SO_4^{2-} = H_2O \qquad (۶)$$



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]

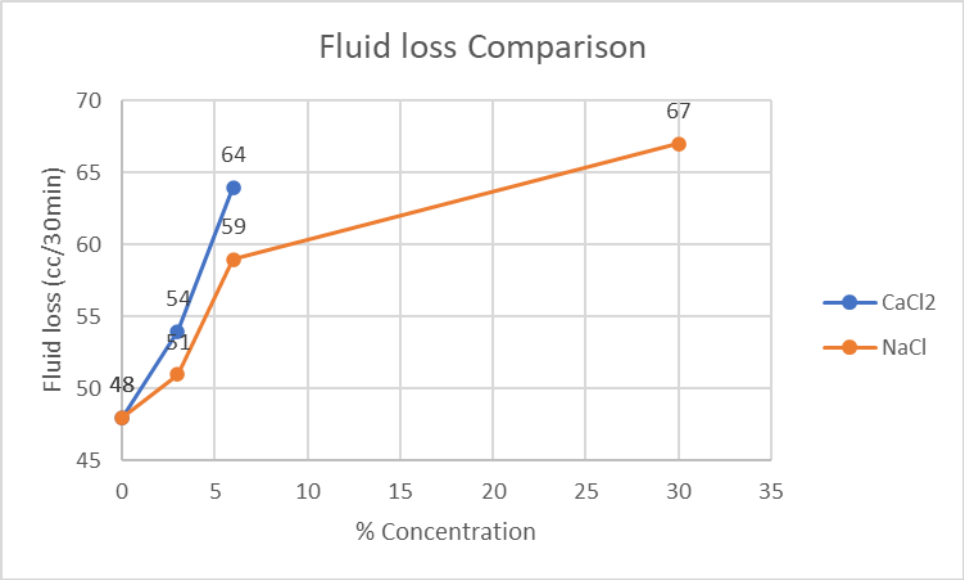
از دو نوع رایج شتاب‌دهنده در صنعت سیمانکاری یعنی کلسیم کلرید و سدیم کلرید جهت بررسی زمان بندش سیمان استفاده شده است. با افزایش مقدار $CaCl_2$ از ۰٪ BWOC به ۶ ٪ BWOC ، مقادیر پلاستیک‌ویسکوزیته و نقطه واروی ، ژل ۱۰ sec و ژل ۱۰ min افزایش می‌یابد، در حالی که دوغاب با۳۰ ٪ کلسیم کلرید در دمای BHCT ژل می‌کند 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 قابل‌پیش‌بینی 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 افزایش مقدار سدیم کلرید از ۰ ٪ تا ۶ ٪، مقدار پلاستیک‌ویسکوزیته 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.

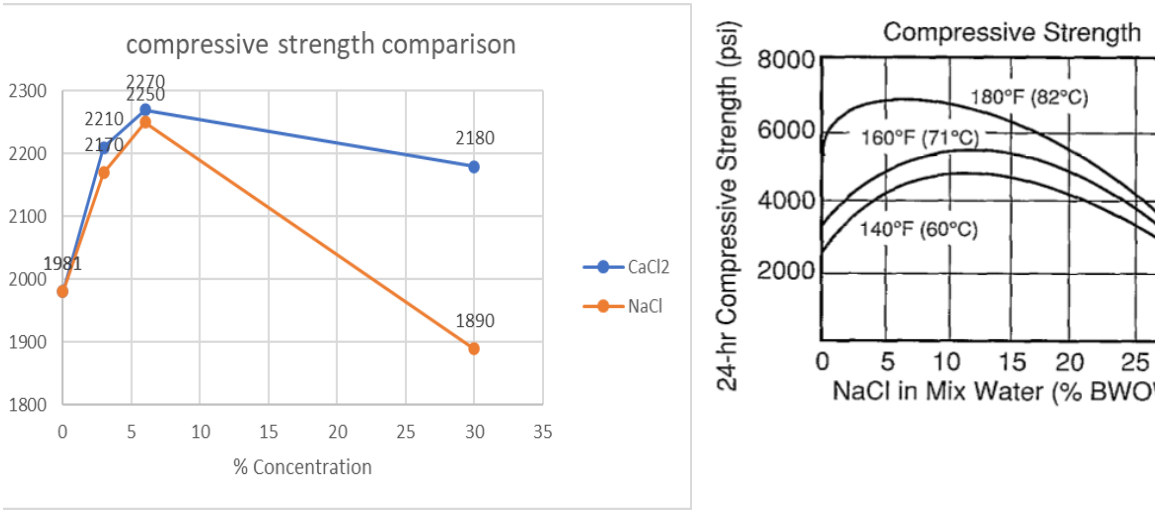
همین عامل باعث می‌شود که سیمان ریتارد شده و سیمان روان‌تر شود و در نتیجه مقدار نقطه واروی آن نیز کاهش یابد. از طرفی دیگر افزایش زمان بندش سیمان نیز باعث می‌شود که سیمان دیرتر شروع به بستن کند و در نهایت مقاومت تراکمی آن نیز بعد ۲۴ hr کاهش یابد. با افزایش غلظت نمک و نمکی شدن دوغاب، قدرت کنترل‌کنندگی افزایه 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 دقیقا نتیجه معکوس داده است و به عنوان یک کند کننده در سیستم دوغاب عمل کرده است. (شکل ۵)



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]

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 افزایه‌های کنترل‌کننده صافاب شده و مقدار صافاب در دوغاب‌های کلسیم کلریدی را افزایش می‌دهد. دوغاب دارای کلسیم 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)

از مقایسه دو نمودار فوق استنتاج می شود 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 دمایی 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 تقریبا 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 ۷cc در هر نیم ساعت تغییر کرده است. این نوع کند کننده دارای خاصیت کنترل‌کنندگی صافاب به صورت اثر جانبی را دارد. با افزایش میزان کند کننده، استحکام سیمان از ۲۴۰۰ psi به ۱۷۳۰psi 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 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 تقریبا 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 ml ۲۴ صافاب، نشان می‌دهد که این نوع کند کننده اثر کنترل‌کنندگی صافاب را به صورت اثر جانبی دارد و تا حد قابل‌قبولی 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. (۱۲۸۰psi)

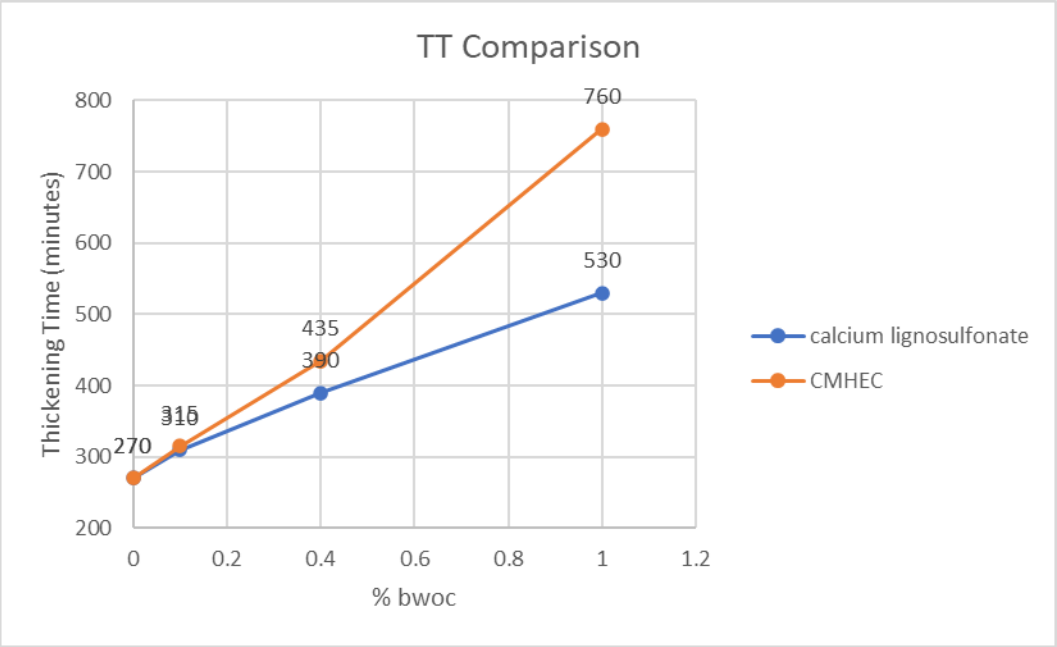
با افزایش مقدار درصد کند کننده در سیستم دوغاب، کند کننده CMHEC زمان بندش را بیشتر تحت تاثیر قرار داده است و آن را طولانی‌تر می‌کند. این افزایش در زمان بندش برای کند کننده کلسیم لیگنوسولفونات تقریبا به صورت خطی عمل کرده است در حالی که کند کننده CMHEC به صورت غیر خطی و با شیب تندی افزایش پیدا کرده و در 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 ۲۴cc در نیم ساعت کاهش داده است در حالی که کلسیم لیگنوسولفونات فقط ۷cc در نیم ساعت کاهش داده است. این مقایسه نشان می‌دهد که کند کننده CMHEC بهتر از کلسیم لیگنو سولفونات توانسته است صافاب را نیز کنترل کند. (شکل ۹)

استحکام تراکمی سیمان بعد از ۲۴hr برای سیستمی که با CMH-EC ریتارد شده است کمتر از کلسیم لیگنوسولفونات است. با افزایش مقدار کند کننده به ۱ ٪ این اختلاف به۶۱۰ 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.

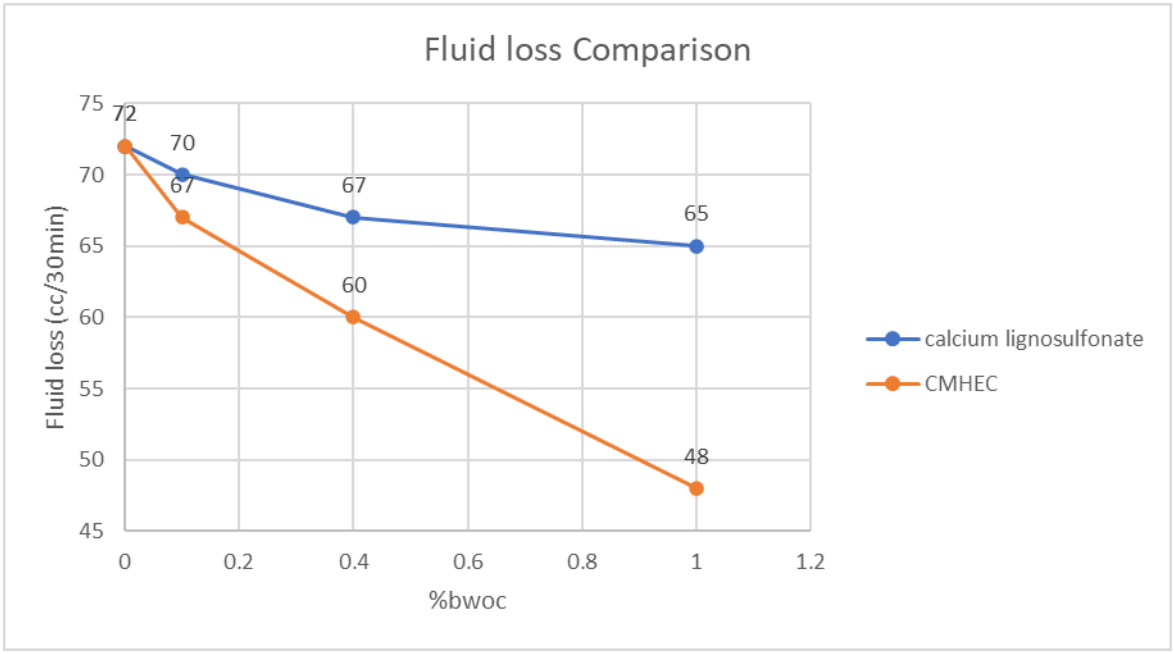
۳- ۴- اثر کنترل‌کننده صافاب بر زمان نیم‌بندش

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 FLCرا در یک گراف آورده و تفاوت هرکدام از نظر مدت زمان بندش مورد توجه قرار گرفته است.



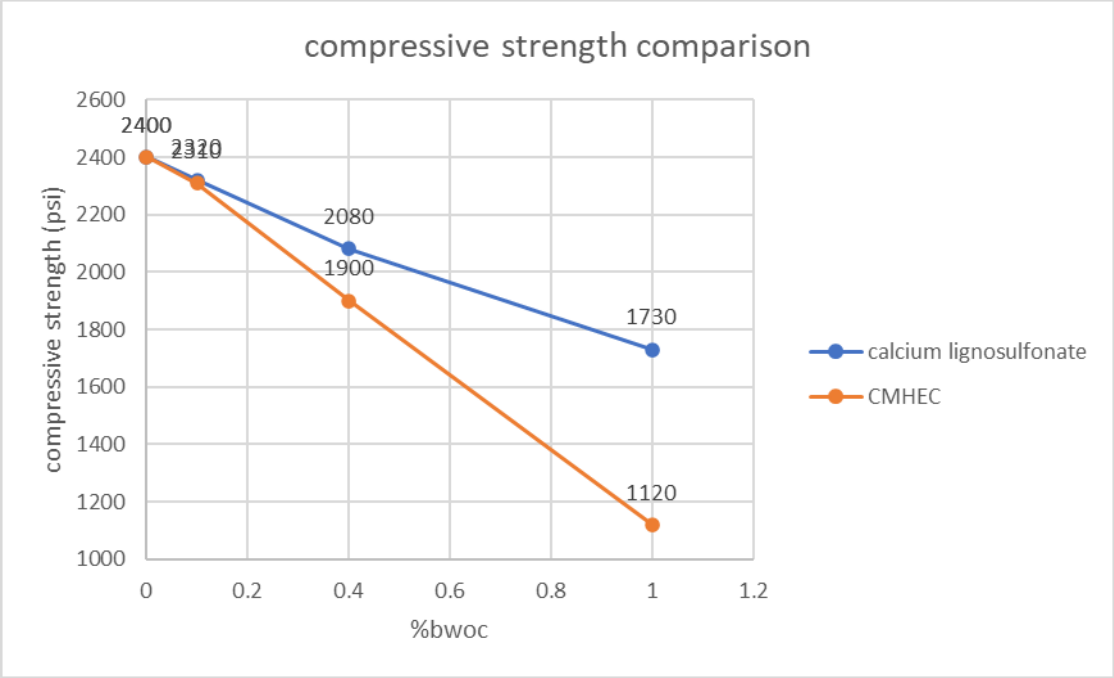
شکل ۸. مقایسه زمان بندش دوغاب با کند کننده‌های مختلف

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



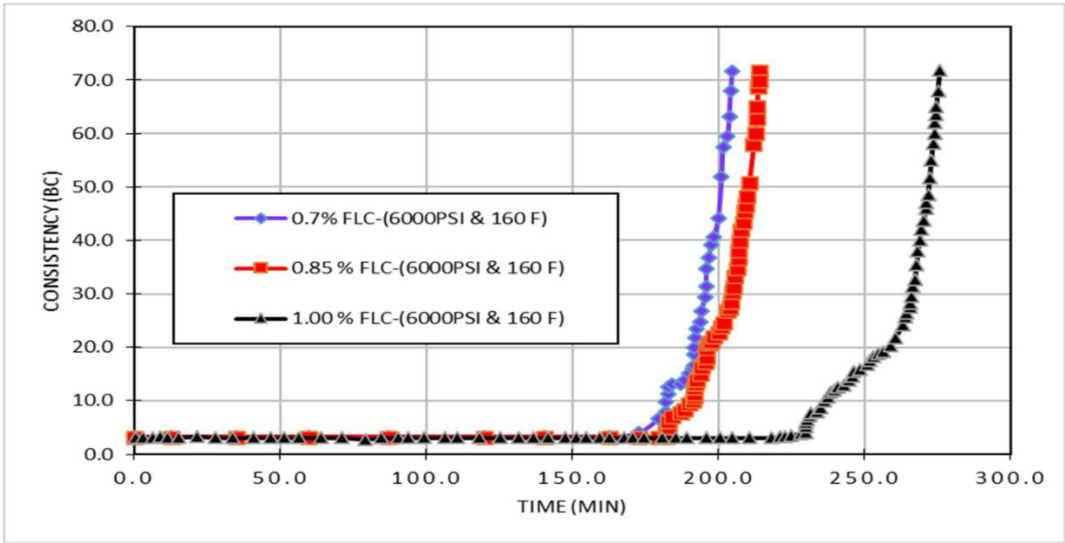
شکل ۹. قایسه مقدار صافاب دوغاب با کند کننده‌های مختلف

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 افزایه کنترل‌کننده افت صافی

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

همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش درصد حضور افزایه 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 psi ۹۰۰ تا psi۴۰۰ 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 ٪ آنها از ۰ ٪ تا ۶ ٪، مقدار استحکام تراکمی سیمان از psi۱۹۸۱ به psi۲۱۸۰ و psi۱۸۹۰ 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.

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 psi ۲۴۰۰ تا psi ۱۷۳۰ کاهش پیدا کرده است، در حالی که برای کلسیم لیگنوسولفونات از psi ۲۴۰۰ تا psi ۱۱۲۰ کاهش یافته است.

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

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-sulpho-aluminate (CSA) type cements, Cement and Concrete Research, 84 (2016) 62-75.

[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.

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

این صفحه عمداً خالی است