Iranian Concrete Society

A Case Study of Effect of Clinker Phase Changes on Cement and Concrete Performance without Additive and with a Sample of Super Plasticizer

Ali Akbar Kafash Bazari*
kafash@tehrancement.co.ir
[*]Chief of research and development of Tehran cement Co, Tehran, Iran
Mahdi Chini
m.chini@bhrc.ac.ir
Assistant Professor of Road, Housing and Urban Development Research Centre, Tehran, Iran
Zivar Nikfal
nikfal.cement@gmail.com
Chief of physical Laboratory of Tehran cement Co, Tehran, Iran
Mohammad Vatani
m.vatani2012@gmail.com
Expert of Laboratory of Tehran cement Co, Tehran, Iran
Research paper

Abstract

Clinker phases have a significant effect on the technical characteristics of cement and its performance in concrete, but sufficient information is not available to determine the effect of each of these phases on the optimal performance of concrete. Therefore, in this practical paper, it was studied and a laboratory operation was designed. In the first stage, regular sampling of clinker from 2 kiln of Tehran cement factory was done in 3 months. Then 11 clinker samples (Portland type II) were selected which their phase values were different from each other. During the second stage, laboratory cementing was done in completely identical conditions using 11 clinker samples. A super plasticizer additive sample was also prepared. In the third stage, physical and chemical analysis was done on laboratory cement samples. During the fourth stage, 22 concrete mixes were prepared with 11 cement samples, and their slump were fixed (8cm in the first group and 12cm in the second group) so that 11 mixtures were labeled “without additives” and 11 mixtures were labeled “with additives”. Slump loss tests within 1 hour, determination of density, determination of air content of fresh mixed concrete, compressive strength of 7, 28 and 90 days in hardened concrete were performed on concrete mixtures. Based on the results, the comparison of the effect of C3S amount of clinker on the compressive strength of standard mortar and concrete showed that the direct relationship between C3S amount and compressive strength (mortar and concrete) is not favorable; but it can be said that with each increase of C3S percentage of clinker, the 7 and 28 days strength of concrete increases by about 1.5 units (kg/cm2) and with the increase of C3S from about 57% onwards, a drop in concrete strength can be observed. These points out the negative effect of excessive increase of C3S phase. Based on the results of the tests which determine the percentage of air in fresh concrete mixes containing additives and its decrease after 30 minutes, it was determined that the optimal amount of C3A was about 5-6%.

Keywords: Alite, Aluminate, Additive.

***Corresponding Auther:** Ali Akbar Kafash Bazari
Citotion: Kafash Bazari, A. A., Chini, M. A Case study of Effect of Clinker Phase Changes on Cement and Concrete Performance (Concrete without Additive and Concrete with a Sample of Super Plasticizer Additive). Journal of Concrete Structures and Materials, 2023; 8(1): 1-13. http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.319970.1240
2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۱۲-۲۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲-۰۴-۰۴

بررسی موردی اثر تغییرات فازهای کلینکر در عملکرد سیمان و بتن فاقد افزودنی و دارای یک نمونه افزودنی فوق‌روان‌کننده

علی اکبر کفاش بازاری
رئیس مرکز تحقیق و توسعه مجتمع صنعتی سیمان تهران، تهران، ایران
kafash@tehrancement.co.ir
(نویسنده مسئول)
مهدی چینی
استادیار مرکز تحقیقات وزارت راه، مسکن و شهرسازی تهران، ایران
m.chini@bhrc.ac.ir
زیور نیک‌فال
رئیس آزمایشگاه فیزیک مجتمع صنعتی سیمان تهران، تهران، ایران
mm.vatani2012@gmail.co
محمد وطنی
کارشناس آزمایشگاه مجتمع صنعتی سیمان تهران، تهران، ایران
mm.vatani2012@gmail.co

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

فازهای کلینکر، بر مشخصات فنی سیمان و عملکرد آن در بتن تاثیر قابل توجهی دارند، لیکن اطلاعات کافی برای تعیین میزان تاثیر هر یک از این فازها، جهت عملکرد مطلوب بتن در دسترس نیست. لذا در این مطالعه کاربردی به آن پرداخته شد و یک عملیات آزمایشگاهی طراحی گردید. در مرحله اول طی سه ماه، نمونه‌گیری مرتب از کلینکر دو کوره کارخانه سیمان تهران انجام شد. سپس ۱۱ نمونه کلینکر (پرتلند نوع۲) انتخاب شدند که مقادیر فازهای آن‌ها نسبت به هم متفاوت بودند. طی مرحله دوم، سیمان‌سازی آزمایشگاهی در شرایط کاملا یکسان با استفاده از ۱۱ نمونه کلینکر انجام شد. یک نمونه افزودنی فوق‌روان‌کننده نیز تهیه گردید. در مرحله سوم آنالیز فیزیکی و شیمیائی بر روی نمونه سیمان‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. طی مرحله چهارم ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان تهیه گردید که روانی و اسلامپ آن‌ها ثابت (در گروه اول ۸ سانتی‌متر و در گروه دوم ۱۲ سانتی‌متر) اعمال شد؛ بطوریکه ۱۱ مخلوط با عنوان «بدون افزودنی» و ۱۱ مخلوط با عنوان «دارای افزودنی» بودند. بر روی مخلوط‌های بتنی آزمایش‌های افت اسلامپ طی ۱ ساعت، تعیین چگالی، تعیین درصد هوای بتن تازه، مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. بر اساس نتایج حاصله، مقایسه تاثیر مقدار C_3S کلینکر بر مقاومت فشاری ملات استاندارد و بتن نشان داد که رابطه مستقیم مقدار C_3S و مقاومت فشاری (ملات و بتن) همبستگی مطلوبی ندارد؛ اما می‌توان گفت که با افزایش هر یک درصد C_3S کلینکر، مقاومت ۷ و ۲۸روزه بتن حدود ۱/۵ واحد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع) افزایش می‌یابد و با افزایش C_3S از حدود ۵۷٪ به بعد، افت مقاومت بتن مشاهده می‌شود که می‌توان به تاثیر منفی ازدیاد بیش از حد فاز C_3S اشاره نمود. بر اساس نتایج آزمایش‌های تعیین درصد هوای مخلوطهای بتن تازه حاوی افزودنی و روند کاهش آن پس از ۳۰دقیقه مشخص گردید که مقدار بهینه C_3S حدود ۶-۵٪ بود.

کلمات کلیدی: آلیت، آلومینات، سیمان، بتن.

۱- مقدمه

کارشناسان صنعت بتن غالبا ترجیح می‌دهند که سیمان مصرفی حاوی مقدار زیادی فاز آلیت (C_3S) باشد تا اطمینان از کسب مقاومت بتن براحتی حاصل شود (بر اساس تجربه نویسندگان). از طرفی ازدیاد فاز آلیت می‌تواند اثرات نامطلوبی بر دانه‌بندی سیمان (بعلت کاهش کیفی سایش‌پذیری کلینکر)، کارائی بتن تازه، دوام بتن سخت‌شده و سایر پارامترهای آن داشته باشد [۲-۱]. واکنش C_3S با آب (هیدارته شدن آلیت) ازگرمازایی بیشتر و سرعت گرمازایی بالاتری (نسبت به C_2S) برخوردار است. همچنین بر اساس روابط هیدراته شدن این دو فاز، دو برابر میزان آب مصرفی در هیدراسیون، آهک هیدراته تولید می‌کند و می‌تواند ضعف ساختاری و دوام کم را به ویژه در برابر حمله برخی سولفات ها، نفوذ یون کلر، واکنش قلیایی‌ها با سنگدانه‌های واکنش‌زا بوجود آورد [۳]. نوهو و همکاران (۲۰۲۰) اثرات و روش‌های کنترل ترکیب شیمیایی کلینکر برای تولید بهتر سیمان را مطالعه نمودند. این محققان با استفاده از ۱۰ نمونه کلینکر مختلف، ۱۰ نمونه سیمان تولید و XRD انجام دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، افزایش مقاومت اولیه سیمان در نتیجه افزایش مدول آلومینیوم؛کاهش مقاومت اولیه سیمان نتیجه افزایش مدول سیلیس، افزایش آهک آزاد با افزایش مدول آهک که منجر به نیاز به مصرف انرژی بیشتر برای تشکیل کلینکر، کلینکر با کیفیت پائین‌تر، انبساط حجمی و استحکام ضعیف سیمان می‌شود [۴]. طبق مطالعات نویل (۱۹۹۵)، سه کلسیم آلومینات در سنین ۱ تا ۳روزه (و احتمالا طولانی‌تر) به مقاومت خمیر سیمان کمک می‌کند. نقش سه کلسیم آلومینات در مقاومت ملات استاندارد و بتن بحث برانگیز می‌باشد، بطوریکه برخی منابع بطور شفاف ذکر کرده‌اند که با افزایش مقدار سه کلسیم آلومینات مقاومت فشاری کوتاه‌مدت ملات استاندارد و بتن افزایش می‌یابد، البته تاثیر فاز (خالص) آلیت در کسب مقاومت کوتاه‌مدت و میان‌مدت (۷ و ۲۸ روزه) کاملا واضح می‌باشد [۱۱-۵]. افزایش مقدار فازهای سه کلسیم آلومینات و آلیت موجب افزایش نیاز به آب بتن می‌گردد [۸]. احتمالا به سبب این افزایش آب‌خواهی، در تولید بتن‌های سنتی که جهت دستیابی به کارائی مطلوب، آب بتن افزایش می‌یابد، کاهش مقاومت فشاری بتن اتفاق می‌افتد. مطابق منابع مختلف هیدراته شدن بلیت، کندتر از آلیت است [۱۵-۱۲]؛ بنابراین روند کسب مقاومت بتن حاصله از سیمان با بلیت زیاد نسبتا کندتر می‌باشد. در جدول۱ درجه هیدراته شدن بلیت و آلیت طی زمان دیده می‌شود [۱۸-۱۶].

جدول ۱- درجه هیدراسیون آلیت و بلیت [۱۸-۱۶].

فاز	درجه هیدراسیون (٪) بعد از	عمق هیدراسیون (میکرون) بعد از		گرمای هیدراسیون		
	۱ روز	۲۸ روز	۳روز	۲۸روزه	۶ماه	(ژول بر گرم)	(کالری بر گرم)
آلیت (C_3S)	۲۵-۳۵	۷۸-۸۰	۳/۵	۷/۹	۱۵/۰	۵۰۰	۱۲۰
بلیت (C_2S)	۵-۱۰	۲۰-۵۰	۰/۶	۱/۰	۲/۷	۲۵۰	۶۰

تدین و همکاران (۱۳۹۵) رابطه مقاومت بتن در سنین مختلف با سیمان های گوناگون را مطالعه نمودند. آن‌ها با انتخاب سیمان نوع ۴۲۵-۱ و ۲ به عنوان پر مصرف‌ترین سیمان‌های کشور و ساخت بتن با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان پر مصرف‌ترین عیار بتن با مصالح یکسان و روانی برابر و عمل‌آوری در شرایط یکسان سعی در ارزیابی، تحلیل و مقایسه همزمان نتایج مقاومت فشاری داشتند [۱۹]. رحمتی و همکاران (۱۳۹۶) نیز مطالعاتی با روش مشابه انجام دادند تا تاثیر فازهای اصلی سیمان بر مقاومت اولیه و دراز مدت را ارزیابی نمایند [۲۲-۲۰]. بر اساس نتایج این مطالعات، مقدار فاز C_3A بر مقاومت زودهنگام (تا ۷روز)، مقدار فاز C_3S در مقاومت فشاری آزمونه‌ها در همه سنین اثرات مطلوبی دارد. همچنین مقدار قلیائی‌ها در افزایش رشد مقاومتی تاثیر مستقیم و

واضحی دارد. ربیعی و همکاران (۱۳۸۶) اثر نسبت فاز مایع[1] به جامد (L/P) کلینکر بر مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان را بررسی نمودند. آن‌ها طی چهار سری کار آزمایشگاهی، مقادیر این نسبت (فاز مایع به فاز جامد یا L/P) را ۰/۳۰، ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۴۵ تنظیم نموده و مقاومت فشاری ملات استاندارد ۲۸روزه را اندازه‌گیری کردند. بر اساس نتایج این محققان با افزایش فاز مایع، مقاومت فشاری ۲۸روزه کاهش یافته و با افزودن مونوسدیم فسفات آبدار، این مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۲۳].

آقابگلو و همکارانش (۲۰۱۷) اثر مقدار سه کلسیم آلومینات (C_3A) بر روی خواص خمیر سیمان، ملات و مخلوطهای بتنی حاوی مواد افزودنی را بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از سه سیمان تجاری پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ با محتوای C_3A مختلف (۱/۹۰٪، ۲/۷۷٪ و ۵/۸۵٪)، مخلوطهای بتنی ساختند و خواص رئولوژیکی بتن تازه و مقاومت فشاری آن را مطالعه کردند. بر اساس نتایج این محققان، با کاهش C_3A سیمان، خواص بتن تازه و قوام مخلوط‌ها بهبود می‌یابد، لیکن مقاومت فشاری مخلوطهای بتنی در سنین اولیه کاهش دارد. آن‌ها اثبات نمودند که در روانی یکسان، با افزایش آلومینات سیمان، نیاز به مصرف افزودنی کاهنده آب بیشتر می‌شود. بر اساس این نتایج در سیمان با آلومینات کم نسبت به سیمان با آلومینات نسبتا بیشتر: افت مقاومت ۱روزه حدود ۴۰٪؛ ۳روزه حدود ۱۰٪ و در سنین ۷ و ۲۸ روزه کمتر از ۵٪ است. طبق این تحقیق، روند افت روانی ملات و بتن با کاهش آلومینات بهبود می‌یابد [۲۴].

اردوگان (۲۰۱۳) تأثیر توزیع فاز کلینکر در ذرات سیمان بر خواص خمیر سیمان هیدراته را بررسی نمود. وی تصاویر SEM/اشعه ایکس از سیمان آزمایشگاهی و آزمایش سیمان و بتن را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و در شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر توزیع فضایی فازهای کلینکر در ذرات بر هیدارته شدن و خواص حاصله را استفاده نمود. بر اساس نتایج این تحقیق، مقدار فازها و نرمی سیمان (اختلاف در توزیع دانه‌بندی) تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های خمیر سیمان هیدراته سنین اولیه بتن دارد، اما در سنین بعدی تأثیر کمتری دارد [۲۵]. پراساد و میترا (۲۰۲۲) واکنش‌پذیری سطحی بلورهای آلیت و بلیت سیمان (از طریق یک شبیه‌سازی مبتنی بر اصل پراکندگی اصلاح شده) را برای تشخیص اینکه چرا آلیت در مقایسه با بلیت تحت هیدارته شدن سریع‌تر قرار می‌گیرد، مطالعه نمودند [۲۶]. ژانک و همکاران (۲۰۲۳) چگونگی تأثیر ناخالصی‌های فلز قلیایی بر روی واکنش‌های شیمیایی در طول پخت، مجموعه فاز و ریزساختارها و پایداری حرارتی بلورهای ترنزیت (C_5S_2) تشکیل‌شده در طول سنتز آن را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تشکیل C_5S_2 به طور قابل توجهی با افزودن مواد ناخالص فلز قلیایی به دلیل اثر فازهای مایع قلیایی تسهیل می‌شود [۲۷]. توکلی و طریقت (۲۰۱۶) خواص مکانیکی فازهای کلینکر سیمان پرتلند را با شبیه‌سازی اتمی و به روش دینامیک مولکولی برآورد نمودند. آن‌ها مدول حجیم، مدول برشی، مدول یانگ، نسبت پواسون و خواص تراکم‌پذیری را با استفاده از روابط تئوری الاستیسیته محاسبه کردند. نتایج این محققان نشان داد که استفاده از روش دینامیک مولکولی در تخمین خواص مکانیکی فازهای سیمانی مناسب است [۲۸].

منابع مذکور نشان می‌دهند که فازهای C3S و C3A کلینکر طی فرایند هیدارته شدن بر خواص بتن تازه و سخت شده اثرات مختلفی دارند، اما اطلاعات کافی برای نحوه و میزان تاثیر تغییرات فازهای اصلی سیمان بر بتن‌های آماده صنعتی وجود ندارد. بنابراین هدف از این مطالعه، ارائه نتایج جهت انتخاب سیمان و عملکرد مطلوب آن در بتن می‌باشد. از این‌رو بطور خاص تاثیر تغییرات مقدار فازهای C_3A و C_3S بر مشخصات فنی بتن تازه و سخت شده (برای هر دو نوع بتن بدون افزودنی و با افزودنی) در آزمایش‌های رایج بررسی شد. بدین منظور، سیمان‌های آزمایشگاهی با نرمی (بلین) ثابت ساخته و مخلوطهای بتنی با روانی (اسلامپ) ثابت تهیه شدند. برای تثبیت شرایط سایش کلینکر و ایجاد یکنواختی در دانه‌بندی نمونه‌های سیمان، از یک آسیای آزمایشگاهی استفاده شد.

---

[1] فاز مایع بر اساس یک رابطه و مقادیر اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منیزیم، سدیم و پتاسیم بدست می‌آید. چنانچه مقدار فاز مایع در کلینکر کمتر از ۲۴٪ باشد نشانه بالا بودن درجه حرارت در منطقه پخت بوده و پخت مواد خام به سختی انجام می گردد و برعکس چنانچه سهم فاز مایع در کلینکر بیش از ۲۸٪ باشد پخت مواد کوره به سهولت صورت می‌گیرد. البته در هر دو حالت، اثرات نامطلوبی در تشکیل فازهای کلینکر و مرغوبیت سیمان تولید شده، خواهد داشت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در مرحله اول طی سه ماه، به صورت هفتگی از کلینکر تولیدی در دو کوره کارخانه سیمان تهران نمونه‌گیری شد [۳۰-۲۹]. آنالیز شیمیائی بر روی همه نمونه کلینکرها به روش تر [۳۱] انجام شدند تا از میان این ۲۵ نمونه کلینکر اخذ شده، ۱۱ نمونه انتخاب شد که مقادیر فازهای آن‌ها با هم اختلاف قابل ملاحظه و در محدوده استاندارد سیمان (INSO ۳۸۹) [۳۲] قرار داشتند. یک نمونه گچ (ژیپس) تهیه و آنالیز شیمیائی شد (جدول۲).

جدول ۲- آنالیز شیمیائی گچ مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$CaSO_4$	آب مولکولی
8/1	8/0	2/0	8/31	8/0	5/41	6/70	4/18

جدول ۳ آنالیز شیمیائی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در این مطالعه را نشان داد. بر اساس نتایج حاصله که مقادیر C_3S حدود ۶۱-۵۱٪ و C_3A حدود ۷-۴٪ می‌باشند. این نمونه‌ها در محدوده استاندارد سیمان پرتلند نوع۲ بود و تنوع لازم برای سیمان‌سازی در این مطالعه وجود داشت.

جدول ۳- آنالیز شیمیائی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی

شماره نمونه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	آهک آزاد (٪)
۱	۲۱/۸	۵/۴	۴/۰	۶۳/۸	۵۲	۲۴	۷	۱۲	۰/۴۲
۲	۲۲/۳	۴/۲	۳/۸	۶۳/۷	۵۶	۲۲	۵	۱۲	۰/۸۴
۳	۲۱/۹	۳/۹	۴/۰	۶۳/۹	۶۱	۱۷	۴	۱۲	۰/۴۰
۴	۲۳/۳	۴/۹	۴/۱	۶۳/۳	۴۲	۳۶	۶	۱۳	۰/۷۰
۵	۲۲/۵	۴/۸	۳/۹	۶۳/۹	۵۱	۲۶	۶	۱۲	۰/۳۹
۶	۲۲/۲	۴/۸	۳/۹	۶۳/۴	۵۱	۲۵	۶	۱۲	۰/۵۶
۷	۲۲/۴	۴/۶	۴/۲	۶۳/۱	۵۰	۲۷	۵	۱۳	۱/۰۱
۸	۲۲/۰	۴/۶	۳/۹	۶۴/۲	۵۸	۱۹	۶	۱۲	۰/۴۵
۹	۲۲/۴	۴/۷	۴/۰	۶۳/۵	۵۰	۲۶	۶	۱۲	۰/۴۲
۱۰	۲۲/۴	۵/۰	۴/۵	۶۳/۵	۴۸	۲۸	۶	۱۴	۰/۴۸
۱۱	۲۲/۰	۵/۲	۴/۶	۶۳/۵	۵۰	۲۶	۶	۱۴	۰/۷۰

طی فاز دوم، سیمان‌سازی آزمایشگاهی در شرایط یکسان با استفاده از ۱۱ نمونه کلینکر انجام شد. سیمان‌سازی آزمایشگاهی با ترکیبی از ۹۶٪ کلینکر و ۴٪ گچ با ملاک دستیابی به شاخص بلین ۵۰±۳۰۰۰ سانتی متر مربع بر گرم بود. یک نمونه افزودنی فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر تهیه گردید.

در فاز سوم مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان‌ها (تعیین مانده روی الک‌ها [۳۳]، تعیین نرمی با شاخص بلین [۳۴]، زمان گیرش [۳۵]، غلظت نرمال [۳۷-۳۶] و مقاومت فشاری ملات استاندارد [۳۸]) نمونه‌های سیمان اندازه‌گیری شدند (شکل۱ و جدول۴).

جدول ۵- نتایج آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

بلین (مترمربع بر کیلوگرم)	مانده روی الک (٪)		قوام استاندارد (٪)	زمان گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری ملات استاندارد (مگاپاسکال)			شماره نمونه
	۴۵میکرون	۹۰میکرون		نهائی	اولیه	۲۸روزه	۷روزه	۲رو.زه	
۲۹۵	۱۲/۰	۱/۳	۲۳/۵	۳۱۰	۲۳۰	۴۷/۲	۳۱/۶	۱۸/۰	۱
۳۰۵	۱۱/۴	۱/۳	۲۳/۵	۳۰۰	۲۳۰	۴۳/۰	۲۹/۱	۱۷/۶	۲
۳۰۵	۱۱/۵	۱/۳	۲۴/۰	۳۱۵	۲۴۰	۳۴/۳	۳۰/۳	۱۷/۲	۳
۲۹۵	۱۲/۳	۱/۲	۲۳/۵	۳۱۰	۲۳۰	۴۶/۶	۲۸/۶	۱۳/۲	۴
۲۹۸	۱۳/۶	۱/۸	۲۴/۰	۲۹۰	۲۱۵	۴۹/۲	۳۳/۵	۲۰/۶	۵
۲۹۵	۱۲/۸	۱/۲	۲۳/۵	۳۱۵	۲۴۰	۴۹/۳	۳۲/۱	۱۶/۳	۶
۲۹۹	۱۵/۴	۱/۳	۲۳/۵	۲۹۵	۲۱۵	۴۶/۶	۲۸/۶	۱۴/۶	۷
۲۹۹	۱۰/۲	۰/۹	۲۳/۵	۲۶۵	۱۹۰	۵۱/۴	۳۰/۷	۲۲/۲	۸
۳۰۲	۱۲/۳	۱/۲	۲۳/۵	۳۱۵	۲۴۰	۴۹/۴	۳۰/۸	۱۶/۷	۹
۲۹۵	۱۲/۲	۱/۲	۲۴/۰	۳۲۰	۲۴۰	۵۳/۴	۳۱/۱	۱۵/۰	۱۰
۳۰۲	۱۴/۲	۲/۱	۲۳/۵	۳۲۵	۲۵۰	۴۴/۶	۲۹/۶	۱۶/۹	۱۱

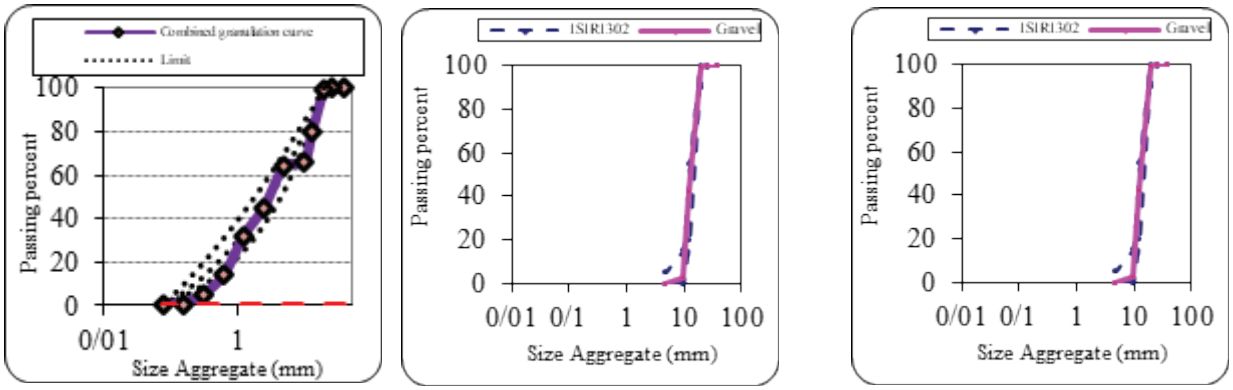
نتایج دانه‌بندی سیمان‌های آزمایشگاهی (آزمایش‌های بلین و مانده روی الک) حاکی از شرایط مشابه سایش کلینکرها بود که قابلیت مقایسه در این مطالعه را معتبر می‌سازد.

شکل ۱ - سیمان‌سازی آزمایشگاهی و تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها

طی فاز چهارم ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان با هدف دستیابی به اسلامپ ۸±۰/۵ سانتی‌متر تهیه گردید [۳۹]، بطوریکه ۱۱ مخلوط بتن آزمایشگاهی فاقد افزودنی و ۱۱ مخلوط با عنوان دارای افزودنی بودند [۴۰]. بدیهی است در روش تهیه مخلوط‌های بتنی با روانی (اسلامپ) ثابت، نسبت w/c متغیر خواهد بود. شکل۲ و جدول۶ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از غرب تهران (منطقه شهریار) می‌باشد.

جدول۶- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)	مدول نرمی (FM)	جذب آب (٪)	وزن مخصوص (SSD)	شکستگی (٪)	عبوری از الک شماره ۲۰۰ (٪)
شن بادامی	۱۹	*	۲/۶	۲/۵۳	۷۹	۰/۱
ماسه طبیعی	۸	۳/۵	۳/۹	۲/۵۴	*	۰/۲



شکل ۲ - نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

در کلیه مخلوطها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمونگرها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر فازهای کلینکر مصرف شده در سیمان مصرفی باشد (شکل۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرحها نیز kg/m^3 ۳۵۰ بود. طراحی مخلوطها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود ۰/۳۵ در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۴۱]. برای تهیه این مخلوط ۶۵٪ ماسه با ۳۵٪ شن درشت استفاده شد (نمودار شکل۵ و جدول ۷). برای همه مخلوطهای بتنی «با افزودنی»، با استفاده از مقدار ۰/۳٪ وزنی سیمان افزودنی فوق‌روان‌کننده و آب موردنیاز، اسلامپ ۱۲±۰/۵ سانتی‌متر حاصل گردید.

جدول ۷- مشخصات کلی طرح‌های مخلوط بتنی

نام مخلوطهای بتن آزمایشگاهی	مقدار افزودنی نسبت به سیمان (٪)	نسبت آب به سیمان (حدودی)	مقدار وزنی در یک مترمکعب بتن (بر حسب کیلوگرم)				
			افزودنی	آب	سیمان	شن (SSD)	ماسه (SSD)
فاقد افزودنی	۰	۰/۵۵	۰	۱۹۲	۳۵۰	۵۹۰	۱۱۲۵
دارای افزودنی	۰/۳	۰/۴۷	۱/۰۲۷	۱۶۶	۳۵۰	۶۱۷	۱۱۶۲

بر روی مخلوطهای بتنی فاقد افزودنی آزمایش‌های تعیین هوای بتن تازه [۴۲]، چگالی [۴۳]، افت اسلامپ طی یک ساعت و مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه [۴۴] صورت گرفت. بر روی مخلوط بتن‌های دارای افزودنی نیز آزمایش‌های تعیین هوای بتن تازه، چگالی، تعیین روند افت اسلامپ طی یک ساعت، تعیین مقدار کاهش درصد هوای بتن تازه (دارای افزودنی فوق‌روان‌کننده و فاقد حباب‌زا) پس از یک ساعت، مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد (شکل۳).

شکل ۳- تهیه مخلوط‌های بتنی و آزمایش‌های مربوطه

۳- نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل

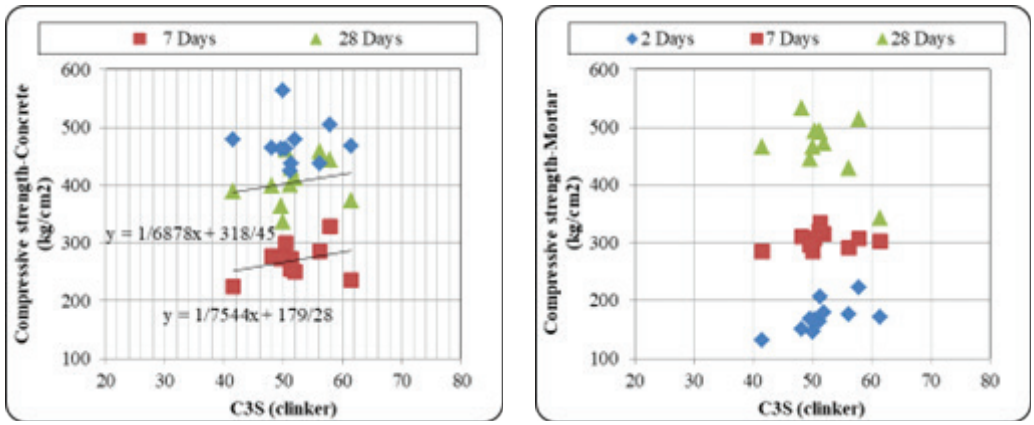
جهت بررسی زمان گیرش، میزان سه کلسیم آلومینات و زمان گیرش اولیه و نهائی مقایسه شد. با توجه به اینکه در این پروژه مقدار گچ مصرفی برای همه سیمان‌سازی‌ها یکسان بود (۴٪)، لذا می‌توان علت تغییرات زمان گیرش صرفا تغییرات فاز C3A دانست. شباهت بسیار زیاد نتایج قوام استاندارد (غلظت نرمال) نمونه سیمان‌ها می‌تواند بر این موضوع اثرگذار باشد.

در گام بعدی نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی (جدول ۸) بررسی می‌شود. هدف از ساخت مخلوط‌های بتنی، دستیابی به روانی (اسلامپ) یکسان بود، بنابراین مقادیر نسبت آب به سیمان در ۲۲ طرح مخلوط متنوع حاصل شد.

جدول ۸- نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های بتنی ساخته شده با سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

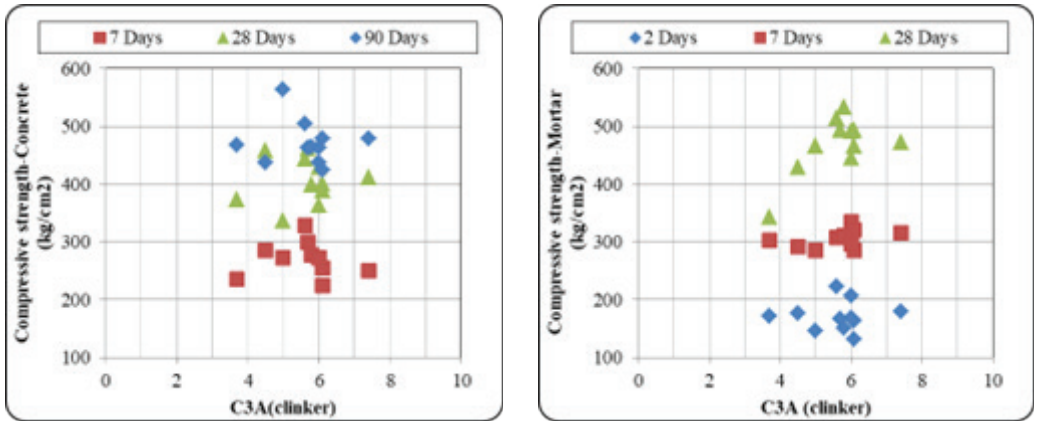
شماره نمونه	مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی فاقد افزودنی				مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی دارای افزودنی			
	بتن تازه		مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		بتن تازه		مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	
	آب به سیمان	اسلامپ (سانتی‌متر)	۹۰روزه	۲۸روزه	۷روزه	آب به سیمان	اسلامپ (سانتی‌متر)	۹۰روزه	۲۸روزه	۷روزه
۱	۸/۰		۳۹/۷	۲۴/۷	۰/۵۵	۱۲/۰	۴۸/۸	۴۱/۱	۲۵/۰	۰/۴۷
۲	۹/۰		۳۹/۲	۲۴/۸	۰/۵۴	۱۲/۰	۴۲/۷	۴۵/۸	۲۸/۶	۰/۴۸
۳	۸/۰		۳۷/۷	۲۱/۹	۰/۵۹	۱۲/۰	۴۳/۳	۳۷/۳	۲۳/۶	۰/۵۴
۴	۸/۰		۳۹/۲	۲۰/۹	۰/۵۶	۱۲/۰	۴۹/۹	۳۸/۹	۲۲/۵	۰/۵۱
۵	۸/۰		۴۴/۰	۲۴/۶	۰/۵۳	۱۲/۰	۵۴/۵	۴۲/۹	۲۷/۲	۰/۴۸
۶	۸/۰		۳۸/۲	۲۳/۹	۰/۵۷	۱۲/۰	۴۹/۰	۴۰/۱	۲۵/۴	۰/۵۲
۷	۸/۰		۴۳/۹	۲۷/۸	۰/۵۴	۱۲/۰	۵۸/۲	۳۳/۶	۲۷/۲	۰/۵۰
۸	۸/۰		۴۲/۸	۲۸/۴	۰/۵۴	۱۲/۰	۴۵/۱	۴۴/۳	۳۲/۸	۰/۴۸
۹	۸/۰		۴۵/۳	۲۷/۴	۰/۵۱	۱۲/۰	۴۹/۶	۴۶/۲	۲۹/۹	۰/۴۶
۱۰	۸/۵		۳۶/۶	۲۵/۱	۰/۵۶	۱۲/۰	۵۰/۰	۳۹/۹	۲۷/۷	۰/۵۱
۱۱	۸/۰		۳۹/۰	۲۷/۱	۰/۵۴	۱۲/۰	۴۷/۰	۳۶/۳	۲۷/۲	۰/۵۰

مقایسه تاثیر مقدار C_3S کلینکر بر مقاومت فشاری ملات استاندارد و بتن نشان داد که با افزایش مقدار C_3S، مقاومت فشاری (ملات و بتن) افزایش دارند (نمودار شکل۴). با توجه به پائین ودن شاخص همبستگی این نتایج، رابطه واضحی نمی‌توان متصور شد. بطور کلی بر اساس رابطه خطی، می‌توان گفت که با افزایش هر یک درصد C_3S کلینکر، حدود ۱/۵ واحد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)، مقاومت ۷ و ۲۸روزه بتن افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش C_3S از حدود ۵۷٪ به بعد، افت مقاومت ملات و بتن دیده می‌شود که می‌توان به تاثیر منفی ازدیاد بیش از حد فاز C_3S اشاره نمود.



شکل ۴- نمودار بررسی ارتباط مقادیر آلیت و مقاومت فشاری ملات استاندارد و بتن در نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

بر اساس نتایج، با افزایش C_3A (تا حدود ۵٪)، افزایش حدودی در مقاومت فشاری (ملات استاندارد و بتن) دیده می‌شود (شکل۵)؛ اما با توجه به همبستگی ضعیف این نتایج، نمی‌توان رابطه دقیقی نوشت.



شکل ۵- نمودار بررسی ارتباط مقادیر سه کلسیم آلومینات و مقاومت فشاری ملات استاندارد و بتن در نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

جدول ۹ نتایج آزمایش‌ها و مشاهدات مخلوط‌های بتن تازه در این مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مندرج در این جدول می‌توان گفت که:

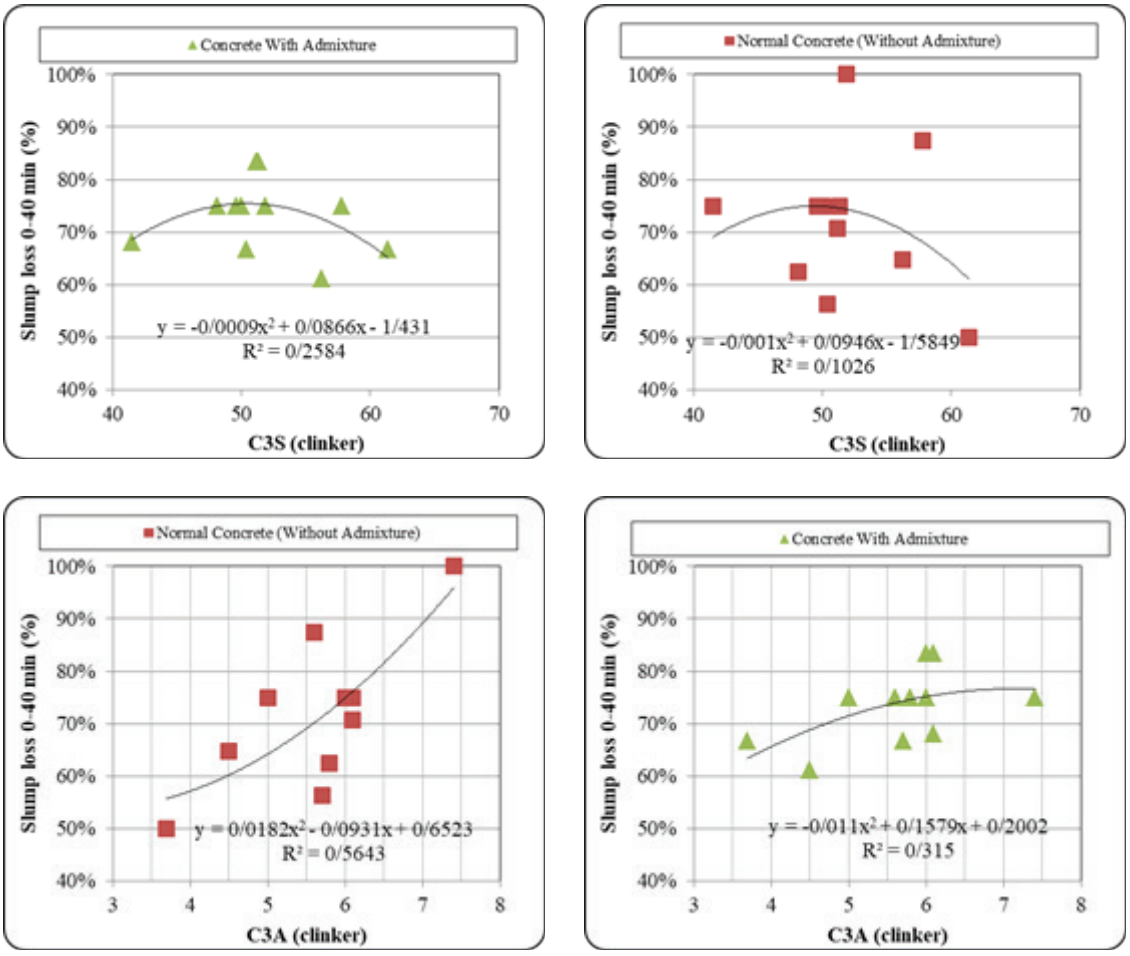
- با کاهش C_3A، مشخصات بتن تازه (روند افت اسلامپ و درصد هوای بتن) اندکی بهبود می‌یابد که این موضوع می‌تواند به گونه‌ای با آب‌خواهی بتن در سیمان دارای سه کلسیم آلومینات بیشتر ارتباط داشته باشد (تولیدکنندگان سنتی بتن که برای دستیابی به کارائی

مطلوب و اسلامپ مدنظر، آب به بتن اضافه می‌کنند، افزایش w/c و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن را مشاهده می‌نمایند)؛

- با کاهش C_3S نیز مشخصات بتن تازه اندکی بهتر می‌شود (توضیحات بند قبل در این مورد نیز مصداق دارد)؛
- در مخلوطهای بتنی دارای افزودنی در مقایسه با مخلوطهای بتنی فاقد افزودنی، مصرف افزودنی اندک تاثیر منفی بر روی مشخصات بتن تازه (روند افت اسلامپ و درصد هوا) نشان داده است.
- در مجموع مقایسه تاثیر مقدار C_3S کلینکر بر شاخص‌های بتن تازه نشان داد که با افزایش مقدار C_3S تا حدود ۵۵٪ روند افت اسلامپ بتن بهبود می‌یابد، لیکن با ازدیاد این فاز اثرات منفی بر روی دو پارامتر مذکور دیده می‌شود (نمودار شکل۶).
- این مقایسه برای پارامتر C_3A نشان داد که همواره با افزایش C_3A ، روند افت اسلامپ افزایش می‌یابد که مطلوب نیست.

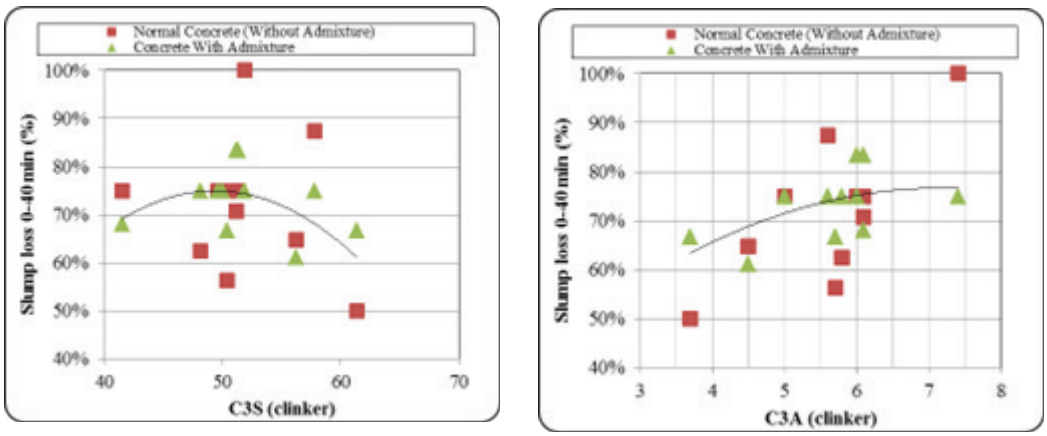
جدول۹- نتایج آزمایش‌های مخلوطهای بتنی ساخته شده با سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

مخلوطهای بتن آزمایشگاهی دارای افزودنی								مخلوطهای بتن آزمایشگاهی فاقد افزودنی								شماره نمونه
هوای بتن تازه (٪)					اسلامپ (سانتی‌متر)		چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب	هوای بتن تازه (٪)	اسلامپ (سانتی‌متر)					چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		
۳۰ دقیقه	۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۰ دقیقه			۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۰ دقیقه			
۱/۵	۱/۲	۳/۰	۳/۰	۶/۵	۱۲/۰		۲/۳۳	۱/۰	۰/۰	۰/۰	۶/۵		۸/۵	۲/۳۳		۱
۱/۵	۱/۰	۰/۰	۳/۵	۵/۵	۱۲/۰		۲/۲۰	۱/۴	۱/۰	۳/۰	۷/۰		۸/۵	۲/۲۸		۲
۱/۵	۱/۲	۱/۰	۴/۰	۸/۵	۱۲/۰		۲/۳۰	۱/۲	۲/۰	۴/۰	۶/۰		۸/۰	۲/۲۵		۳
۱/۴	۱/۲	۲/۰	۴/۰	۸/۰	۱۲/۰		۲/۳۰	۱/۴	۱/۰	۲/۰	۴/۰		۸/۰	۲/۲۳		۴
۱/۵	۱/۴	۱/۰	۲/۰	۴/۰	۱۲/۰		۲/۲۸	۱/۲	۰/۰	۲/۰	۴/۵		۸/۰	۲/۳۸		۵
۱/۵	۱/۲	۰/۵	۲/۰	۴/۵	۱۲/۰		۲/۲۳	۱/۳	۱/۰	۲/۵	۴/۵		۸/۵	۲/۳۰		۶
۱/۵	۱/۴	۱/۰	۳/۰	۷/۵	۱۲/۰		۲/۳۰	۱/۳	۱/۰	۲/۰	۴/۵		۸/۰	۲/۴۰		۷
۱/۴	۱/۴	۱/۰	۳/۰	۶/۰	۱۲/۰		۲/۲۳	۱/۴	۰/۰	۱/۰	۳/۵		۸/۰	۲/۲۸		۸
۱/۴	۱/۶	۱/۵	۴/۰	۷/۰	۱۲/۰		۲/۴۰	۱/۳	۱/۰	۳/۵	۶/۰		۸/۰	۲/۲۸		۹
۱/۴	۱/۵	۱/۰	۳/۰	۶/۰	۱۲/۰		۲/۲۸	۱/۵	۱/۰	۳/۰	۶/۰		۸/۰	۲/۳۵		۱۰
۱/۴	۱/۳	۱/۵	۳/۰	۷/۰	۱۲/۰		۲/۱۸	۱/۴	۱/۰	۲/۰	۴/۵		۸/۰	۲/۲۸		۱۱

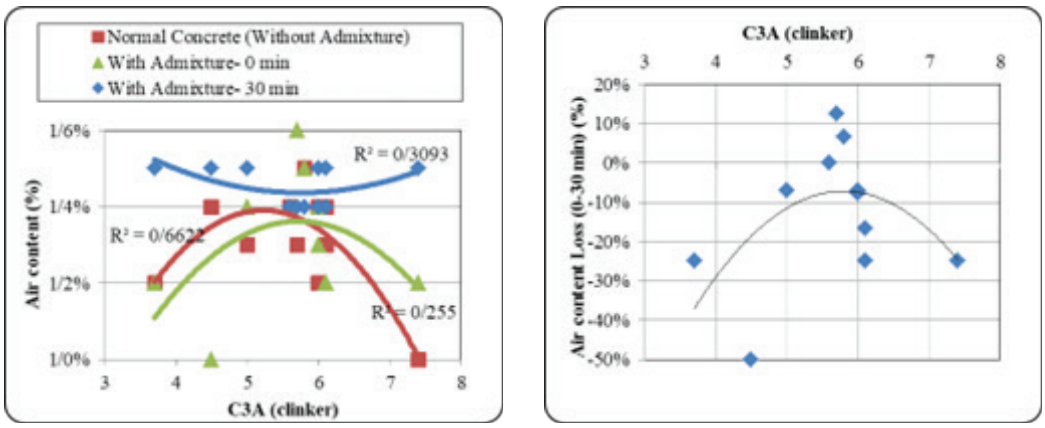


شکل ۶- نمودار بررسی ارتباط مقادیر آلیت، سه کلسیم آلومینات و افت اسلامپ مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی

مقایسه تاثیر مقدار C_3A کلینکر بر مقدار هوای بتن تازه نشان داد که با افزایش مقدار این فاز، هوازائی تقریبا افزایش دارد. مصرف افزودنی باعث هوازائی بتن شده که روند واضحی را نشان نداد. بر اساس نتایج آزمایش‌های تعیین هوای مخلوط‌های بتن تازه حاوی افزودنی و روند افت آن و روند افت اسلامپ در این مطالعه مشخص گردید که مقدار C_3A ۶-۵٪ مناسب بود (اشکال ۷ و ۸).



شکل ۷- نمودار بررسی ارتباط مقادیر آلیت، سه کلسیم آلومینات و افت اسلامپ مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی



شکل ۸- نمودار بررسی ارتباط مقادیر سه کلسیم آلومینات و افت مقدار درصد هوای بتن طی نیم ساعت برای مخلوط‌های بتن حاوی افزودنی

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پروژه تاثیر مقدار فازهای کلینکر بر مشخصات فنی سیمان و بتن بصورت زیر است:

۱-با افزایش مقدار C_3S، مقاومت فشاری ۲، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه (ملات استاندارد و بتن) افزایش دارند. با توجه به شاخص همبستگی این نتایج، رابطه واضحی دیده نشد. با افزایش C_3S به بیش از ۵۷٪، افت مقاومت ملات و بتن به وضوح دیده شد؛

۲-در مخلوط‌های بتنی، با افزایش C_3S به بیش از ۵۵٪، نسبت آب به سیمان نیز کاملا افزایش نشان داد که موجب افت مقاومت شد؛

۳- با افزایش مقدار C_3A (تا حدود ۵٪)، مقاومت فشاری (ملات و بتن) افزایش واضحی نشان داد؛

۴- با افزایش مقدار C_3S تا حدود ۵۵٪ روند افت اسلامپ، درصد هوا و چگالی بتن بهبود نشان داد؛

۵-با افزایش مقدار فاز C_3A هوازائی تقریبا افزایش دارد. نتایج آزمایش‌های تعیین هوای مخلوط‌های بتن تازه حاوی افزودنی و روند افت آن در این مطالعه مشخص گردید که مقدار C_3A حدود ۶-۵٪ مناسب می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم شرکت سیمان تهران بابت همکاری‌های صورت گرفته بسیار سپاسگذاریم. از شرکت‌های البرز شیمی و نوین رضی آباد بابت تامین مواد اولیه این پروژه متشکریم.

منابع

[1] Herfort D &. Macphee D. (2019). Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition). Pages 57-86

[2] Lind M Hills. (2007). "Clinker, Microstructure and Grind ability".

[3] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". Prentice Hall.

[4] Nuhu S. & Ladan S. & Muhamad A. (2020). "Effects and Control of Chemical Composition of Clinker for Cement Production". October 2020International Journal of Control Science and Engineering 10(1) (15-10-2020):16-21.

[5] D. N. Ghosh (1992), "concrete and science technology & Cement private limited".

[6] Memarian, H. (2009). "Engineering Geology and Geotechnics". University of Tehran Press.

[7] Kafash A. (2019). "A case study of the relationship between medium and long term strength of concrete to helping strength of buildings". 10th National Concrete Conference, 15 and 16 October 1397, Tehran.

[8] Bokaeeian M (1998). "Cement Engineering Handbook, Refractory Materials and Building Materials". Publications of Abyek Cement Industrial Complex Manpower Training Center.

[9] J.TALABER (1981). "FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF CEMENT". Periodical Polytechnic Civil Engineering, 26(1-2), pp. 27-39, 1982.

[10] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". Prentice Hall.

[11] I. Odler (1991)." Strength of cement". Materials and striations, 24, 143-157.

[12] Duda, W. (1977) "cement data book".

[13] Mehta, K. & Menterio, (2006). "Concrete Microstructure, Properties, and Materials".

[14] Tadayon A. &, Golbahari, A. & Ahmadi, Z. (1394). "Handbook of new and special cements". Naghous Publications.

[15] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". Prentice Hall

[16] H. Taylor, "Cement Chemistry". 2th Edition, Thomas Telford Publication, London, 1998.

[17] S. Peukert, „Cementy powszechnego użytku i specjalne", Polski Cement, 2000.

[18] Walter H. Duda. (1984). "Cement data book-volume II". Third edition, p256.

[19] Tadayon, M. &. Rahmati, A. & Salami, E. "The relationship between concrete strength at different ages with different cements, 8th National Concrete Conference of Iran, Tehran, October 6 and 7, 2016.

[20] Tadayon. M. & Rahmati A. & Salami, E. & Pirhadi, B & .Salimi Moghaddam F. & Malikshahi I. "The role of the main compounds (phases) of cement on the initial and long-term strength of concrete". 15th National Concrete Day Conference and 9th Iran Concrete Conference, Tehran, October 6 and 7, 2016.

[21] Rahmati A.& Salami, E. "The relationship between the growth rate of mortar and concrete strength of 425-1 and 2 type cements with three calcium silicates (C3S) - Part 1" Cement Technology Monthly, 100 consecutive (December 2016), p. 11

[22] Rahmati A. & Salami, E. "The relationship between the growth rate of mortar and concrete strength of type 425-1 and 2 cements with C3S (Part 2)" Cement Technology Monthly, 101 (December 2016), p.113.

[23] Rabiee M. &, Moztarzadeh F. &, Solati Hashjin M. & Hesaraki Saeed. (2007). "Effect of liquid phase concentration on setting time and compressive strength of hydroxyapatite bone cement". Journal of Biomedical Engineering, Summer 2007, Volume 1, Number 2, Pages 110-105.

[24]-Ali Mardani Aghabaglou & Burak Felekoğl & Kambiz Ramyar. (2017). "Effect of Cement C3A Content on Properties of Cementitious Systems Containing High-Range Water-Reducing Admixture". Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 29 Issue 8 - August 2017

[25] Sinan T.Erdoğan (2013). "Effect of clinker phase distribution within cement particles on properties of a hydrating cements paste". Construction and Building Materials, Volume 38, January 2013, Pages 941-949.

[26] Dipak Prasad, Nilanjan Mitra. (2022) "Surface Reactivity of Cementitious Crystals Alite and

Belite". The Journal of Physical Chemistry C 2022, 126 (27), 11265-11276.

[27] Lei Liu, Wensheng Zhang, Xuehong Ren, Jiayuan Ye, Jiangtao Zhang, Zhongtao Luo, Jueshi Qian. Sintering behaviour and structure-thermal stability relationships of alkali-doped ternesite. Cement and Concrete Research 2023, 164, 107043.

[28] Tavakoli D. & Tarighat A. (2016). "Molecular dynamics study on the mechanical properties of Portland cement clinker phases". Computational Materials Science, Volume 119, 15 June 2016, Pages 65-73

[29] INSO 11267 (2016). "Aggregate- Sampling aggregates- Code of practice" Institute of Standards and Industrial Research.

[30] INSO 7146 (2018). "F Aggregate-Reducing samples of aggregate to testing size -Code of practice" Institute of Standards and Industrial Research.

[31] INSO 1692 (1992). "Hydraulic cements - chemical test methods - measurement of main elements" Institute of Standards and Industrial Research.

[32] INSO 389 (2019). "Portland Cement-Properties". National Standard Organization of Iran

[33] INSO 18807-6 (2013). "Methods of testing Cement - Part 6: Determination of fineness" Institute of Standards and Industrial Research.

[34] INSO 390 (2009). "Cement- Determination of the fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus-Test methods" Institute of Standards and Industrial Research.

[35] INSO 18807-3 (2013). "Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness (expansion) by Le Chatelier method" Institute of Standards and Industrial Research.

[36] INSO 392 (2021). "Cement — Determination the time of setting of hydraulic cement by Vicat needle- Test method" Institute of Standards and Industrial Research.

[37] INSO 11895 (2009). "Cement- Determination of the normal consistency of hydraulic cement - Test Method" Institute of Standards and Industrial Research.

[38] INSO 18807-1 (2013). "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength" Institute of Standards and Industrial Research.

[39] INSO 3203-2 (2008). "Fresh concrete –Part 2: Determining the consistency by the slump – Test method" Institute of Standards and Industrial Research.

[40] INSO 581 (2013). "Concrete – Making and curing concrete test specimens in the laboratory – Code of Practice" Institute of Standards and Industrial Research.

[41] "Guide to the National Method of Concrete Mixing Design", Building and Housing Research Center, p33.

[42] INSO 15904 (2017). "Fresh concrete- Determination of air content of freshly mixed concrete by the pressure method- Test method" Institute of Standards and Industrial Research.

[43] INSO 3203-6 (2018). "Fresh concrete – Part 6: Density –Test method" Institute of Standards and Industrial Research.

[44] INSO 1608-3 (2015). "Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens-Test Method" Institute of Standards and Industrial Research.