

این مقاله ترجمه مقاله لاتین توسط خانم منصوری است که به علت کاربردی بودن موضوع در این شماره نشریه درج شده است. عنوان و خلاصه مقاله در قسمت آخر نشریه آورده شده است.

بهینه‌سازی درصد SO_3 در یک کارخانه سیمان در الجزایر: تأثیر مقادیر مختلف گچ بر خواص سیمان

Siline Mohammed, Omary Safiullah

Laboratory of Materials and Mechanic of Structures (LMMS), University of M'sila, Algeria
ICube, UMR CNRS 7357, INSA de Strasbourg, France

مترجم: سمیه منصوری

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، کارخانه سیمان خاش

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۱۴

پیام‌نگار: Smansouri.eng@gmail.com

چکیده

مطابق استاندارد EN 197-1 (ویراست ۲۰۱۱) سیمان پرتلند نوع CEM I از ۹۵ تا ۹۷ درصد کلینکر و ۳ تا ۵ درصد گچ تشکیل شده است. همانگونه که می‌دانیم نقش اصلی سنگ گچ، تنظیم زمان گیرش است. با این وجود، کاربرد مقدار بهینه گچ سبب بهبود سایر خواص سیمان مانند واکنش مکانیکی، تغییرات ابعادی و فرایند هیدراتاسیون می‌شود. این مقدار گچ بهینه به چندین پارامتر بستگی دارد، از جمله: درصد سولفات، بلین سیمان، درصد آلومینات تری کلسیم و درصد آکالی. هدف اصلی این مقاله، یافتن مقدار سنگ گچ بهینه در کارخانه سیمان الجزایر برای سیمان نوع CEM I است. ۱۰ نمونه سیمان با درصدهای مختلف سنگ گچ تهیه شد و خواص سیمان خشک، خمیر سیمان و ملات سیمان بررسی شد. بنابر نتایج به دست آمده، وقتی سنگ گچ کمتر یا بیشتر از مقدار بهینه استفاده شود؛ بر درصد آب نرمال، زمان گیرش، مقاومت فشاری، گرمای هیدراتاسیون، تورم، انقباض خشک و درجه هیدراتاسیون تأثیر منفی می‌گذارد. مقدار سنگ گچ بهینه در این تحقیق ۵/۵٪ تعیین شد.

کلیدواژه‌ها: سیمان، سنگ گچ، سولفات، بهینه‌سازی، هیدراتاسیون.

۱. مقدمه

هیدراتاسیون سیمان فرایندی شیمیایی است که از واکنش سیمان با آب ترکیبات سیمانی جدیدی تشکیل می‌شود که محصولات هیدراتاسیون نامیده می‌شوند. در یک هیدراتاسیون کامل ۵۰ تا ۷۰ درصد سیمان پرتلند به ژل C-S-H و حدود ۲۸٪ به CH تبدیل می‌شود [۱]. برخلاف بلورهای CH که سهم زیادی در مقاومت سیمان ندارند، C-S-H، نقش مهمی دارد.

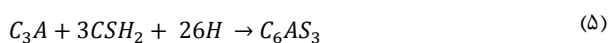
سیمان پرتلند CEM I از کلینکر و گچ ساخته می‌شود. سنگ آهک و خاک رس پس از سایش در آسیاب مواد خام به کوره وارد و در معرض گرمایی حدود ۱۴۵۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند تا با انجام واکنش‌های شیمیایی سیلیکات‌های کلسیم (C3S, C2S) و آلومینات‌ها (C3A, C4AF) تشکیل و نهایتاً کلینکر ساخته شود.

* خاش، کارخانه سیمان خاش، واحد کنترل کیفی

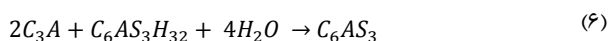
در کارخانجات سیمان، معمولاً از کلسیم سولفات دی هیدراته ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) استفاده می‌شود. سنگ گچ در سیمان بر اساس درصد سولفات تری اکسید (SO_3) محاسبه می‌شود.

سنگ گچ در سیمان معمولاً تا حدود ۵٪ به کار می‌رود، ولی مطابق استاندارد EN 197-1 در سیمان باید کمتر از ۵٪ باشد.

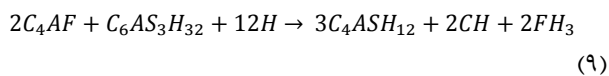
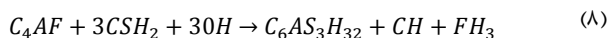
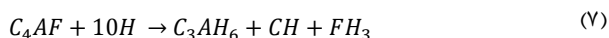
در حضور آب، سنگ گچ به سرعت با C_3A وارد واکنش (مطابق واکنش ۵) و فاز اترینجیت ($C_6AS_3H_{32}$) تشکیل می‌شود.



با پایان یافتن سنگ گچ، C_3A باقیمانده با اترینجیت تشکیل شده، مطابق واکنش (۶) ترکیب و به تولید فاز AF_m (آلومینات مونو سولفات کلسیم) منجر می‌شود:



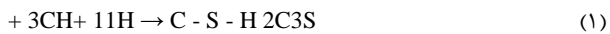
به همین ترتیب، تترا کلسیم آلومینو فریت (C_4AF) هم بدون گچ (واکنش ۷) و هم با گچ (واکنش ۸ و ۹) واکنش می‌دهد، ولی بسیار آهسته تر از C_3A و حرارت هیدراتاسیون کمتری آزاد می‌کند.



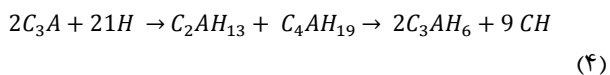
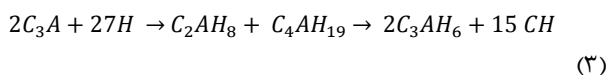
اثر گچ بر هیدراتاسیون C_3S را منتزیر^۲ و همکارانش [۷]؛ به نحو گسترده‌ای بررسی کردند و نشان دادند که انحلال C_3S در حضور گچ افزایش می‌یابد. کوردوسکی^۳ [۸]، گزارش داد که گچ عمدتاً سبب تسریع هیدراتاسیون C_3S در دوره هیدراتاسیون اولیه می‌شود که از دو جنبه روی سیمان تأثیر می‌گذارد. اولاً، سبب بهبود مقدار توزیع ژل C-S-H می‌شود، از سوی دیگر پیوستگی (چسبندگی) C-S-H که خود تابع آهنگ C/S است، کاهش می‌یابد.

2. Menetrier
3. Kurdowski

این کانی با درجه تبلور پایین، حتی آمورف، از واکنش سیلیکات تری کلسیم (C_3S) و سیلیکات دی کلسیم (C_2S) با آب، مطابق فرمول‌های (۱) و (۲) تشکیل می‌شود:



آلومینات تری کلسیم (C_3A) دارای میل ترکیبی بسیار زیادی با آب است که سبب بروز پدیده گیرش آنی می‌شود. بدون وجود گچ فاز آلومینات کلسیم هگزاگونال (شش وجهی) هیدراته ($C_2AH_8, C_4AH_{19}, C_4AH_{13}$) پدیدار می‌شود که آن هم پایدار نیست و مطابق واکنش‌های (۳) و (۴) به C_3AH_6 تبدیل می‌شود.



گچ از اجزای ضروری برای تولید سیمان است و به منظور تنظیم زمان گیرش به کار می‌رود، اگرچه، برخی از خواص مکانیکی سیمان، مانند مقاومت، نیز تحت تأثیر درصد کاربرد گچ قرار دارند [۲]. همچنین به منظور کاهش انرژی سایش در بخش تولید سیمان، به کلینکر آسیاب شده در آسیاب سیمان، گچ افزوده می‌شود.

گچ معدنی به صورت سنگ شفاف یا نیمه شفاف حاوی کلسیم سولفات است. شکل معمول سنگ گچ در طبیعت به صورت دی هیدرات ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)، به ندرت انیدریت ($CaSO_4$) و همی هیدرات ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) مشاهده می‌شود که بسیار ناپایدار است.

همانگونه که می‌دانیم، انیدرید بسیار کم در آب حل می‌شود که در اثر آن اترینجیت تشکیل می‌شود و در نتیجه، بر مقاومت اولیه سیمان تأثیر می‌گذارد [۳ و ۴]. مطابق تحقیقات آگابگو^۱ و همکارانش [۵]، خواص مکانیکی خمیر و ملات سیمان در شرایطی که سنگ گچ نیمه هیدراته به کار رود، آسیب پذیرتر می‌شود.

1. Agabgbou

$$\%SO_3(\text{optimum}) = 0.093Al_2O_3 + 1.71Na_2O_2 + 0.94K_2O + 1.23 \quad (11)$$

$$\%SO_3(\text{optimum}) = 6.810^{-5}SSB \cdot C_3A \quad (12)$$

$$\%SO_3(\text{optimum}) = 1.841 + 0.095C_3A + 1.63641Na_2O_2 \quad (13)$$

هدف این مقاله، یافتن مقدار SO_3 بهینه به صورت تجربی برای سیمان پرتلند CEM I کارخانه سیمان الجزایر است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ کلینکر و سنگ گچ

کلینکر به کار رفته، کلینکر سیمان پرتلند معمولی بود که شرکت سیمان لافارژ در الجزایر ارائه کرده بود. این کلینکر در یک آسیاب گلوله‌ای تا رسیدن به نرمی ۳۲۷۰ سانتیمتر مربع بر گرم ساییده شد.

از لحاظ کانی‌شناسی، این کلینکر دارای ۶۶/۴۵٪ سیلیکات تری کلسیم بود. آنالیز شیمیایی آن (جدول (۲)) با الزامات استاندارد EN 197-1 مطابق است. نسبت جرمی $\frac{CaO}{SiO_2}$ بیشتر از ۲ و درصد منیزیم اکسید کمتر از ۵٪ است.

در مطالعات اخیر، به نظر می‌رسد که نویسندگان، درصد گچ در فرمولاسیون سیمان را دلخواه قرار داده‌اند. اگرچه این درصد بین ۳٪ تا ۵٪ متغیر است ولی درصد SO_3 از تحقیقی به تحقیق دیگر متفاوت است (جدول (۱)).

بنابراین، برای رسیدن به حداکثر مقاومت، درصد گچ بهینه تعیین شود [۶ و ۲]. مطابق تحقیقات ساراکا و آینه^۱ [۲]، گچ دارای دو اثر است: سبب تسریع هیدراتاسیون سیمان می‌شود، بویژه در سن ۳ روزه، که به بالا رفتن مقاومت در این سن منجر می‌شود. اثر معکوس آن، تشکیل اترینجت اضافی است که ممکن است ترک خوردگی داخلی و یا در صورتی که مقدار SO_3 از حد بهینه بیشتر باشد، به انبساط سولفات انجامد.

تعیین مقدار بهینه، به مقدار SO_3 در گچ و همچنین مقدار سولفات در فازهای آلومینات تری کلسیم و آلومینو تتراکلسیم فریت کلینکر، درصد آلکالی مواد خام و نرمی سیمان بستگی دارد. در مقالات مختلف، فرمول‌های متفاوتی برای تعیین مقدار سولفات (SO_3) بهینه در دسترس است.

بنابر تحقیقات کوردوسکی [۸]، مقدار SO_3 بهینه می‌تواند مطابق فرمول‌های زیر محاسبه شود:

$$\%SO_3(\text{optimum}) = 0.556Na_2O_2 + 0.0017659SSB + 0.1072Fe_2O_3 - 3.6004 \quad (10)$$

جدول ۱. درصد‌های متغییر سنگ گچ بر اساس مراجع مختلف.

درصد آلومینو فریت تتراکلسیم	درصد آلومینات تری کلسیم	درصد سولفات			درصد گچ (بر مبنای درصد وزنی کلینکر)	مراجع
		سیمان	گچ	کلینکر		
۱۳/۰۸	۹/۴۷	-	۴۳/۱	۰/۲۲	۵	اساد جوزف جین ^۲ [۹]
۸/۲	۱۱/۲	-	۲۷/۸۳	۰/۵۴	۵	ناصری، همینا ^۳ [۱۰]
۸/۱	۸/۷	۳/۴	-	-	۴/۸	حمیدی [۱۱]
۱۱/۲	۷/۴	۴/۸	-	-	۴/۵	حمیدی [۱۱]
۸/۹۸	۷/۴۹	-	۲۸/۱	۰/۷۵	۴	غیانوند [۱۲]
۱۱/۷۲	۷/۴	-	۴۶/۱۲	۱/۲۱	۳/۵	یلماز و ادیز ^۴ [۱۳]
۶/۹	۱۰/۴	۲/۲	-	-	۳	حمیدی [۱۱]

1. Soroka and Abayneh

2. Assaad Joseph Jean

3. Naceri, Hamina

4. Yilmaz and Ediz

۲-۴ ملات

قالب‌های سیمان با استفاده از شن و ماسه استاندارد با نسبت $\frac{1}{3}$ ، مطابق استاندارد NF EN 196-1، و در قالب‌هایی به ابعاد $4 \times 4 \times 16 \text{ Cm}^3$ ساخته شد. به همین ترتیب، حرارت هیدراتاسیون ملات‌ها پس از ۴۱ ساعت با استفاده از دماسنج تکدما مطابق استاندارد NF EN 196-9 اندازه‌گیری شد.

آزمون مقاومت مطابق استاندارد NF EN 196-1 و NF p-15-433 انجام شد. مقاومت فشاری با 3R و سرعت بارگذاری $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ صورت گرفت. در هر سن، مقاومت فشاری از متوسط ۶ نتیجه یادداشت شد. قالب‌ها در سن‌های ۳ و ۲۸ روزه شکسته شدند.

آنالیز گرمانگاری (TGA) توسط دستگاه LABSYS EVO STA 1600 انجام شد. برای اندازه‌گیری درجه هیدراتاسیون نمونه‌ها در آب تا سن‌های ۳ و ۲۸ روزه قرار گرفتند [۱۶].

آزمون‌های TGA تحت دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس با آهنگ افزایش دمای $10^\circ \text{C}/\text{min}$ صورت می‌گیرد. در طول آزمون، هیدراتاسیون سیمان انجام و افت وزنی در منحنی‌های TGA ثبت می‌شود. سه مرز اصلی در این تجزیه مطابق نمودار (۱) مشخص شد: هیدراتاسیون فازها C_3AH_6 و C_4A_{13} ، C_2ASH_8 ، C-S-H، و واکنش بین فازها ($400-600^\circ \text{C}$) و کربنی شدن کربنات‌ها ($600-900^\circ \text{C}$) [۱۷-۱۹].

در این مقاله، درجه هیدراتاسیون بر اساس روش بهاتی^۱ [۱۸ و ۲۰] در سن‌های مورد نظر مطابق فرمول زیر محاسبه شد:

$$\alpha(t) = \frac{W_c(t)}{W_{100} \times m_c} \quad (14)$$

که در این رابطه:

W_c افت وزنی مربوط به از دست دادن آب پیوندی در مدت زمان t بر اساس اندازه‌گیری با نمودار TGA بر حسب درصد است.

$$W_c = (\Delta_{145-1000^\circ \text{C}}) - (\Delta_{600-800^\circ \text{C}}) + (d_{145-100^\circ \text{C}}) - m_c \times LOI \quad (15)$$

سنگ گچ (سولفات کلسیم دو آبه) مربوط به همان کارخانه سیمان بود. نرمی و چگالی آن، به ترتیب، ۴۶۸۰ سانتیمتر مربع بر گرم و ۲/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب است. آنالیز شیمیایی سنگ گچ نیز به‌طور خلاصه در جدول (۲) درج شده است.

در این تحقیق، سیمان‌سازی با درصدهای ۰٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪، ۵/۵٪، ۶٪، ۷٪، ۸٪ و ۹٪ گچ نسبت به کلینکر ساخته شد. همچنین، کلینکر و گچ به‌طور جداگانه در آسیاب گلوله‌ای آزمایشگاهی به نرمی دلخواه رسید و مطابق درصدهای بالا با یکدیگر مخلوط شدند.

جدول ۲. خواص شیمیایی و فیزیکی کلینکر و سنگ گچ.

گچ	کلینکر	
۳/۳۷	۲/۱۵	درصد سیلیسیم اکسید
۰/۸۲	۴/۸۹	درصد آلومینیوم اکسید
۰/۳۲	۳/۹۷	درصد آهن اکسید
۳۲/۱۹	۶۵/۹۲	درصد کلسیم اکسید
۴/۲۰	۱/۵۹	درصد متیزیم اکسید
۳۷/۵۲	۰/۷۳	درصد سولفات
۰/۱۵	۰/۶۹	درصد پتاسیم اکسید
۰	۰/۱۰	درصد سدیم اکسید
۲۶/۸۶	۰/۳۰	درصد افت وزنی
۴۶۸۰	۳۲۷۰	نرمی (cm ² /g)
۲/۵۲	۳/۱۷	چگالی (cm ³ /g)

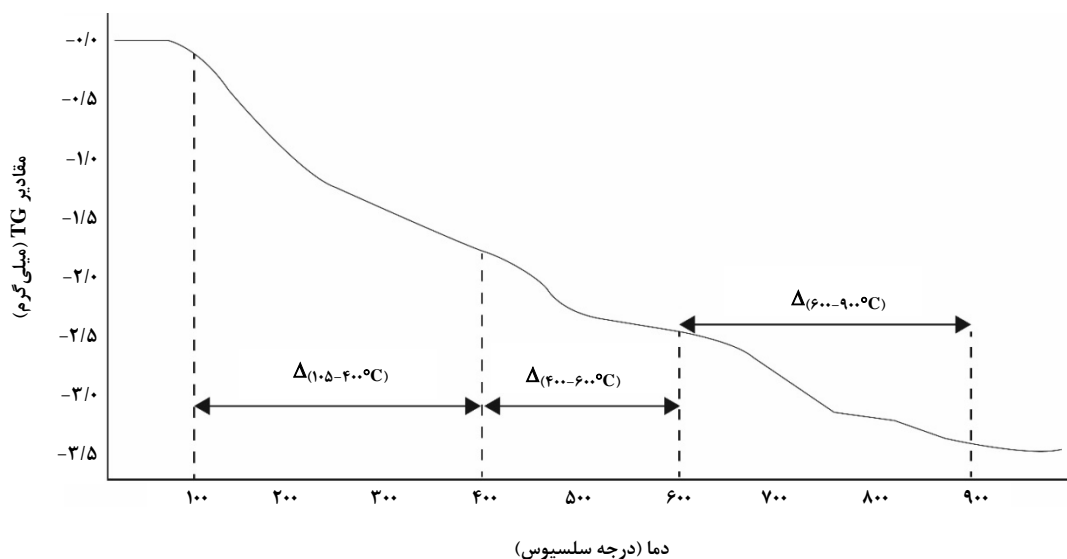
۲-۲ سیمان خشک

تجزیه شیمیایی سیمان‌ها به کمک دستگاه XRF، مطابق استاندارد NF P15-467 صورت گرفت و با الزامات استاندارد EN 197-1 تطبیق داده شد. همچنین آزمون بلین و وزن مخصوص سیمان مطابق استاندارد NF P 94054 و NF EN 196-6 انجام گرفت و نتایج نهایی از متوسط سه بار اندازه‌گیری ثبت شدند.

۳-۲ خمیر سیمان

خمیر سیمان حاوی ۵۰۰ گرم از هر یک از نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان مشخص مطابق استاندارد NF EN 196-5 ساخته شد. زمان گیرش نیز با دستگاه ویکات اندازه‌گیری شد.

1. Bhatti



شکل ۱. تجزیه فازهای اصلی سیمان تحت شرایط دمایی ۱۰۵ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به وسیله TGA.

$$w_{100} = 0.24(C_3S) + 0.21(C_2S) + 0.4(C_3A) + 0.37(C_4AF)$$

که در این رابطه:

$(d_{145-100}^c)$ ، تغییر وزنی بوتله در دمای ۱۴۵ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس است.

m_c : وزن سیمان بر حسب گرم

۳. بحث و نتیجه گیری

۳-۱ سیمان‌های خشک

۳-۱-۱ آنالیز شیمیایی

جدول (۳) مشاهده می‌شود که ترکیب شیمیایی سیمان‌ها تابعی از مقدار سنگ گچ است. این نتایج نشان می‌دهد که سیمان‌ها با الزامات شیمیایی EN 197-1 منطبق‌اند.

$$m_c = \frac{m_{\text{sampel}}}{\left(1 + \frac{w}{c}\right) (1 + LOI)} \quad (16)$$

که در این فرمول:

W_{100} : نسبت جرم آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون کامل سیمان

است و بر اساس روابط بوگ محاسبه می‌شود (گرم بر گرم سیمان).

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان‌های مورد مطالعه.

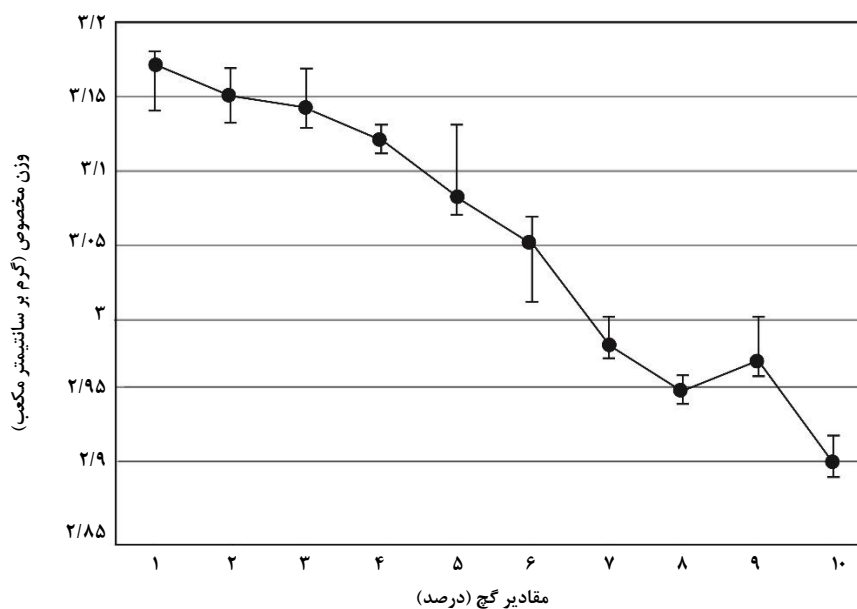
۹	۸	۷	۶	۵/۵	۵	۴	۳	۲	۰	درصد گچ
۱۹/۰۳	۱۹/۳۱	۱۹/۱۹	۱۹/۴۶	۱۹/۸۶	۱۹/۹۵	۱۹/۹۶	۲۰/۰۶	۱۹/۸۶	۲۱/۵	درصد سیلیسیم اکسید
۴/۵۴	۴/۷۴	۴/۷۹	۴/۷۳	۴/۷۱	۴/۷۲	۴/۷۶	۴/۶۳	۴/۹۶	۴/۸۹	درصد آلومینیوم اکسید
۳/۰۷	۳/۲۵	۳/۲۷	۳/۱۸	۳/۱۳	۲/۹۸	۲/۹۶	۳/۲۸	۳/۴۱	۳/۹۷	درصد آهن اکسید
۵۸/۷۵	۵۸/۷۰	۵۹/۰۰	۶۰/۴۷	۵۹/۴۲	۶۱/۸۶	۶۱/۳۷	۶۳/۹۴	۶۳/۹۷	۶۵/۹۲	درصد کلسیم اکسید
۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۵۸	۱/۵۷	۱/۵۶	۱/۵۵	۱/۵۴	۱/۵۴	۱/۵۳	۱/۵۹	درصد منیزیم اکسید
۴/۰۳	۳/۷۸	۳/۴۸	۳/۲۲	۳/۰۲	۲/۷۸	۲/۵۲	۲/۰۴	۱/۵۳	۰/۷۳	درصد سولفات
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	درصد کلر
۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۶۹	درصد پتاسیم اکسید
۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۰	درصد سدیم اکسید
۲/۴۰	۲/۳۹	۲/۱۰	۱/۷۴	۱/۴۲	۱/۴۴	۱/۱۲	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۳۰	درصد افت وزنی

درصد منیزیم اکسید در سیمان کاملاً آشکار نیست؛ مطابق نتایج جدول (۲)، درصد منیزیم اکسید آزاد $4/2\%$ است.

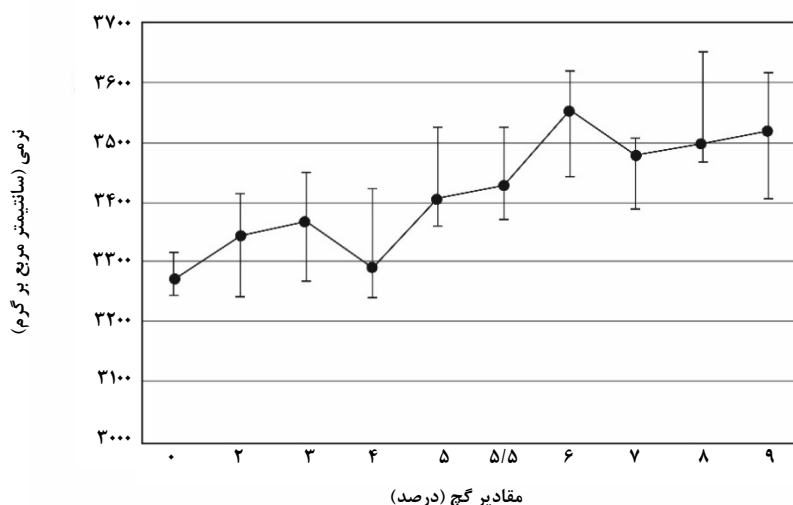
۳-۱-۲ وزن مخصوص سیمان و بلین

اثر سنگ گچ بر وزن مخصوص و نرمی سیمان را در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌کنید.

در خصوص درصد افت وزنی، درصد کلر و درصد سولفات باید کمتر از 5% ، $0/1\%$ و 4% باشد؛ جز هنگام استفاده از 9% سنگ گچ که مقدار سولفات به $4/03\%$ رسیده است، در سایر موارد افزودن گچ سبب افزایش مطلق افت وزنی و سولفات شده است. برعکس، کلسیم اکسید، سیلیسیم اکسید، آلومینیم اکسید و آهن اکسید با افزودن سنگ گچ کاهش یافته‌اند. علاوه بر این، درصد سنگ گچ بر روی عناصر سدیم اکسید و پتاسیم اکسید بی تأثیر است. اثر سنگ گچ بر



شکل ۲. اثر گچ بر وزن مخصوص سیمان‌های مورد مطالعه.



شکل ۳. اثر گچ روی بلین سیمان‌های مورد مطالعه.

به بیان دیگر، مطابق شکل (۳)، نرمی سیمان‌ها با افزودن سنگ گچ افزایش می‌یابد. نرمی به صورت سطحی بیان می‌شود که مولکول‌های آب آن را فرا می‌گیرند، افزایش نرمی منجر به ایجاد سطح مرطوب بزرگتر می‌شود و آهنگ W/C افزایش می‌یابد. یافته‌های مشابه را دیگر محققان هم گزارش داده‌اند [۱۲ و ۲۲].

۳-۲-۲ زمان گیرش

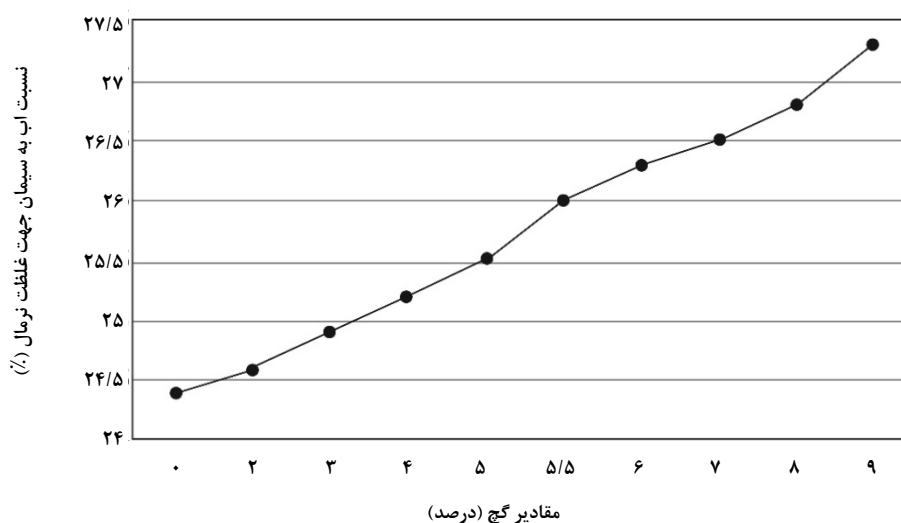
همانگونه که می‌دانیم، شروع شکل‌گیری C-S-H تأثیر بسزایی در گیرش سیمان دارد؛ سازوکارهای که انتقال از فاز پلاستیکی به سخت شده را از طریق افزایش گرانیوی کنترل می‌کند. این درست است که زمان گیرش سیمان، به نسبت W/C [۲۴ و ۲۳] و نرمی سیمان [۲۵] بستگی دارد ولی عنصر SO_3 تأثیر بیشتری روی زمان گیرش دارد. اثر سنگ گچ روی زمان گیرش سیمان را در شکل (۵) مشاهده می‌کنید. همانگونه که مشخص است، سنگ گچ زمان گیرش اولیه و نهایی را تا زمانی که تأخیر می‌اندازد که ۵/۵٪ سنگ گچ مصرف شود. فراتر از این مقدار تأثیر متغیری روی زمان گیرش دارد. در مقایسه با سیمان بدون گچ، سیمان با ۵/۵٪ گچ دارای گیرش اولیه ۱۵۰ دقیقه و گیرش نهایی ۲۱۵ دقیقه است که در مقایسه با نمونه سیمان دارای گچ ۲٪، به ترتیب، ۳۵ و ۶۵ دقیقه افزایش داشته است.

به نظر می‌رسد که نتایج به دست آمده تحت تأثیر خواص فیزیکی گچ بوده است. کاهش وزن مخصوص سیمان عمدتاً ناشی از تفاوت بین چگالی کلینکر (۳/۱۷ گرم بر سانتیمتر مکعب) و چگالی گچ (۲/۵۲ گرم بر سانتیمتر مکعب) است. با این حال، افزودن گچ که نرم‌تر از کلینکر است (۳۲۷۰-۴۶۸۰ سانتیمتر بر گرم) سبب افزایش نرمی سیمان می‌شود. جز در نمونه‌هایی با افزودن سنگ گچ ۴٪ و ۶٪، بلین سیمان به صورت تابعی از سنگ گچ افزایش مطلق می‌یابد. باید به این نکته توجه کرد که مقادیر نظری، با توجه به قانون اختلاط، با نتایج تجربی همخوانی مناسبی دارد.

۳-۲-۳ خمیر سیمان

۳-۲-۱ درصد آب مورد نیاز

مقدار آب مورد نیاز با توجه به مقدار سنگ گچ مصرفی را در شکل (۴) مشاهده می‌کنید. با بررسی این نمودارها، مشخص می‌شود که مقدار آب مورد نیاز با افزایش سنگ گچ افزایش می‌یابد. این افزایش آب از مقدار ۱۲۲ گرم برای نمونه بدون سنگ گچ تا مقدار ۱۳۰ و ۱۳۶/۵ گرم برای نمونه‌های حاوی ۵/۵٪ و ۹٪ سنگ گچ است که از رشد ۶/۵۶٪ و ۱۱/۸۸٪ حکایت می‌کند. این افزایش آب می‌تواند به دو دلیل باشد: نرمی سیمان [۱۲] و فرآیند هیدراتاسیون [۲۰].



شکل ۴. اثر سنگ گچ بر مقدار آب مصرفی.

نشان می‌دهد که بیشترین حرارت هیدراتاسیون مربوط به نمونه بدون سنگ گچ (۳۱۵ ژول بر گرم)، سیمان با ۸٪ گچ (۳۲۰ ژول بر گرم) و سیمان با ۹٪ گچ برابر (۳۶۷ ژول بر گرم) است. سیمان با ۵/۵٪ گچ دارای کمترین حرارت هیدراتاسیون (۲۳۵ ژول بر گرم) است.

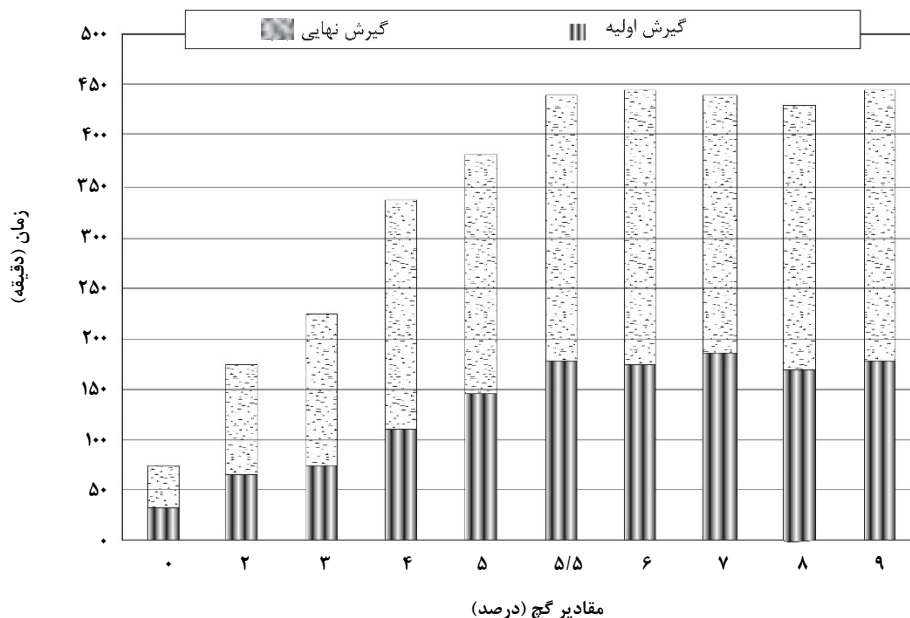
حرارت هیدراتاسیون بستگی به فازهای سیمان سیلیکات تری کلسیم، سیلیکات دی کلسیم، آلومینات تری کلسیم، آلومینو فریت تترا کلسیم و نیز مقدار آهک آزاد و گچ دارد. همان‌طور که می‌دانیم در سیمان بدون گچ، فاز آلومینات تری کلسیم بالاترین حرارت هیدراتاسیون (تقریباً ۱۳۰۰ ژول بر گرم) را آزاد می‌کند. از ۲٪ تا ۵/۵٪ به ترتیب گرمای هیدراتاسیون کمتری آزاد می‌شود. این بعلت اثر تأخیری گچ روی واکنش‌های فاز آلومینات تری کلسیم و آلومینو فریت تترا کلسیم است.

با مرور نتایج، نتیجه می‌گیریم که مقدار گچ بهینه در سیمان ۵/۵٪ (۳٪ SO_3) است. باید یادآوری شود که مطابق استاندارد EN 197-1 حداقل زمان گیرش برای سیمان نوع CEM ۵۲/۵ معادل ۴۵ دقیقه و برای CEM ۴۲/۵ معادل ۶۰ دقیقه است، بنابراین کلیه نمونه‌ها الزامات استاندارد را برآورده می‌کند، جز نمونه سیمان بدون گچ. تحقیقات مشابه نیز توسط سایر محققان ارائه شده است [۶ و ۲۶].

۳-۳ ملات

۳-۳-۱ گرمای هیدراتاسیون

در جدول (۴) گرمای هیدراتاسیون نمونه‌های مختلف سیمان پس از ۴۱ ساعت درج شده است. حداکثر حرارت هیدراتاسیون سیمان پرتلند پس از ۴۱ ساعت مطابق استاندارد NF EN 197-1/A1 (2004) برابر با ۳۰۰ ژول بر گرم است. نتایج



شکل ۵. اثر سنگ گچ بر روی زمان گیرش.

جدول ۴. اثر درصد گچ روی گرمای هیدراتاسیون

مقدار گچ	٪۰	٪۲	٪۳	٪۴	٪۵	٪۵/۵	٪۶	٪۷	٪۸	٪۹
گرمای هیدراتاسیون (J/g)	۳۱۵	۲۷۴	۲۵۷	۲۴۳	۲۳۹	۲۳۵	۲۴۱	۲۸۱	۳۲۰	۳۶۷

می‌توان نتیجه گرفت که درصد گچ بهینه ۵/۵٪ باید باشد، زیرا مقدار حرارت هیدراتاسیون بالا سبب ترک خوردگی و افزایش انقباض حرارتی در ملات و بتن می‌شود [۲۷] و بهبود دوام مطابق یافته‌های هوسایی^۱ و همکارانش [۲۸] در کاهش حرارت هیدراتاسیون است.

۳-۳-۲ مقاومت فشاری

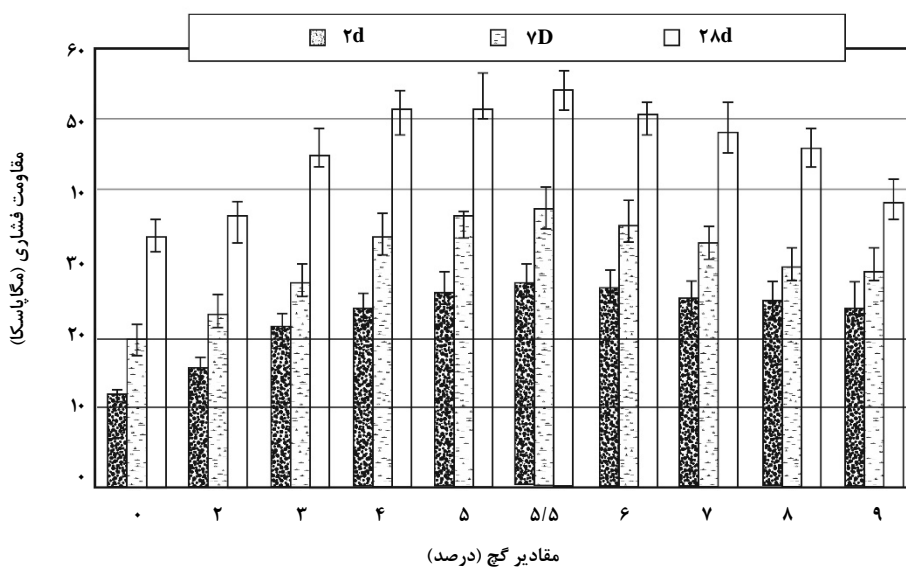
اثر گچ بر مقاومت فشاری در قالب شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رود، مقاومت فشاری به سنگ گچ و سن مورد نظر بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری در همه سن‌ها با افزایش میزان سنگ گچ تا ۵/۵٪ افزایش می‌یابد. با درصدهای بالاتر سنگ گچ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نمونه بدون سنگ گچ دارای کمترین مقاومت فشاری در کلیه سنین است. در مقابل، نمونه حاوی ۵/۵٪ سنگ گچ دارای بالاترین مقاومت در سن‌های ۲، ۷ و ۲۸ روزه با افزایش آهنگ ۱۲۷/۱۷٪، ۸۶/۵٪ و ۶۱/۰۸٪ است.

همانگونه که می‌دانیم، سنگ گچ انحلال آلیت و بلیت را بهبود می‌بخشد [۷] و سبب تسریع هیدراتاسیون شان می‌شود [۲۸]. از سوی دیگر، سنگ گچ اثر مثبتی بر تشکیل مقدار C-S-H دارد [۸]. مقاومت فشاری نیز به میزان محصولات هیدراتاسیون

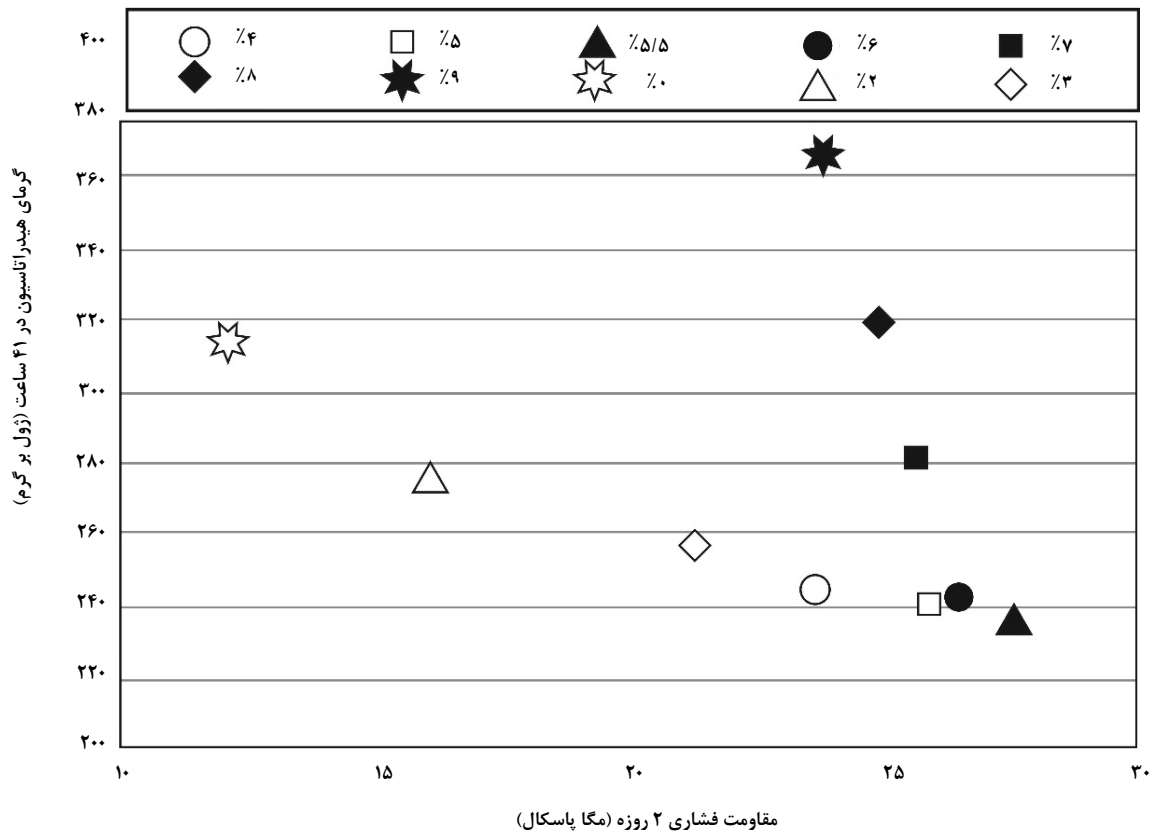
همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری با گرمای هیدراتاسیون نسبت عکس دارد، به نظر می‌رسد در درصد گچ بهینه ۵/۵٪ حداکثر مقاومت فشاری و حداقل گرمای هیدراتاسیون وجود دارد.

۳-۳-۳ تورم

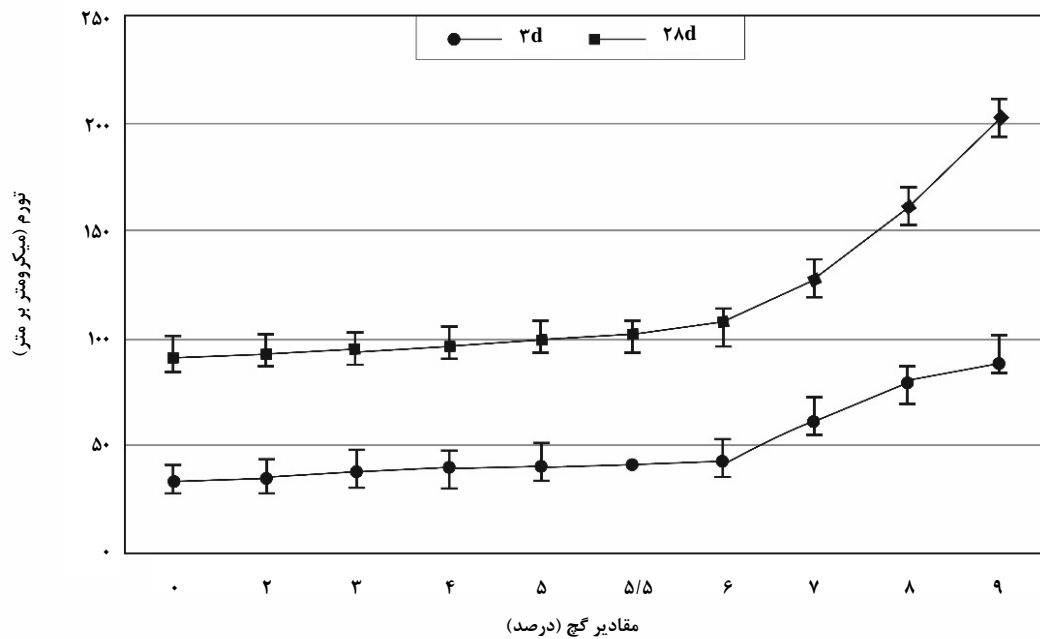
نمونه‌های ملات به منظور آزمون تورم ساخته شد و در حمام آب با دمای ۲۰±۲ درجه سلسیوس تا سنین ۳ و ۲۸ روزه قرار داده شد. اثر سنگ گچ در شکل (۸) مشاهده می‌شود. تورم با دوره عمل‌آوری و درصد گچ افزایش می‌یابد. نمونه بدون گچ در هر دو سن دارای حداقل تورم بود و نمونه با ۹٪ گچ دارای بالاترین مقدار تورم بود. نرخ رشد بین ۰ تا ۶٪ گچ یکسان نبود، تورم به آرامی افزایش می‌یافت ولی در گچ بالای ۶٪ افزایش تورم سریعتر بود. مثلاً، در سن ۲۸ روزه، تورم نمونه با ۶٪ گچ ۱۸/۹۴٪ بزرگ‌تر از نمونه بدون گچ بود؛ که این مورد برای نمونه حاوی ۹٪ گچ ۱/۲۲ دفعه بیشتر بود.



شکل ۶. اثر سنگ گچ بر مقاومت فشاری.



شکل ۷. همبستگی مقاومت فشاری و گرمای هیدراتاسیون.



شکل ۸. اثر سنگ گچ بر تورم نمونه‌ها.

برای این نمونه، به نظر می‌رسد هیدراتاسیون سریع آلومینات تری کلسیم و هیدراتاسیون اصلی سیلیکات تری کلسیم و سیلیکات دی کلسیم منجر به مقاومت فشاری پایین در سن‌های پایین (سه روزه) می‌شود. آب در این هیدراتاسیون به خوبی مصرف نمی‌شود و در شرایط خشک، تبخیر می‌شود که به انقباض می‌انجامد. برای نمونه‌های دیگر، گچ دو اثر متناقض دارد. سبب کاهش انقباض در سن ۳ روزه با افزودنی ۳٪ و در سن ۲۸ روزه با افزودنی ۶٪ می‌شود. در درصد‌های بالاتر، گچ سبب تشدید انقباض می‌شود. برای مورد اول، نمونه‌ها به خوبی هیدراته می‌شوند که با نتایج گرمای هیدراتاسیون و مقاومت فشاری منطبق است. برای مورد دوم، به نظر می‌رسد مازاد گچ، زیانبار است. باید به این نکته توجه شود که در استاندارد NF P15-301، حداقل انقباض در سن ۲۸ روزه برابر ۱۰۰۰ میکرومتر بر متر است.

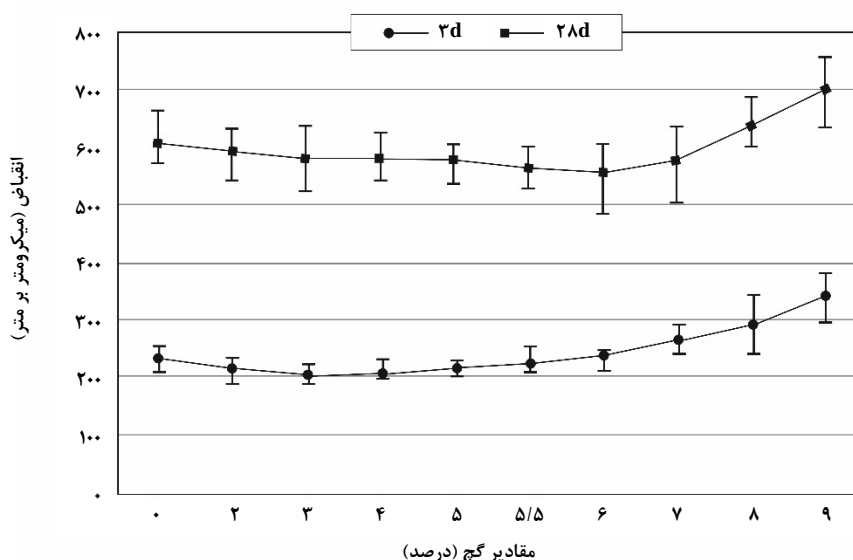
۳-۳-۵- درجه هیدراتاسیون

درجه هیدراتاسیون نمونه‌های مختلف، مطابق معادله (۶) در سن ۳ و ۲۸ روزه محاسبه می‌شود. نتایج در جدول (۵) درج و در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت درجه هیدراتاسیون با بالا رفتن سن، افزایش می‌یابد ولی به میزان سنگ گچ مصرفی نیز بستگی دارد. در سن ۳ روزه، نمونه بدون

واضح است که گچ علت اصلی این نتایج تورم است، به‌ویژه وقتی گچ بیشتر از مقدار گچ بهینه مصرف شود. مطابق یافته‌های کوردوسکی [۸]، گچ بهینه باید به طور کامل با آلومینات تری کلسیم واکنش دهد. در سن‌های پایین که منجر به تشکیل اترینجیت می‌شود، مقدار بالای گچ سبب خطر تورم ملات می‌شود. علت اصلی این تورم مطابق یافته‌های ساراکا و آبینه [۲] با درصد بالایی از گچ، انجام واکنش شیمیایی بین گچ باقیمانده و آلومینات تری کلسیم مراحل بعدی است (بیشتر از ۴۸ ساعت زمان می‌برد) و در نتیجه مقدار اضافی اترینجیت تشکیل می‌شود که منجر به انبساط سولفات می‌شود.

۳-۳-۴- انقباض خشک

نمونه‌های سیمان در محفظه کیورینگ با دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۵۰٪ جهت آزمون انقباض و به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند. نتایج را در شکل (۹) مشاهده می‌کنیم. همانگونه که می‌دانیم سولفات سبب کاهش انقباض می‌شود [۲۲ و ۸]. در سن سه روزه، نمونه بدون گچ دارای انقباض بالایی بود (۲۳۴/۶۱ میکرومتر بر متر)، که این احتمالاً به علت هیدراتاسیون پایین و به تبع آن مقاومت فشاری پایین (نمودار ۶) و گرمای هیدراتاسیون بالاست (جدول ۴).



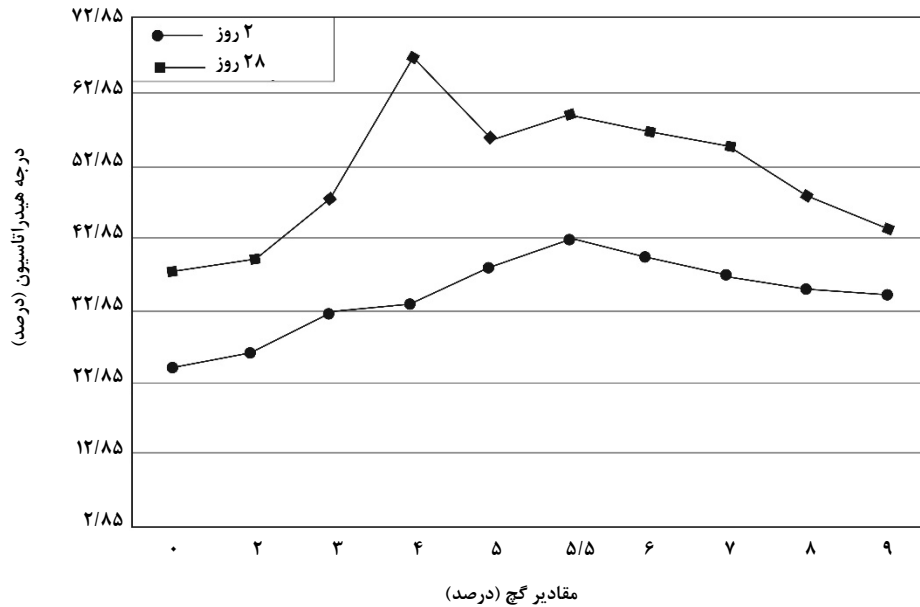
نمودار ۹. اثر سنگ گچ بر روی انقباض خشک ملات.

شتاب می‌بخشد، درجه هیدراتاسیون را نیز افزایش می‌دهد که از آثار مثبت گچ است. بدون گچ و نیز وقتی از درصد گچ پایین تر از مقدار بهینه استفاده می‌شود، انحلال ترکیبات آب‌گریز (سیلیکات تری کلسیم و سیلیکات دی کلسیم) آهسته است. هیدراتاسیون آلومینات تری کلسیم به سرعت انجام می‌شود، که مانع از تشکیل محصولات هیدراتاسیون (عمدتا C-S-H و CH) می‌شود و سبب کاهش درجه هیدراتاسیون می‌شود. استفاده از گچ به میزان بیشتر از ۵/۵٪ در سن ۳ روزه و ۴٪ در سن ۲۸ روزه به طور چشمگیری سبب تأخیر می‌شود [۲] و درجه هیدراتاسیون را کاهش می‌دهد.

سنگ گچ دارای پایین‌ترین درجه هیدراتاسیون بود (۲۴/۸۹). مقدار پایین آب پیوندی شیمیایی در این نمونه، به معنی تشکیل محصولات هیدراتاسیون با کیفیت پایین است که منجر به مقاومت فشاری ۲ روزه پایین (۱۲ مگاپاسکال) و گرمای هیدراتاسیون بالا (۳۱۵ ژول بر گرم) شود. اگرچه با سنگ گچ ۵/۵٪، درجه هیدراتاسیون ۳ روزه (۴۲/۴۶٪) مناسب بود با مقاومت ۲ روزه (۲۵/۸ مگا پاسکال)، افزایش سنگ گچ تا میزان ۵/۵٪ به کاهش درجه هیدراتاسیون منجر شد. در سن ۲۸ روزه به نظر می‌رسد، سنگ گچ بهینه برای درجه هیدراتاسیون، ۴٪ باشد. همان‌گونه که گچ، هیدراتاسیون تری کلسیم سیلیکات [۳۳و۸] را

جدول ۵. درجه هیدراتاسیون در سن ۳ و ۲۸ روزه.

α (%)	W_c (mg)	$\Delta_{(600-800^\circ c)}$ (mg)	$\Delta_{(145-1000^\circ c)}$ (mg)	W_{100}	m_c (mg)	m_{Sampel} (mg)	درصد گچ
۲۵	۲/۱۱۶	۰/۹۳۷	۳/۱۲۵	۰/۲۲۸	۳۷/۲۸۹	۵۶/۱۰۱	۰ (۳ روزه)
۳۸	۱۱/۰۱۳	۳/۴۲۴	۱۴/۷۷۴	۰/۲۲۸	۱۲۵/۷۳۷	۱۸۹/۱۷۱	۰ (۲۸ روزه)
۲۷	۶/۳۳۲	۲/۹۲۶	۱۰/۰۷۴	۰/۲۱۶	۱۰۸/۳۴	۱۶۳/۸۱	۲ (۳ روزه)
۴۰	۸/۲۲۷	۲/۴۸۶	۱۱/۴۴۲	۰/۲۱۶	۹۶/۱۵۹	۱۴۵/۳۹۲	۲ (۲۸ روزه)
۳۳	۵/۹۸۸	۲/۴۲۱	۹/۰۹۳	۰/۲۱۶	۸۵/۱۴۶	۱۲۸/۸۰۴	۳ (۳ روزه)
۴۸	۱۱/۲۳۵	۲/۹۰۱	۱۵/۰۱۲	۰/۲۱۶	۱۰۷/۷۴۸	۱۶۲/۹۹۶	۳ (۲۸ روزه)
۳۴	۵/۹۹۳	۲/۲۴	۹/۱۷۲	۰/۲۰۴	۸۷/۳۸۲	۱۳۲/۵۴۱	۴ (۳ روزه)
۶۸	۹/۹۶۱	۲/۱۷۴	۱۲/۹۰۲	۰/۲۰۴	۷۲/۰۲۶	۱۰۹/۲۴۹	۴ (۲۸ روزه)
۳۹	۵/۸۳۵	۲/۴۶۱	۹/۳۱۰	۰/۲۰۶	۷۳/۱۸۹	۱۱۱/۳۶۵	۵ (۳ روزه)
۵۷	۷/۵۶	۲/۰۳۲	۱۰/۴۸۵	۰/۲۰۶	۶۴/۸۲۲	۹۸/۶۳۴	۵ (۲۸ روزه)
۴۲	۸/۵۵۳	۳/۰۹۴	۱۳/۰۳۷	۰/۲	۱۰۰/۷۰۴	۱۵۳/۲۰۱	۵/۵ (۳ روزه)
۶۰	۱۰/۵۳	۳/۱۹۱	۱۴/۹۳۵	۰/۲	۸۸/۱۲۷	۱۳۴/۰۶۸	۵/۵ (۲۸ روزه)
۴۰	۹/۱۹۱	۳/۴۳۸	۱۴/۵۴	۰/۲۰۴	۱۱۲/۰۸۷	۱۷۱/۰۵۶	۶ (۳ روزه)
۵۸	۱۰/۳۴	۳/۰۷۹	۱۴/۹۱۱	۰/۲۰۴	۸۸/۱۰۴	۱۳۴/۴۵۶	۶ (۲۸ روزه)
۳۸	۵/۳۷۳	۲/۶۸۹	۹/۵۳۴	۰/۱۹۹	۷۱/۹۶۹	۱۱۰/۲۲	۷ (۳ روزه)
۵۵	۹/۷۰۱	۳/۳۹۲	۱۴/۹۰۶	۰/۱۹۹	۸۸/۲۴۳	۱۳۵/۱۴۴	۷ (۲۸ روزه)
۳۵	۶/۰۴	۳/۶۶	۱۱/۷۲۴	۰/۱۹۸	۸۶/۳۵۱	۱۳۲/۶۲۳	۸ (۳ روزه)
۴۸	۶/۶۹۴	۲/۷۸۲	۱۱/۱۰۸	۰/۱۹۸	۶۹/۹۴۷	۱۰۷/۴۲۸	۸ (۲۸ روزه)
۳۵	۶/۰۵۷	۴/۴۹۹	۱۲/۶۲۱	۰/۱۹۸	۸۷/۶۹۲	۱۳۴/۶۹۵	۹ (۳ روزه)
۴۴	۸/۰۷	۵/۴۱۷	۱۵/۶۵۶	۰/۱۹۸	۹۲/۰۷۵	۱۴۱/۴۲۸	۹ (۲۸ روزه)



شکل ۱۰. اثر سنگ گچ بر روی درجه هیدراتاسیون.

مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به علاوه، در مقدار سنگ گچ بهینه ۵/۵٪ حرارت هیدراتاسیون دارای کمترین مقدار است. - سنگ گچ اثر مثبتی بر هیدراتاسیون سیمان دارد، درصد سنگ گچ ۵/۵٪ به درجه هیدراتاسیون بالاتر در سن ۳ روزه و درصد گچ ۴٪ به درجه هیدراتاسیون بالاتر در سن ۲۸ روزه منجر می‌شود. - استفاده از درصد سنگ گچ بهینه ۵/۵٪ به دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری و حداقل گرمای هیدراتاسیون منجر می‌شود. بنابراین و مطابق نتایج این مطالعه (جدول ۶) مقدار بهینه گچ مورد استفاده ۵/۵٪ (۳/۰۲ SO₃) است.

جدول ۶. درصد گچ بهینه.

مقدار SO ₃ بهینه در سیمان	درصد گچ بهینه	ویژگی‌های مورد مطالعه	
۱/۵۳٪ تا ۳/۷۸٪	از ۲ تا ۸٪	خواص شیمیایی	سیمان‌های خشک
نامشخص	نامشخص	بلین	
نامشخص	نامشخص	چگالی	
نامشخص	نامشخص	غلظت آب نرمال	خمیر سیمان
۲/۵۲٪ تا ۴/۰۳٪	از ۴ تا ۹٪	زمان گیرش	

۴. نتیجه‌گیری کلی

خواص سیمان خشک، خمیر سیمان و ملات سیمان با درصدهای مختلف سنگ گچ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج اصلی این مطالعه از این قرارند.

- خواص فیزیکی سیمان تحت تأثیر سنگ گچ قرار دارد، استفاده از درصد بالاتر سنگ گچ سبب بالا رفتن نرمی می‌شود، که عمدتاً به‌خاطر کاهش چگالی سیمان است. به همین ترتیب، اثر سنگ گچ بر ترکیب شیمیایی سیمان به‌ویژه کلسیم اکسید، سولفات، سیلیسیم اکسید و افت وزنی، جز نمونه سنگ گچ ۹٪، سایر نمونه‌ها مطابق با الزامات استاندارد EN 197-1 بود.

- وقتی سنگ گچ در خمیر سیمان استفاده می‌شود، غلظت آب نرمال افزایش می‌یابد. در همان زمان گچ اثر تأخیری دارد و زمان گیرش تا هنگام استفاده از سنگ گچ تا درصد بهینه ۵/۵٪ افزایش می‌یابد. وقتی بیشتر از مقدار بهینه سنگ گچ استفاده شود، بر زمان گیرش تأثیر چشمگیری نمی‌گذارد.

- گچ بهینه به وضوح بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد، ملات حاوی ۵/۵٪ سنگ گچ دارای بیشترین مقاومت در سن‌های ۲، ۷ و ۲۸ روزه است.

در صورت استفاده از سنگ گچ، بیشتر یا کمتر از مقدار بهینه،

- partial replacement of cement in mortar", Waste Manage. (Oxford), 29: 2378-2384, (2009).
- [11] Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., Clastres, P., "Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement", Constr. Build. Mater, 47: 1268-1277, (2013).
- [12] Ghiasvand, E., Ramezani pour, A. A., "Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement", Constr. Build. Mater, 53: 547-554, (2014).
- [13] Yilmaz, B., Ediz, N., "The use of raw and calcined diatomite in cement production", Cem. Concr. Compos, 30: 202-211, (2008).
- [14] Leklou, N., Nguyen., Mounanga, P., "The effect of the partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars", KSCE J. Civ. Eng, 21: 1359-1366, (2017).
- [15] Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., Townsend, T. G., "A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete", J. Cleaner Prod, 121: 1-18, (2016).
- [16] Bhatti, J. I., "Hydration versus strength in a Portland cement developed from domestic mineral wastes-a comparative study", Thermochim. Acta, 106: 93-103, (1986).
- [17] Sepulcre, A., Pinilla, J., Hernandez, O. F., "Microstructural analysis of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite additions", Constr. Build. Mater, 47: 282-292, (2013).
- [18] Deboucha, W., Leklou, N., Khelidj, A., Oudjit, M. N., "Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): methodology of calculating the degree of hydration", Constr. Build. Mater, 146: 687-701, (2017).
- [19] Siline, M., Ghorbel, E., Bibi, M., "Effect of freeze-thaw cycles on the physicomaterial properties of a pozzolanic mortar", Constr. Build. Mater, 134: 32-38, (2017).
- [20] Mounanga, P., "Experimental Study of the Behavior of Cement Pastes at Very Young Age: Hydration, Shrinkage, Thermophysical Properties Doctoral Thesis", University of Nantes, France, (2003).
- [21] Schiller, B., Ellerbrock, H. G., "The grinding and properties of cement with several main constituents", Zement-Kalk-Gips, 45: 325-334, (1992).
- [22] Mashaly, A. O., El-Kaliouby, B. A., Shalaby, B. N., El-Gohary, A. M., "Rashwan, Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks", J. Cleaner Prod, 112: 731-741, (2016).
- [23] Çolak, A., "Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan", Cem. Concr. Res, 33: 585-593, (2003).

(ادامه) جدول ۶. درصد گچ بهینه.

مقدار SO_3 بهینه در سیمان	درصد گچ بهینه	خواص مورد مطالعه	
٪ ۱/۵۳ تا ٪ ۳/۴۸	از ۲ تا ۷ ٪	گرمای هیدراتاسیون	ملات سیمان
٪ ۳/۰۲	۵/۵	مقاومت فشاری	
٪ ۳/۲۲ تا ٪ ۱/۵۳	از ۲ تا ۶ ٪	تورم	
٪ ۳/۲۲ تا ٪ ۲/۰۴	از ۳ تا ۶ ٪	انقباض خشک	
٪ ۳/۰۲ تا ٪ ۲/۵۲	۴ و ۵/۵ ٪	درجه هیدراتاسیون	فرمول‌های تثوری
٪ ۱/۸۱	—	فرمول ۱	
٪ ۲/۵۱	—	فرمول ۲	
٪ ۱/۳۹	—	فرمول ۳	
٪ ۲/۶	—	فرمول ۴	

مراجع

- [1] Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J., "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review", Cem. Concr. Compos, 23: 441-454, (2001).
- [2] Soroka, I., Abayneh, M., "Effect of gypsum on properties and internal structure of PC paste", Cem. Constr. Res, 16: 495-504, (1986).
- [3] García-Maté, M., De La Torre, A. G., León-Reina, L., Aranda, M. A. G., "Effect of calcium sulfate source on the hydration of calcium sulfoaluminate eco-cement", Cem. Concr. Compos, 55: 53-61, (2015).
- [4] Tzouvalas, G., Dermatas, N., Tsimas, S., "Alternative calcium sulfate-bearing materials as cement retarders Part I. Anhydrite", Cem. Concr. Res, 34: 2113-2118, (2004).
- [5] Mardani-Aghabaglou A., Boyaci, O. C., Hosseinezhad, H., Felekoğlu, B., Ramyar, K., "Effect of gypsum type on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture", Cem. Concr. Compos, 68: 15-26, (2016).
- [6] Liu, F., Lan, M. Z., "Effects of gypsum on cementitious systems with different mineral mixtures", Key Eng. Mater, 509: 20-25, (2012).
- [7] Ménétrier, D., Jawed, I., Skalny J., "Effect of gypsum on C3S hydration", Cem. Concr. Res, 10: 697-701, (1980).
- [8] Kurdowski, W., "Chapter 4: Cement Hydration. Cement and Concrete Chemistry", Doi: 10.1007/978-94-007-7945-7, 205-277, (2014).
- [9] Assaad, Joseph, J., "Quantifying the effect of clinker grinding aids under laboratory conditions", Mater. Eng, 81: 40-51, (2015).
- [10] Naceri, A., Hamina, M. C., "Use of waste brick as a

- [24] Brooks, J. J., Megat Johari, M. A., Mazloom, M., "Effect of admixture on the setting times of high strength concrete", *Cem. Concr. Compos*, 22: 293-301, (2000).
- [25] Dave, N., Misra, A. K., Srivastava, A., Kaushik, S. K., "Setting time and standard consistency of quaternary binders: The influence of cementitious material addition and mixing", *Int. J. Sust. Built Environ*, 6: 30-36, (2017).
- [26] Yao, Y., Yang, D. W., Tong, H. X., Zeng, J. L., Liu, Y., "Modification of waste fluorgypsum and its applications as a cement retarder", *J. Central South Univ. Technol*, 18: 1402-1407, (2011).
- [27] Talero, R., "Expansive Synergic Effect of ettringite from pozzolan (metakaolin) and from OPC, co-precipitating in a common plaster-bearing solution: Part I: by cement pastes and mortars", *Constr. Build. Mater*, 24: 1779-1789, (2010).
- [28] Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., Zain, M. F. M., "Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: a review", *Constr. Build. Mater*, 116: 128-140, (2016).
- [29] Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., Irassar, E. F., "Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays", *Cem. Concr. Compos*, 37: 319-327, (2013).
- [30] Qing, Y., Huxing, W., Shangxian, W., Zonghan, L., "Effect of MgO and gypsum content on long-term expansion of low heat Portland slag cement with slight expansion", *Cem. Concr. Compos*, 26: 331-337, (2004).
- [31] Torr ns-Martin, D., Fernandez-Carrasco, L., "Effect of sulfate content on cement mixtures", *Constr. Build. Mater*, 48: 144-150, (2013).
- [32] Irassar, E. F., Violini, D., Rahhal V. F., Milanesi, C., Trezza, M. A., "Bonavetti, Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding", *Cem. Concr. Compos*, 33: 192-200, (2011).
- [33] Zhang, Y., Zhang, X., "Research on effect of limestone and gypsum on C3A, C3S and PC clinker system", *Constr. Build. Mater*, 22: 1634-1642, (2008).