

نقش ترکیبات اصلی (فازهای) سیمان بر مقاومت اولیه و دراز مدت

محسن تدین^۱، علیرضا رحمتی^۲، الهام سلامی^{۳*}، بهمن پیرهادی^۴
فاطمه سلیمی مقدم^۵، ایمان ملکشاهی^۶

- ۱- هیات مدیره انجمن بتن ایران و مهندسی مشاور سیناب غرب
- ۲- مدیر آزمایشگاه پاکدشت بتن (آزمایشگاه مرجع سازمان ملی استاندارد)
- ۳- مسئول فنی آزمایشگاه پاکدشت بتن
- ۴- کارشناس آزمایشگاه پاکدشت بتن
- ۵- کارشناس آزمایشگاه پاکدشت بتن
- ۶- کارشناس آزمایشگاه پاکدشت بتن

*Pakdashtbetonlab@yahoo.com

چکیده:

عملکرد سیمان به عنوان یکی از اجزای اصلی فرآورده بتن همواره مورد توجه بوده است و با توسعه روزافزون صنعت سیمان ایران از نظر کمیت در زمینه تولید انواع سیمان، کنترل کیفیت سیمان با بررسی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بسیار مهم است. ولی توجه به این نکته ضروری است که صرف انطباق سیمان با الزامات استانداردهای ملی، لزوماً نمی توان به فرآورده نهایی منطبق با مشخصات مورد انتظار دست یافت، زیرا استانداردها برای بسیاری از مشخصات سیمان که بر ویژگی های بتن تاثیر گذار هستند یا دامنه های گسترده ای را مورد قبول دانسته اند و یا محدودیتی الزام نکرده اند و مورد بررسی قرار نداده اند.

سیمان پرتلند را نمی توان توسط یک فرمول شیمیایی بیان نمود، زیرا یک مخلوط پیچیده از چهار ترکیب اصلی و تعدادی ترکیبات فرعی است. چهار ترکیب اصلی با عناوین سه کلسیم سیلیکات (C_3S)، دو کلسیم سیلیکات (C_2S)، سه کلسیم آلومینات (C_3A) و چهار کلسیم آلومینو فریت (C_4AF) وجود دارد که از آنالیز اکسیدی سیمان پرتلند محاسبه می گردند. این ترکیبات یا فازها از نظر شیمیایی حقیقی نیستند ولی نسبت های مربوط به آن ها اطلاعات با ارزشی را برای پیش بینی خواص سیمان فراهم می سازد. توسعه مقاومت سیمان اساساً بستگی به مقادیر C_3S و C_2S دارد [1].

در این تحقیق با انتخاب سیمان نوع ۱ و ۵۰۲ به عنوان پر مصرف ترین سیمان های کشور و انجام آزمایشات شیمیایی و فیزیکی مطابق استاندارد ملی ۳۸۹ ایران در آزمایشگاه پاکدشت بتن به عنوان آزمایشگاه مرجع سازمان ملی استاندارد، بعد از محاسبه فازهای اصلی سیمان سعی در بررسی اثر گذاری مقادیر فازهای اصلی بر روند کسب مقاومت ملات استاندارد داشته ایم.

کلمات کلیدی: سیمان پرتلند، ترکیبات سیمان، ملات استاندارد سیمان، فازهای سیمان

۱- مقدمه

بررسی کیفیت سیمان ها از دیدگاه فازهای مهم مقاومتی آنها همواره مورد توجه محققین بوده است. در سالهای اخیر کارخانجات سیمان در ایران بدلائیل مختلف بعضا اقدام به تولید سیمان هایی با مقادیر زیاد تر فاز تری کلسیم سیلیکات با هدف افزایش مقاومت فشاری کوتاه مدت و یا دراز مدت نموده اند. یک قاعده تقریبی متعارف آن است که فرض شود فاز C_3S بیشترین سهم را در رشد مقاومت، در خلال چهار هفته اول دارد و از چهار هفته به بعد فاز C_2S در کسب مقاومت تاثیر دارد [4]. در اینجا اقدام به بررسی سیمان های مختلف از این دیدگاه شده است و این رویکرد در مقاومت کوتاه مدت (۷ و ۳ روزه) و دراز مدت (۲۸ روزه) مورد بررسی قرار گرفته است و با آنالیز شیمیایی کامل تعدادی نمونه سیمان از نوع ۵۰ و ۲۰۱ مقادیر فازها پرورش بوگ محاسبه شده و در ضمن مقایسه با تحقیقات مشابه در آمریکا، اقدام به بررسی رابطه میزان مقاومت فشاری و همچنین روند رشد مقاومت فشاری با ترکیبات شیمیایی سیمانها خصوصا فاز های مقاومتی شده است.

۲- انواع سیمان

تا آنجا که به بتن ارتباط دارد، مواد سیمانی همیشه حاوی سیمان پرتلند از انواع سنتی آن می باشد (یعنی سیمان پرتلند خالص) بنابراین وقتی مواد دیگری مصرف می شوند، امکان دارد که به مجموعه مواد سیمانی به کار رفته نام سیمان های مرکب پرتلند را اطلاق نمود. این عبارت و همچنین عبارت سیمان های پرتلند آمیخته منطقی به نظر می رسد. [2]

استانداردهای سیمان در دنیا به طور کلی در اصول مشابه یکدیگرند، ولی در جزئیات فرعی با یکدیگر متفاوتند. انواع اصلی سیمان در آمریکا در استاندارد ویژگی های سیمان پرتلند با عنوان ASTM C150 و AASHTO M85 مشخص شده است. یکسان نمودن استانداردها در اتحادیه اروپا که شامل برخی دیگر از کشورهای اروپایی نیز می گردد، منجر به انتشار اولین استاندارد مشترک مربوط به سیمان توسط کمیته اروپایی استانداردها به صورت ENV197-1:1992 "سیمان-ترکیبات، ویژگی ها و ضوابط پذیرش: بخش اول: سیمان های معمولی" گردیده است. [2]

استاندارد مذکور پس از ویرایش های متعدد، در حال حاضر با عنوان EN 197-1:2011 در اروپا معتبر و جاری است. در سال ۱۳۹۳ این استاندارد در سازمان ملی استاندارد ایران با عنوان INSO 17518-1 ترجمه و تدوین شده است که در آن ترکیبات، ویژگی ها و معیارهای انطباق ۳۵ نوع سیمان معمولی مورد مصرف در ساخت و ساز مشخص شده است.

در ایران مطابق استاندارد ملی ۳۸۹، سیمان پرتلند مشتمل بر ۵ نوع به شرح ذیل است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها ارائه می شود: [3]

- سیمان پرتلند نوع یک با نشانه "پ-۱": به عنوان سیمان پرتلند معمولی برای مصارف عمومی در ساخت ملات یا بتن به کار می رود.
- سیمان پرتلند نوع دو با نشانه "پ-۲": به عنوان سیمان پرتلند اصلاح شده مصرف ویژه آن در ساخت بتن هائی است که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفات ها به آنها در حد متوسط باشد.
- سیمان پرتلند نوع سه "پ-۳": به عنوان سیمان پرتلند با مقاومت اولیه زیاد در شرایطی که مقاومت اولیه زیاد مورد نظر باشد به کار می رود.
- سیمان پرتلند نوع چهارم "پ-۴": به عنوان سیمان پرتلند با حرارت کم در شرایطی که حرارت هیدراتاسیون کم بتن مورد نظر باشد به کار می رود.
- سیمان پرتلند نوع پنج "پ-۵": به عنوان سیمان پرتلند ضد سولفات در شرایطی که مقاومت زیاد بتن در برابر سولفات ها مورد نظر باشد به کار می رود.

نهمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران-تهران-۱۵ مهر ۱۳۹۶

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی انواع سیمان پرتلند مطابق استاندارد ملی ۳۸۹ ایران

نوع سیمان							ویژگی ها	
۵	۴	۳	۲	۱-۵۲۵	۱-۴۲۵	۱-۳۲۵		
۲۸۰۰							نرمی - سطح مخصوص (cm ² /gr)-حداقل	
۰/۸							انبساط- آزمایش اتوکلاو- (%) -حداکثر	
۴۵							زمان گیرش - ابتدائی (min)-حداقل	
۶							نهایی (hr)-حداکثر	
-	-	۱۲۵	-	-	-	-	یک روزه-حداقل	
-	-	-	-	۲۰۰	۱۰۰	-	دو روزه-حداقل	
۸۵	-	۲۱۰	۱۰۰	-	-	۱۲۰	سه روزه-حداقل	
۱۵۰	۷۰	-	۱۷۵	-	-	۲۰۰	هفت روزه-حداقل	
۲۷۰	۱۸۰	-	۳۱۵	۵۲۵	۴۲۵	۳۲۵	حداقل	مقاومت فشاری- (kg/cm ²) بیست و هشت روزه
-	-	-	-	-	۶۲۵	۵۲۵	حداکثر	

جدول ۲- ویژگی های شیمیایی انواع سیمان پرتلند مطابق استاندارد ملی ۳۸۹ ایران

نوع سیمان					ویژگی ها	
۵	۴	۳	۲	۱ ^۱		
-	-	-	حداقل ۲۰/۰۰	-	اکسید سیلیسیم-SiO ₂ (%)	
-	-	-	حداکثر ۶/۰۰	-	اکسید آلومینیوم Al ₂ O ₃ (%)	
-	حداکثر ۶/۵۰	-	حداکثر ۶/۰۰	-	اکسید آهن Fe ₂ O ₃ (%)	
-	-	-	-	-	اکسید کلسیم-CaO (%)	
حداکثر ۵/۰۰					اکسید منیزیم-MgO (%)	
حداکثر ۲/۳۰	حداکثر ۲/۳۰	حداکثر ۳/۵۰	حداکثر ۳/۰۰	حداکثر ۳/۰۰	C ₃ A ≤ 8	تری اکسید گوگرد-SO ₃ (%)
-	-	حداکثر ۴/۵۰	-	حداکثر ۳/۵۰	C ₃ A > 8	
حداکثر ۳/۰۰	حداکثر ۲/۵۰	حداکثر ۳/۰۰	حداکثر ۳/۰۰	حداکثر ۳/۰۰	کسر وزن در اثر سرخ شدن Loss On Ignition (%)	
حداکثر ۰/۷۵	حداکثر ۰/۷۵	حداکثر ۰/۷۵	حداکثر ۰/۷۵	حداکثر ۰/۷۵	باقیمانده نامحلول در اسید Insoluble Residue (%)	
-	-	-	-	-	کلسیم اکسید آزاد Free CaO (%)	
حداکثر ۵/۰۰	حداکثر ۷/۰۰	حداکثر ۱۵/۰۰	حداکثر ۸/۰۰	-	سه کلسیم آلومینات C ₃ A (%)	
-	حداکثر ۴۰/۰۰	-	-	-	دو کلسیم سیلیکات C ₂ S (%)	
-	حداکثر ۳۵/۰۰	-	-	-	سه کلسیم سیلیکات C ₃ S (%)	
-	-	-	-	-	چهار کلسیم آلومینوفریٹ (C ₄ AF) (%)	
حداکثر ۲۵/۰۰ ^۲	-	-	-	-	C ₂ F+C ₄ AF یا C ₄ AF + 2 C ₃ A (%)	

۱- محدودیت های ذکر شده برای سیمان نوع ۱ برای هر سه رده مقاومت ۳۲۵، ۴۲۵، ۵۲۵-۱ الزامی می باشد.

۲- چنانچه محدودیت انبساط سولفات رعایت شود، این محدودیت در نظر گرفته نمی شود.

در تعاریف موجود از سیمان های نوع ۱ و ۲ و ۵ عمدتاً به تفاوت در گرمایابی، گیرش، روند کسب مقاومت، مقاومت ۲۸ روزه و مقاومت در برابر سولفات اشاره شده است که مبنای استفاده جامعه مهندسی از این سیمان ها در کاربری های مختلف می باشد.

۳- مقاومت سیمان

مقاومت ملات یا بتن به چسبانندگی خمیر سیمان، چسبندگی سیمان به سنگدانه ها و تا حدی به مقاومت خود سنگدانه ها بستگی دارد. در این مرحله، عامل اخیر مورد بررسی قرار نمی گیرد و از طریق مصرف سنگدانه های استاندارد شده، اثر این عامل بر مقاومت فشاری سیمان ثابت نگاه داشته می شود. [2]

مقاومت فشاری تحت تاثیر نوع سیمان یا به مفعوم دقیق تر ترکیب و نرمی سیمان قرار دارد C595 , ASTM C150 تنها حداقل مقاومت را تعیین می کند. بیشتر تولید کنندگان به آسانی از حداقل مقاومت مشخص شده در مشخصات فنی سیمان فراتر می روند. بنابراین، نباید چنین فرض کرد که بدون انجام تغییراتی در نسبت های مخلوط، از دو نوع سیمانی که حداقل الزامات یکسانی را برآورده می سازند، ملات و بتنی با مقاومت یکسان ساخته می شود. در استاندارد ASTM C1157 هر دو مقاومت حداقل و حداکثر مطرح شده است. [4]

به طور کلی به دلیل عوامل بسیار زیاد مربوط به خصوصیات سنگدانه ها، مخلوط های بتن، فرآیند ساخت و شرایط محیطی موجود در محل کار، از مقاومت سیمان (بر اساس آزمایش بر روی مکعب ملات) نمی توان برای پیش بینی دقیق مقاومت بتن استفاده کرد. [4] یکی از این دلایل، تفاوت در نسبت آب به سیمان می باشد.

تمامی اطلاعات و نمودارهای موجود در منابع مورد استفاده در این تحقیق و هم چنین در دسترس تولید کنندگان، طراحان، محققین و دانشجویان صنعت سیمان و بتن مربوط به قبل از سال ۲۰۰۰ است و این در صورتی است که استانداردهای مربوط به موارد مذکور حداقل هر دهه ویرایش می شوند.

۴- ارتباط آهنگ رشد مقاومت ملات سیمان با سه کلسیم سیلیکات (C₃S)

مواد خام مصرفی در تولید سیمان پرتلند عمدتاً از سنگ آهک، سیلیس، آلومین و اکسید آهن تشکیل شده اند. در داخل کوره این ترکیبات با یکدیگر واکنش حاصل نموده، تشکیل یک سری ترکیبات پیچیده تری می دهند، به استثنای مقدار کمی از آهک ترکیب نشده ای که زمان کافی برای واکنش نداشته است و باقی می ماند، مواد به حالت تعادل شیمیایی می رسند. [4]

از اصطلاح «فاز» نیز می توان برای تشریح «ترکیب های کلینکر» استفاده کرد. معمولاً چهار ترکیب را به عنوان ترکیبات عمده و اصلی تشکیل دهنده سیمان در نظر می گیرند. این ترکیبات در جدول زیر همراه با علائم اختصاری که شیمی دانان سیمان به کار می برند، بیان می شود و هر اکسید را به وسیله یک حرف نشان می دهند، یعنی $CaO=C, SiO_2=S, Al_2O_3=A, Fe_2O_3=F$ ، به همین صورت H_2O در سیمان هیدراته را به صورت H و SO_3 را با S نشان می دهند.

علامت اختصاری	ترکیب اکسیدی	نام ترکیب
C ₃ S	3CaO.SiO ₂	سه کلسیم سیلیکات
C ₂ S	2CaO.SiO ₂	دو کلسیم سیلیکات
C ₃ A	4CaO.Al ₂ O ₃	سه کلسیم آلومینات
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	تترا کلسیم آلومینات فریت

جدول ۳- ترکیبات اصلی سیمان پرتلند

محاسبات ترکیبات بالقوه سیمان پرتلند بر اساس تجربیات R.H.Bogue و دیگران استوار است و اغلب به عنوان «ترکیبات Bogue» نامیده می‌شود. روابط Bogue جهت تعیین درصد ترکیبات اصلی در سیمان به صورت زیر است و علائم داخل پرانتز معرف اکسیدهای به دست آمده در کل جرم سیمان می‌باشند. [2]

$$C_3S = 4.07 \times (CaO) - 7.6 \times (Si_2O) - 6.72 \times (Al_2O_3) - 1.43 \times (Fe_2O_3) - 2.85 (SO_3)$$

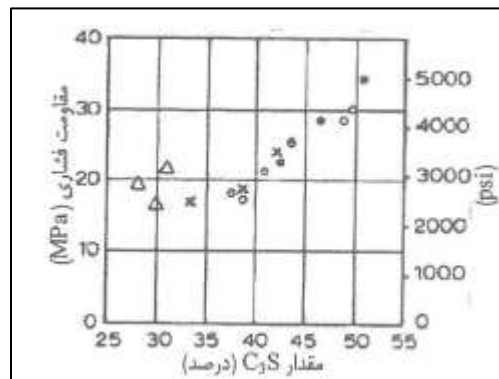
$$C_2S = 2.867 \times (SiO_2) - 0.7544 \times (C_3S)$$

$$C_3A = 2.650 \times (Al_2O_3) - 1.692 \times (Fe_2O_3)$$

$$C_3AF = 3.043 \times (Fe_2O_3)$$

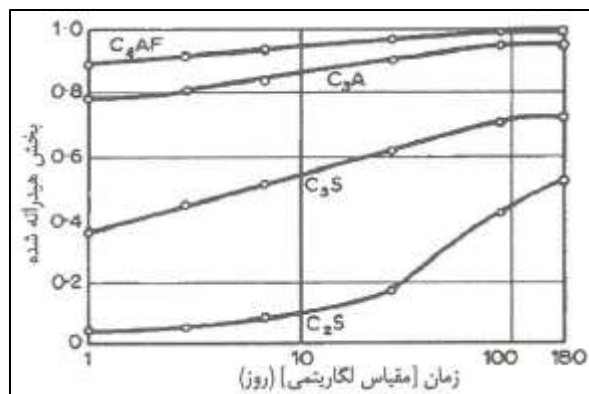
روش‌های دیگری نیز برای محاسبه این ترکیبات وجود دارد. البته باید در نظر گرفت که ترکیبات Bogue میزان C₃S را بیشتر از مقدار واقعی آن‌ها تخمین می‌زند، زیرا اکسیدهای دیگری جانشین بخشی از CaO در C₃S می‌شود و همان‌طور که قبلاً بیان شد C₃S و C₂S خالص به لحاظ شیمیایی در کلینکر سیمان پرتلند وجود ندارد. [2]

عمدتاً افزایش مقدار C₃S سبب ازدیاد مقاومت تا ۲۸ روز می‌گردد، شکل زیر نمایانگر مقاومت ۷ روزه ملات استاندارد حاوی سیمان‌هایی با ترکیبات متفاوت است که در کارخانه‌های مختلف تولید شده‌اند. [2]



شکل ۱- رابطه بین مقاومت ۷ روزه خمیر سیمان و مقدار C₃S در سیمان (هر نقطه معرف سیمان یک کارخانه می‌باشد)

همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، آهنگ هیدراته شدن C₃S و C₂S در حالت خالص به نحو چشم‌گیری با یکدیگر متفاوتند. [2]



شکل ۲- آهنگ هیدراته شدن ترکیبات خالص

تری کلسیم سیلیکات C_3S , به سرعت هیدراته شده و سخت می شود و عامل اصلی گیرش و مقاومت اولیه قبل از ۲۸ روز است.

۵- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی نقش ترکیبات اصلی سیمان بر مقاومت در آزمایشگاه پاکدشت بتن به عنوان آزمایشگاه مرجع سازمان ملی استاندارد، اقدامات زیر طراحی و صورت گرفته است:

تعداد ۴۴ نمونه سیمان نوع ۱-۴۲۵ محصول ۲۰ کارخانه، ۳۸ نمونه سیمان نوع ۲ محصول ۱۳ کارخانه و ۴۴ نمونه سیمان نوع ۵ محصول ۱۲ کارخانه بعنوان پرمصرف ترین سیمان های کشور ایران در فواصل زمانی متفاوت تهیه شد و جهت پیشبرد اهداف این تحقیق برای تمامی نمونه ها آزمایشات زیر بر اساس استانداردهای ملی برنامه ریزی و اجرا گردید:

➤ ساخت ملات های منشوری جهت آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷،۳ و ۲۸ روزه مطابق استاندارد ملی ۳۹۳

➤ انجام آزمایشات شیمیایی جهت محاسبه فاز C_3S بر اساس روابط Bogue مطابق استاندارد ملی ۱۶۹۲

لازم به ذکر است تمامی نمونه های سیمان دارای پروانه کاربرد استاندارد بودند. تمامی آزمایشات در آزمایشگاه پاکدشت بتن به عنوان آزمایشگاه همکار سازمان ملی استاندارد که دارای گواهینامه ISO/IEC 17025 می باشد انجام شده است.

پس از انجام آزمایشات مشخص گردید تنها ۲۶ نمونه سیمان نوع ۱-۴۲۵ محصول ۱۴ کارخانه، ۲۲ نمونه سیمان نوع ۲ محصول ۹ کارخانه و ۳۲ نمونه سیمان نوع ۵ محصول ۱۲ کارخانه با الزامات استاندارد ملی ایران مطابقت دارند

۱-۶- آزمایشات شیمیایی و فیزیکی نمونه های سیمان

جهت ساخت ملات های منشوری ملات سیمان مطابق استاندارد ملی ۳۹۳، از ماسه مرجع مطابق الزامات استانداردهای ISIRI EN196-1 3040, ISO 679 استفاده شده است که مشخصات آن در جداول زیر گزارش شده است:

نهمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهر ۱۳۹۶

- ✓ آزمایشات شیمیایی به منظور تعیین عناصر اصلی و محاسبه فاز C_3S مطابق استاندارد ملی ۱۶۹۲ انجام شده است که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مشابه این جدول در کتاب ویژگی‌های بتن (جدول شماره ۲-۳) وجود دارد که در این تحقیق در جدول شماره ۶ آمده است. با مقایسه این دو، موارد زیر قابل توجه است:
 - ✓ در جدول ۵ طبق مرجع [2] ۸ ترکیب گزارش شده است و در این تحقیق ۱۳ ترکیب گزارش شده است.
 - ✓ تعداد نمونه‌های مورد استفاده در جدول این تحقیق بیشتر از تعداد نمونه‌های جدول ۵ مطابق مرجع [2] است.
 - ✓ اعداد به دست آمده در جدول شماره ۴ با اعداد جدول ۵ طبق مرجع [2] متفاوت است که البته کاملاً طبیعی است.
 - ✓ اطلاعات مربوط به جدول ۵ مطابق مرجع [2] مربوط به سال ۱۹۴۹ میلادی است و اعداد جدول این تحقیق مربوط به سال ۲۰۱۶ می‌باشد.
 - ✓ اطلاعات مربوط به سیمان نوع ۳ و ۴ در جدول ۵ مطابق مرجع [2] وجود دارد که به دلیل عدم تولید سیمان نوع ۳ و ۴ در ایران در جدول شماره ۴ این تحقیق مقادیر مربوط به این نوع سیمان‌ها وجود ندارد.
- اطلاعات مربوط به جداول در منابع مربوط به چندین دهه پیش می‌باشد که با توجه به تغییر تکنولوژی تولید در کارخانجات سیمان و همچنین تغییر نیاز مصرف کننده، لازم است در استفاده از برخی جداول ملاحظات خاص مد نظر قرار گیرد.

جدول ۴- مقادیر ترکیبات اصلی انواع مختلف سیمان‌های پرتلند در ایران

سیمان									ترکیبات اصلی
نوع ۵			نوع ۲			نوع ۱-۴۲۵			
متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	
۵۲/۲۸	۲۲/۴۶	۶۹/۳۸	۵۲/۸۰	۴۰/۵۹	۶۳/۶۴	۵۰/۹۰	۳۸/۵۷	۶۷/۲۵	C_3S
۲۲/۳۳	۶/۲۰	۴۹/۲۸	۲۰/۳۰	۱۰/۷۰	۳۲/۷۴	۲۲/۵۷	۶/۷۸	۳۷/۴۱	C_2S
۳/۱۳	۰/۴۶	۴/۸۰	۶/۷۴	۴/۳۱	۷/۹۳	۶/۷۱	۲/۶۳	۱۱/۱۵	C_3A
۱۵/۴۰	۱۲/۴۸	۲۱/۴۲	۱۱/۴۶	۸/۵۸	۱۲/۹۹	۱۱/۵۸	۹/۷۴	۱۴/۳۰	C_4AF
۱/۵۳	۰/۹	۲/۶۱	۲/۱۷	۱/۵۳	۲/۷۵	۲/۰۵	۰/۹۷	۳/۲۴	SO_3
۱/۱۴	۰/۴۲	۰/۵۸	۱/۰۳	۰/۴۶	۱/۷۵	۱/۰۳	۰/۴۶	۱/۸۸	Free CaO
۱/۹۰	۰/۴۸	۲/۹۰	۱/۹۲	۰/۷۲	۴/۱۱	۲/۱۷	۰/۸۵	۴/۱۱	MgO
۰/۹۱	۰/۴۳	۱/۶۵	۱/۷۹	۰/۸۱	۲/۸۱	۱/۳۶	۰/۴۵	۲/۸۴	LOI
۲۱/۵۵	۲۰/۰۲	۲۳/۴۶	۲۰/۹۷	۲۰/۲	۲۲/۱۰	۲۱/۲۶	۲۰/۰۲	۲۳/۲۰	SiO_2
۴/۴۵	۳/۸۲	۵/۰۲	۴/۹۴	۳/۹۲	۵/۴۹	۴/۹۶	۳/۸۸	۶/۳۴	Al_2O_3
۵/۱۲	۴/۱۰	۷/۰۴	۳/۷۶	۲/۸۲	۴/۲۷	۳/۸۰	۳/۲۰	۴/۷۰	Fe_2O_3
۶۳/۲۹	۶۲/۹۲	۶۵/۴۴	۶۳/۱۳	۶۱/۳۲	۶۴/۶۰	۶۳/۱۶	۶۱/۱۵	۶۴/۶۰	CaO
۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۲۲	۰/۷۵	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۷۰	IR
۳۲ نمونه سیمان نوع ۵ محصول ۹ کارخانه			۲۲ نمونه سیمان نوع ۲ محصول ۹ کارخانه			۲۶ نمونه سیمان نوع ۱-۴۲۵ محصول ۱۴ کارخانه			تعداد نمونه‌ها

نهمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران-تهران-۱۵ مهر ۱۳۹۶

جدول ۵-مقادیر نوعی ترکیبات اصلی انواع مختلف سیمان پرتلند [۲]

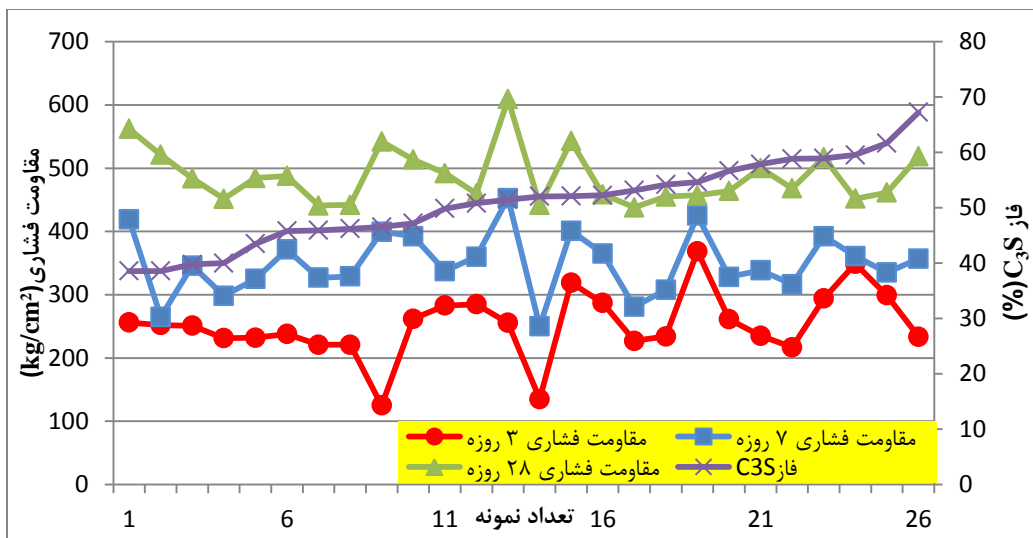
نوع ۵			نوع ۴			نوع ۳			نوع ۲			نوع ۱			ترکیبات اصلی
متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	
۴۳	۳۵	۵۴	۳۰	۲۱	۴۴	۵۶	۳۴	۷۰	۴۶	۳۷	۵۵	۴۹	۴۲	۶۷	C ₃ S
۳۶	۲۴	۴۹	۴۶	۳۴	۵۷	۱۵	۰	۳۸	۲۹	۱۹	۳۹	۲۵	۸	۳۱	C ₂ S
۴	۱	۵	۵	۳	۷	۱۲	۷	۱۷	۶	۴	۸	۱۲	۵	۱۴	C ₃ A
۱۲	۶	۱۵	۱۳	۶	۱۸	۸	۶	۱۰	۱۲	۶	۱۶	۸	۶	۱۲	C ₄ AF
۲/۷	۲/۴	۳/۹	۲/۹	۲/۶	۳/۵	۳/۹	۲/۲	۴/۶	۲/۸	۲/۱	۳/۴	۲/۹	۲/۶	۳/۴	Caso ₄
۰/۴	۰/۱	۰/۶	۰/۳	۰/۰	۰/۹	۱/۳	۰/۱	۴/۲	۰/۶	۰/۱	۱/۸	۰/۸	۰/۰	۱/۵	Free CaO
۱/۶	۰/۷	۲/۳	۲/۷	۱/۰	۴/۱	۲/۶	۱/۰	۴/۸	۳/۰	۱/۵	۴/۴	۲/۴	۰/۷	۳/۸	MgO
۱/۰	۰/۸	۱/۲	۱/۰	۰/۶	۱/۹	۱/۹	۱/۱	۲/۷	۱/۰	۰/۵	۲/۰	۱/۲	۰/۶	۲/۳	LOI
۲۲			۱۶			۵			۲۸			۲۱			تعداد نمونه‌ها

جدول ۶-مقاومت فشاری ملات استاندارد انواع سیمان پرتلند مطابق استاندارد ملی ۳۹۳ ایران

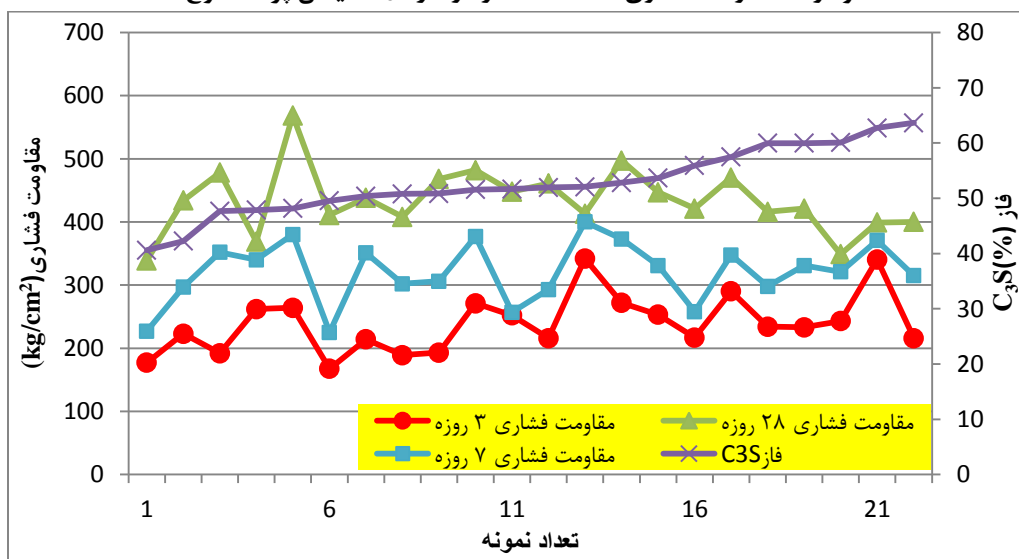
نوع ۵			نوع ۲			نوع ۱-۴۲۵			مقاومت فشاری ملات استاندارد (kg/cm ²)
متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	
۲۱۶/۰	۱۳۴/۵	۳۲۷/۰	۲۳۹/۰	۱۶۷/۵	۳۴۲/۰	۲۵۳/۰	۱۲۵/۰	۳۶۹/۰	۳ روزه
۳۲۵/۰	۲۰۷/۰	۴۵۷/۵	۳۲۵/۰	۲۲۵/۰	۴۰۰/۰	۳۴۹/۰	۲۵۰/۰	۴۵۲/۵	۷ روزه
۴۹۵/۰	۳۲۱/۰	۴۸۴/۵	۴۳۲/۰	۳۲۱/۰	۵۶۸/۵	۴۸۷/۰	۴۳۸/۰	۶۰۹/۰	۲۸ روزه
۳۲			۲۲			۲۶			تعداد نمونه‌ها

جدول ۷-رشد مقاومت فشاری انواع سیمان در سنین ۳ و ۷ روزه نسبت به ۲۸ روزه

نوع ۵	نوع ۲	نوع ۱-۴۲۵	حداقل	رشد مقاومت نسبی ۳روزه منشور ملات سیمان پرتلند به مقاومت ۲۸ روزه همان سیمان
۲۴/۱	۴۰/۲	۲۳/۱		
۶۱/۰	۸۵/۳	۸۰/۶	میانگین	
۴۴/۱	۵۵/۷	۵۰/۳	حداقل	رشد مقاومت نسبی ۷روزه منشور ملات سیمان پرتلند به مقاومت ۲۸ روزه همان سیمان
۳۵/۶	۵۴/۷	۵۰/۹	حداکثر	
۸۶/۶	۹۶/۹	۹۲/۹	میانگین	
۶۶/۲	۷۴/۴	۶۹/۰		

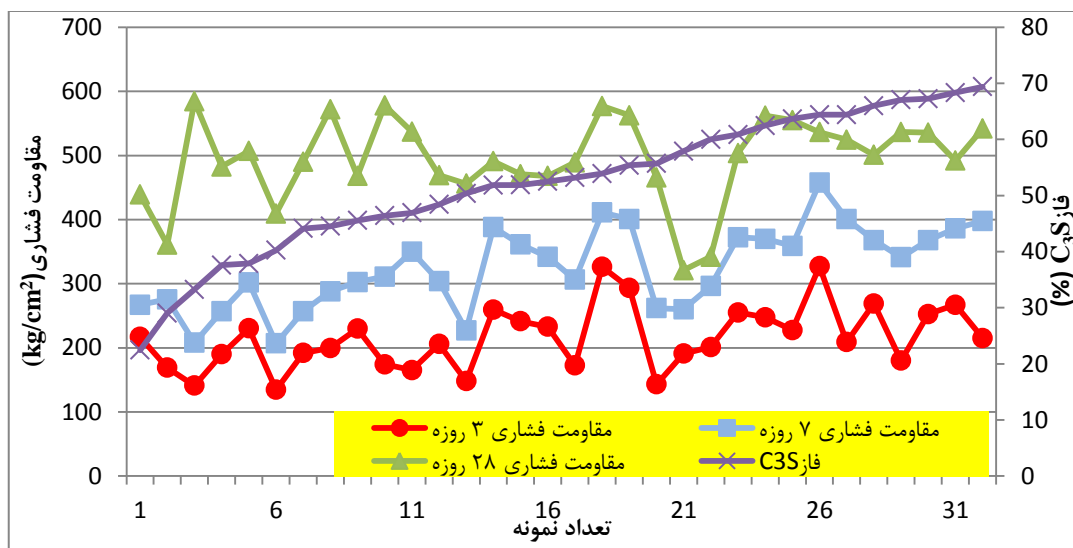


نمودار ۱ - مقاومت فشاری ملات استاندارد و فاز C₃S سیمان پرتلند نوع ۱



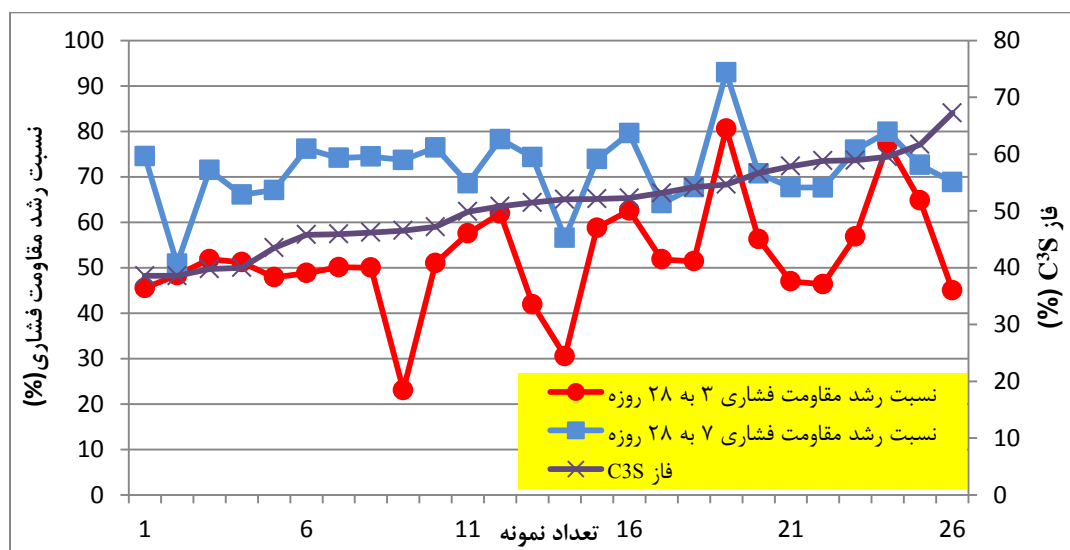
نمودار ۲ - مقاومت فشاری ملات استاندارد و فاز C₃S سیمان پرتلند نوع ۲

نهمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران-تهران-۱۵ مهر ۱۳۹۶

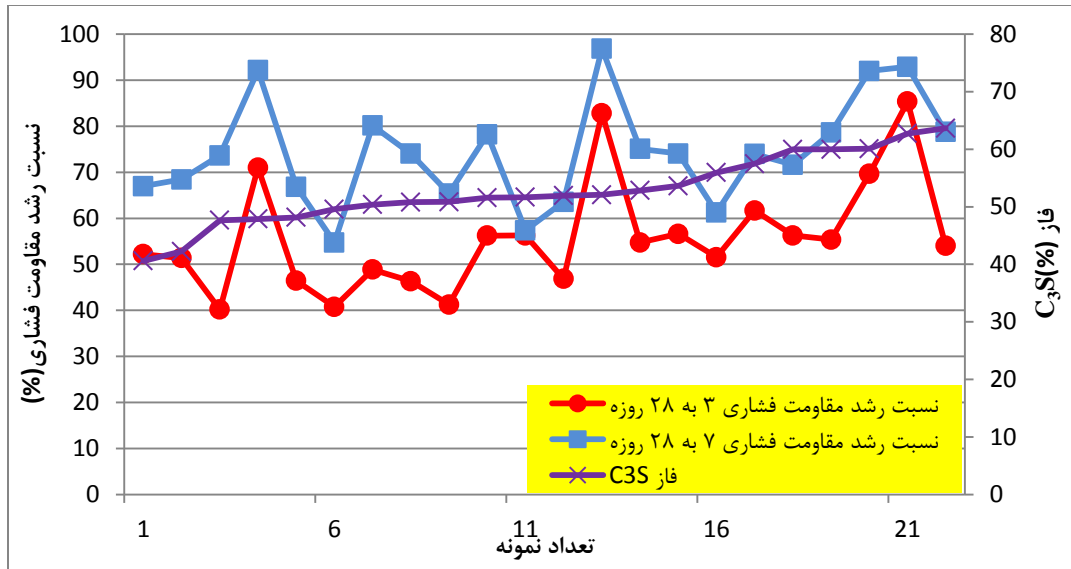


نمودار ۳- مقاومت فشاری ملات استاندارد و فاز C₃S سیمان پرتلند نوع ۵

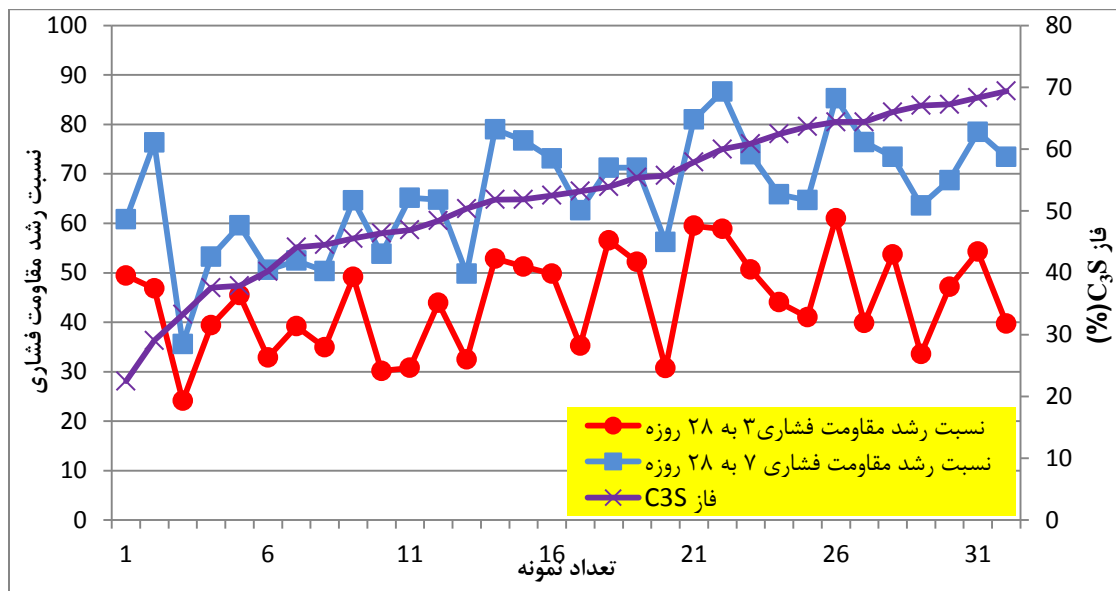
در نمودارهای ۵، ۶ و ۷ میزان فاز C₃S صعودی مرتب شده است و اعداد مقاومت فشاری متناظر در ستون مختلف نمایش داده شده که عدم وجود نظم مشخص به وضوح دیده می‌شود.



نمودار ۴- آهنگ رشد مقاومت ملات سیمان نوع ۱ و فاز C₃S



نمودار ۵- آهنگ رشد مقاومت ملات سیمان نوع ۲ و فاز C₃S



نمودار ۶- آهنگ رشد مقاومت ملات سیمان نوع ۵ و فاز C₃S

در نمودارهای ۴، ۵ و ۶ آهنگ رشد مقاومت ۳ و ۷ روزه به ۲۸ روزه با مقدار فاز C₃S مقایسه شده است.

۶- نتیجه گیری

با توجه به مطالب ذکر شده و نمودارهای حاصل تحقیق چنین به نظر می رسد که میزان مقاومت فشاری ۳ و ۷ و ۲۸ روزه ارتباط مستقیمی با میزان فاز C₃S ندارد و فاکتورهای موثر در این موضوع بسیار بیشتر از این یک عامل می باشد و به اثر متقابل سایر فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی سیمان ها نیز بستگی دارد. در مورد نسبت رشد مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان از سن ۳ یا ۷ تا ۲۸ روز به نظر می رسد با افزایش میزان فاز C₃S این نسبت نیز افزایش می یابد یعنی در سنین ۳ و ۷ روزه مقدار بیشتری از مقاومت ۲۸ روزه حاصل می شود و یا

اصطلاحاً زود سخت شونده تر می گردد. البته مقدار C_3S به کار رفته صرفاً از رابطه بوگ به دست آمده است. در حالی که مقدار واقعی C_3S در کلینکر و نوع آن را نشان نمی دهد. گاه به کار بردن سنگ آهک در آسیاب کلینکر یا اقدامات مشابه مقدار CaO را در تعیین اکسیدهای سیمان افزایش می دهد و مقدار C_3S بیش از مقدار واقعی به دست می آید و باعث گمراهی و عدم نتیجه گیری می گردد و ممکن است منجر به عدم دستیابی به رابطه بین C_3S و مقاومت شود.

۷- مراجع

- [۱] وادل؛ دوبروولسکی، " دستنامه اجرای بتن"، مترجمین(رضانیانپور و همکاران) انتشارات علم و ادب، ۱۳۸۰.
- [۲] نوئل، آدام، "ویژگی های بتن"، مترجم(فامیلی، هرمز)، انتشارات ندای آریانا، ۱۳۹۱.
- [۳] ویژگی های سیمان پرتلند (ISIRI 389)، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۷۱.
- [۴] انجمن سیمان پرتلند؛ انجمن سیمان کانادا. "طراحی و کنترل مخلوط های بتنی"، مترجم(اردشیر اطمینانی)، انتشارات جویبار، ۱۳۸۹.
- [5] V. C.Johansen, P. C.Taylor و P. D.Tennis, Effect of Cement Characteristics on Concrete Properties, Portland Cement Association, 2006.
- [6] S. M. DeHayes, "Concrete Strengths: A Preliminary Investigation", Proceedings of the Twelfth International Conference on Cement Microscopy, Duncanville, Texas, USA, 1990.
- [7] R. Gaynor, "Cement Strength and Concrete Strength An Apparition or a Dichotomy?", Cement, Concrete and Aggregates, vol 15, pp. 135-144, 1993.
- [8] W. Weaver, H. Isabelle و F. Williamson, "A Study of Cement and Concrete Correlation", Journal of Testing and Evaluation, Vol 2, pp. 260-303, 1974.
- [۹] "آئین نامه بتن ایران (آبا)", معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸.
- [۱۰] مقررات ملی ساختمان ایران. مبحث نهم. طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه. وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم، ۱۳۹۲.
- [11] "Concrete Construction," October 1994. [Online]. Available: <http://www.concreteconstruction.net/how-to/relationship-between-seven-and-28-day-strengths>
- [12] D. A. Lange, "Long-term Strength Development of Concrete", Portland Cement Association, 1994.
- [۱۳] سیمان - قسمت ۱: ویژگی ها (INSO 17518-1) سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۴] پ. مهتا؛ ج. مونته ئیرو، "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)", مترجمین(رضانیانپور و همکاران) انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (۱۳۸۳).
- [۱۵] ل. فریدریش ویلهلم، تکنولوژی سیمان، تولید و کاربرد، تهران: نشر طراح، ۱۳۸۶.
- [16] R. Gebhardt, "Survey of North American Portland Cements", Cement, Concrete, and Aggregates, vol 17, p. 145 to 189, 1995.