Archive of SID

رابطه تجربی مقاومت فشاری سیمان پرتلند با فازها و نرمی آن *

محمدباقر مهدی زاده[۱] صمد دیلمقانی[۲]

چکیده در این مقاله رابطهٔ فازها و نرمی سیمان پرتلند با مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ آن به‌منظورتکمیل فرمول تجربی Bogue مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده نشان‌دهنده این واقعیت است که بین فازهای تشکیل دهنده و نرمی سیمان با مقاومت فشاری آن ارتباط مستقیم وجود دارد. در روابط تجربی پیشنهادی سهم‌های هر یک از فازها ونرمی سیمان توسط ضرایبی ارائه گردیده است. با معلوم بودن فازها و نرمی سیمان می‌توان با دقت قابل قبولی مقاومت فشاری سیمان را بدست آورد.

واژه‌های کلیدی سیمان پرتلند، مقاومت فشاری، فازهای سیمان، نرمی سیمان، رابطهٔ Bogue .

Experimental Relationship Between Compressive Strength of Portland Cement with it's Phases and Fineness

M. B. Mehdizadeh S. Dilmaghani

Abstract *In this paper the relation of compressive strength of portland cement at 28 days with it's phases and fineness in completing of the Bogue's experimental formula have been contemplated. The laboratory results indicate that there is a direct relationship between phases and fineness of the cement with it's compressive strength. In the proposed experimental formulas, the portion of each cement phase and it's fineness have been given by coefficients. For any given value of the phases and fineness of cement, the compressive strength could be obtained with acceptable precision.*

Key Words Portland Cement, Compressive Strength, Cement Phases, Cement Fineness, Bogue Relationship.

---

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۱۲/۲۲ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۱/۸/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) مربی مرکز آموزش عالی فنی تبریز

(۲) استاد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

پژوهش تجربی حاضر در بارهٔ ارتباط دادن فازهای سیمان و نرمی آن با مقاومت فشاری سیمان می‌باشد. باتوجه به کاربردهای گسترده سیمان در صنعت ساخت و ساز، بهبود خواص سیمان و کاهش مصرف انرژی در تولید آن مورد توجه پژوهشگران و مراکز تحقیقاتی معتبر دنیا می‌باشد.

از آغاز تولید انبوه سیمان و به کارگیری آن در سازه‌های بتنی، همواره کوشش شده است در ترکیبات، پخت و مصرف آن چنان تغییراتی ایجاد شود که با حداقل انرژی بتوان به مقاومت فشاری مطلوب دست یافت.

مطالعات تجربی گوناگونی چه بر روی مواد خام سیمان و چه بر روی کلینگر و سیمان نرم شده آمادهٔ مصرف صورت گرفته است. به‌طور متعارف رابطهٔ معروف Bogue که ارتباط تجربی بین فازهای سیمان و مقاومت فشاری آن را پیشنهاد کرده ا ست، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱] .

ویژگی برجستهٔ کار حاضر افزون بر تحقیق درصدهای مؤثر فازهای سیمان، در نظر گرفتن نرمی سیمان به عنوان اثربخش مهمی در مقاومت فشاری و نیز، دخالت دادن آن در رابطهٔ معروف Bogue می‌باشد (تکمیل رابطهٔ Bogue).

ترکیبات اصلی سیمان پرتلند

اجزای اصلی سیمان که اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آلومینیوم و آهن می‌باشند در کوره‌های پخت سیمان به‌صورت خمیری در می‌آیند. با ترکیب اکسیدهای فوق با یکدیگر ترکیبات چند اکسیدی که کانی‌ها یا فازهای سیمان نامیده می‌شوند، بوجود می‌آیند.

فازهای سیمان پرتلند دارای ترکیبات عمومی زیر می‌باشند: تری کلسیم سیلیکات یا آلیت ($3CaO.SiO_2$) با علامت اختصاری C_3S

دی کلسیم سیلیکات یا بلیت ($2CaO. SiO_2$) با علامت اختصاری C_2S

تری کلسیم آلومینات ($3CaO. Al_2O_3$) با علامت اختصاری C_3A

تتراکلسیم آلومینوفریت ($4CaO. Al_2O_3.Fe_2O_3$) با علامت اختصاری C_4AF

افزون بر فازهای اصلی یاد شده ترکیبات دیگری همچون اکسیدهای پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، منگنز و برخی اکسیدهای دیگر نیز به مقدار جزئی وجود دارند که در شبکهٔ تبلور کانی‌ها جای گرفته‌اند.

فاز آلیت (C_3S) که سهم بیشتری نسبت به فازهای دیگر دارد مستقیماً بر روی مقاومت سیمان اثر دلارد. بیشتر خاصیت چسبندگی سیمان به این فاز مربوط می‌شود.

هرچند فاز بلیت (C_2S) به‌صورت خالص در سیمان وجود ندارد بلکه با مقادیری از سایر اکسیدها همراه می‌باشد، در شروع افزایش مقاومت آهسته‌ای داشته و در درازمدت مقاومتی تقریباً برابر مقاومت آلیت به دست می‌آورد.

فاز تری کلسیم آلومینات (C_3A) نیز با عناصر خارجی همراه است. بطور معمول، اکسیدهای سدیم و پتاسیم می‌توانند تا حد ۵ درصد وزنی در این فاز جای گیرند. این آلومینات با آب میل ترکیبی زیادی دارد و گیرش سریع انجام می‌دهد. برای تنظیم گیرش و جلوگیری از گیرش سریع سیمان، مقداری سنگ گچ به سیمان افزوده می‌شود. گرمای هیدراتاسیون این آلومینات بسیار زیاد است و وجود آن در سیمان به همراه آلیت و بلیت باعث افزایش مقاومت اولیهٔ سیمان می‌گردد.

فاز تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF) با آب میل ترکیبی کمی داشته و در سیمان نقش هیدرولیکی چندانی ندارد. این فاز عامل تعیین رنگ سیمان می‌باشد[۱,۳,٤,۷,۹, 10,۱۱] .

www.SID.ir

Archive of SID

روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها مطابق با آیین‌نامه‌های استاندارد ایران به شرح زیر صورت گرفته‌اند:

روش تجزیه شیمیایی کامل . مطابق آیین‌نامه‌های استاندارد ایران [٦] بیش از ۹۰ آزمونه از سه نوع سیمان (سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان صوفیان، سیمان‌های نوع ۲ و نوع ۵ کارخانه سیمان تهران) تجزیهٔ شیمیایی گردیده و مقادیر SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، CaO ، MgO ، SO_3 آهک آزاد و اکسیدهای قلیایی (Na_2O و K_2O) آنها بدست آمدند. از این مقادیر درمحاسبهٔ فازهای سیمان پرتلند استفاده گردید.

تجزیه و آنالیز با استفاده از پرتو ایکس . هنگامی که پرتو ایکس بر جسمی تابانده می‌شود بخش عمدهٔ آن از جسم عبور کرده و بخش کمی از پرتو ایکس تحت زاویهٔ معینی که بستگی به جنس جسم دارد، منعکس می‌شود. بنابراین، وقتی پرتو ایکس برعناصر گوناگونی می‌تابد زاویهٔ اشعهٔ بازتابیده متفاوت خواهد بود. با استفاده از این فن آزمونه‌هائی را به‌صورت قرص درست کرده ودر دستگاه پرتو ایکس که بدین منظور طراحی و ساخته شده است، قرار می‌دهند. درصد ترکیبات سیمان توسط کامپیوتری که به دستگاه متصل است نشان داده می‌شود. دانه‌بندی آزمونهٔ مورد آزمایش باید بسیار ریز و یکنواخت باشد زیرا در صورت درشت دانه بودن آزمونه، پرتو بازتابیده از آزمونه در خود آزمونه جذب شده و نتایج بدست آمده دقیق نخواهند بود. به همین دلیل حتی آزمونه‌های پودر شده را مجدداً برای یک زمان معین دیگر آسیا می‌نمایند. در مورد بعضی آزمونه‌های سیمان به علت سختی زیاد، علیرغم آسیا کردن آزمونه، دانه‌بندی مناسبی بدست نمی‌آید. این آزمونه‌ها را باید توسط کمک ذوب‌ها، خمیر نموده و از آن قرص ساخت. در تمام موارد، تهیهٔ قرص با ذوب کردن آزمونه نتایج دقیق‌تری بدست می‌دهد. باید توجه داشت هر روشی که برای ساخت آزمونه‌ها انتخاب شود برای آزمونه‌های کالیبراسیون و آزمونه‌های مجهول یکسان باشد. به عبارت دیگر، دقت مقادیر بدست آمده برای یک بلور با روش پرتو ایکس، به مقدار زیادی به شدت خطوط پرتو ایکس و کالیبراسیون دقیق آن بلور بستگی دارد. مقادیر بلورها را می‌توان مستقیماً از اعداد پرتو ایکس و یا از ترکیب اعداد پرتو ایکس با آنالیزهای شیمیایی اکسیدهای سیمان بدست آورد. اینها به‌ترتیب به نامهای روش پرتو ایکس و روش ترکیبی نامیده می‌شوند. روش ترکیبی معتبرتر می‌باشد[۱۲,۹,۸,۷] .

آزمایش نرمی سیمان . افزایش نرمی باعث هیدراتاسیون سریع سیمان گشته و مقاومت‌های اولیهٔ سیمان را افزایش می‌دهد. افزایش نرمی به کم شدن انبساط نیز کمک زیادی می‌نماید به‌طوری که هرچه سیمان نرم‌تر گردد ذرات آهک آزاد در آن پراکنده‌تر و ریزتر خواهد شد. در این صورت نه تنها انبساط کمتر می‌شود بلکه تغییر شکلی که به همراه انبساط است منظم‌تر می‌گردد. همچنین، واکنش‌های پخت مواد خام نه تنها تحت تأثیر طبیعت معدنی مواد اولیه است بلکه به نرمی مواد و آنالیز شیمیایی و شرایط فیزیکی آن نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر، ذرات درشت در شرایط پخت در کورهٔ دوار کاملاً وارد واکنش نمی‌شوند.

سرعت واکنش شیمیایی آب و سیمان به ریزی سیمان مربوط است و از این‌رو، برای هیدراتاسیون سریع و افزایش مقاومت سریع، سیمانی با ریزی زیاد لازم است. در مقابل باید هزینهٔ آسیا کردن دانه‌ها برای دستیابی به ریزی زیاد و اثراتی را که سیمان‌های ریز بر روی کارائی بتن تازه، خواص درازمدت و میزان گچ مورد نیاز می‌گذارد، را در نظر داشت. در ضمن، اگر

www.SID.ir

Archive of SID

سیمان به روش تر تولید گردد، میزان آب مورد لزوم به شدت افزایش خواهد یافت.

روش‌های مختلفی برای تعیین نرمی سیمان وجود داردکه آزمایش بلین (Blaine) از جملهٔ آنها است. در بیشتر کارخانجات سیمان از این روش استفاده می‌شود. در کار تجربی حاضر نیز از آزمایش بلین استفاده شده است. در این آزمایش حجم معینی از هوا در یک فشار متوسط به آزمونه سیمان وارد شده و از آن عبور داده می‌شود، زمان لازم برای عبور این هوا را اندازه‌گیری کرده و نرمی دانه‌های سیمان را از فرمول تجربی $S = \sqrt{t}$ تعیین می‌نمایند [۱۲,۱۱,10,۵,٤,۳,۱] .

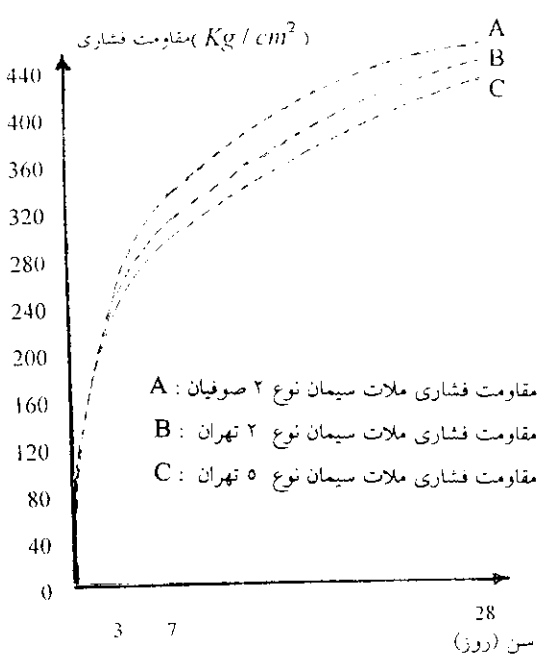
آزمایش مقاومت فشاری سیمان‌ها . برای تعیین مقاومت فشاری سیمان آزمایش فشار برروی خمیر خالص سیمان انجام نمی‌شود بلکه بر روی ملاتی که با اختلاط ماسه به آن بدست آمده است، انجام می‌گیرد. برای امکان مقایسهٔ نتایج این آزمایش‌ها باید مقدار سیمان در ملات مزبور معین و نوع ماسه استاندارد باشد[۲]. در پژوهش حاضر ماسهٔ استاندارد که ماسه‌ای است طبیعی، مدور و سیلیسی (درصد اکسید سیلسیم در آنالیز شیمیایی آن بیش از ۹۸ می‌باشد) استفاده شده و با قالب‌های معین و استاندارد و تحت شرایط کنترل شده‌ای آزمونه‌های ملا ت سیمان ساخته شده و مقاومت آنها تعیین گردیده است.

در ملات‌های ساخته شده، ترکیب وزنی مصالح عبارت است از: یک قسمت سیمان، سه قسمت ماسه کاملاً خشک و نصف قسمت آب آشامیدنی. (نسبت آب به سیمان مساوی ۰/۵)، در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها در محیطی به دمای ۲ ± ۲۰ درجهٔ سانتیگراد و با رطوبت هوای نسبی حدود ٦۵ درصد و با استفاده از مخلوط کن‌های خودکار انجام شده است.

آزمونه‌ها پس از ساخت به مدت ۲٤ ساعت در محفظه‌هایی به دمای ۲ ± ۲۰ درجهٔ سانتیگراد و رطوبت نسبی حداقل ۹۰ درصد نگهداری شده‌اند. پس از مدت فوق قالب‌ها باز و نمونه‌ها تا انجام آزمایش‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه در محیط آزمایشگاه در داخل آب نگهداری شده‌اند. آزمایش مقاومت فشاری با دستگاه بتن‌شکن برقی که سرعت آن برای وارد کردن فشار به نمونه در هر ثانیه بطور متوسط ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود، صورت گرفته است.

نوع سیمان‌های مورد آزمایش و محل آزمایش نمونه‌ها

آزمایش‌ها بر روی سه نوع سیمان (سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان صوفیان – سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان تهران- سیمان نوع ۵ کارخانه سیمان تهران) صورت گرفته است. آزمایش‌های مربوط به سیمان نوع ۲ صوفیان در کارخانه سیمان صوفیان و بقیه آزمایش‌ها در کارخانه سیمان تهران انجام شده است. در هر نوع سیمان تعداد آزمایش‌ها حدود ۳۰ مورد بوده و سعی شده خطاهای آزمایشگاهی به حداقل برسد.



شکل ۱ تغییرات مقاومت فشاری انواع سیمان‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج آزمایش‌ها و بحث در مورد آنها

برای هر نوع سیمان، سه دسته آزمایش صورت گرفته است :

دسته اول مطالعهٔ ترکیبات شیمیایی بهمنظور بدست آوردن اجزای اصلی و فازهای سیمان از طریق تجزیه شیمیایی مستقیم و توسط پرتو ایکس

دسته دوم مطالعه نرمی سیمان از طریق دستگاه بلین

دسته سوم انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ملات سیمان با گذشت زمان افزایش می‌یابد. آهنگ سخت شدن برای هر نوع سیمانی با زمان تغییر می‌نماید. این تغییر در سنین تا ۲۸ روز معمولاًبه‌صورت لگاریتمی است. در سنین بالاتر آهنگ تغییرات سخت شدن کند می‌باشد .

آهنگ سخت شدن ملات سیمان برای طراح و سازنده بتنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، برای هر نوع سیمان مورد بررسی، تغییرات مقاومت فشاری نسبت به سن ملات آزمایش گردیده و در شکل (۱) آورده شده است .

چنانکه از شکل یادشده پیداست مقاومت فشاری سه نوع سیمان پرتلند با هم یکسان نیست. علل آن‌را می‌توان در تغییرات ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی آنها جستجو کرد. نشان دادن چگونگی ارتباط مقاومت سیمان با این پارامترها هدف این مقاله می‌باشد.

عوامل عمده شیمیایی مؤثر برروی مقاومت فشاری سیمان مقدار فازهای C_3S، C_2S، C_3S و C_4AF و از جنبه‌های فیزیکی نیز عامل مؤثر نرمی سیمان می‌باشد که در این پژوهش تأثیر آنها برروی مقاومت سیمان بررسی شده است.

در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) نتایج آزمایش‌های تجزیهٔ شیمیایی برای بدست آوردن مقادیر اجزای اصلی سیمان و همچنین، نتایج آزمایش‌های نرمی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه سیمان به همراه مقادیر فازهای محاسبه شده برای هر سه نوع سیمان مورد آزمایش آورده شده است[۱۲] .

فازهای سیمان براساس کار Bogue مطابق معادلات زیر محاسبه گردیده‌اند. نشانه‌های داخل پرانتزها معرف درصد اکسید معین در کل وزن سیمان می‌باشند[۱] .

$$C_3S = 4/07(CaO) - 7/60(SiO_2) - 6/72(Al_2O3) - 1/43(Fe_2O3) - 2/85(SO_3)$$

$$C_2S = 2/87(SiO_2) - 0/75(3CaO.SiO_2)$$

$$C_3A = 2/65(Al_2O_3) - 1/69(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3/04(Fe_2O_3)$$

ارائهٔ یک رابطهٔ تجربی بین فازها و نرمی سیمان با مقاومت فشاری سیمان سبب تولید سیما ن با کیفیت عالی و حداقل انرژی خواهد شد. به عبارت دیگر اگر بتوان از ترکیبات شیمیایی سیمان، مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ آن را تعیین نمود اجزای تشکیل دهندهٔ سیمان را به نحوی می‌توان تغییر داد که به مقاومت فشاری مناسبی رسید. آقای Bogue برای اولین بار برای تعیین مقاومت فشاری سیمان از روی ترکیبات شیمیایی آن فرمول زیر را به‌صورت تجربی ارائه کرده است:

$$R_{28} = K_1C_3S + K_2C_2S + K_3C_3A + K_4C_4AF$$

که در آن K_4, K_3, K_3, K_1 ضرایبی هستند که به‌ترتیب برابرند با ۲۹۰، ۵۳، ۵۶۳ و ۲۶٤ [۲] .

چنانکه ملاحظه می‌شود در این فرمول به پارامترهای فیزیکی سیمان اشاره‌ای نشده است.

با استفاده از نتایج پژوهش انجام یافته به‌وسیله نویسندگان، برای هر سه نوع سیمان رابطهٔ کلی زیر را می‌توان ارائه نمود:

$$R_{28} = \frac{aC_3S + bC_2S + cC_3A + dC_4AF}{C_3S + C_2S + C_3A + C_4AF} + eB.$$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ نتایج آزمایش‌های مربوط به سیمان نوع ۲ تهران

نوع سیمان	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	C_3S %	C_2S %	C_3A %	C_4AF %	بلین cm^2/gr	مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌سیمان kg/cm^2
T_2	۲۱/۳۷	٤/٦٦	۳/۹۷	٦۱/۹٥	٤۸	۲٥/۱	٥/٦	۱۲/۱	۲۸٤۱	٤۲۸
T_2	۲۱/٤۳	٤/٦٦	۳/۸۸	٦۲/۱٤	٤۷/۸	۲٥/٥	٥/۸	۱۱/۸	۲۹٦۲	٤۳۸
T_2	۲۲/۱۳	٤/۸۸	٤/۰۷	٦۲/٥۱	٤۱/۹	۳۱/۹	٦/۱	۱۲/٤	۲۸۷٤	٤۱٥
T_2	۲۱/۲٥	٤/۸۲	٤/۰۲	٦۱/۹۳	٤۷/٦	۲٥/۱	٦/۰	۱۲/۲	۲۸۱۱	٤۲۰
T_2	۲۱/۹۱	٤/۷۲	۳/۸۰	٦۲/۸۸	٤۷/٤	۲۷/۱	٦/۱	۱۱/٦	۳۰۲۱	٤۳۷
T_2	۲۱/۰٦	٤/٦۰	۳/۷۱	٦۱/۸٦	٤۷/۱	۲٤/۹	٥/۹	۱۱/۳	۳۱٦٥	٤۲٥
T_2	۲۱/۰٦	٤/٦۰	۳/۷۱	٦۱/۸٦	٤۷/۱	۲٤/۹	٥/۹	۱۱/۲	۳۰۲۱	٤۱٥
T_2	۲۱/۹٥	٤/۸٤	۳/۸٥	٦۲/۷۲	٤٥/٤	۲۸/۸	٦/۳	۱۱/۷	۲۹٦۲	٤۰۷
T_2	۲۱/٥۱	٤/٦۹	۳/۸۱	٦۲/۳۰	٤۳	۲۹/٥	۳/٦	۱۱/٦	۳۰۲۱	٤۲۱
T_2	۲۱/۹٥	٤/۸٤	۳/۸٥	٦۲/۰٦	٥۲/۲	۲۱/۳	٥/٦	۱۱/۲	۲۹۳۳	٤۳۳
T_2	۲۱/٥۱	٤/٦۹	۳/۷۸	٦۲/۳۹	٤۹/٦	۲٤/۳	٦/۰	۱۱/٥	۳۲۳۰	٤۳۱
T_2	۲۱/۸۰	٤/۷٥	۳/۷٦	٦۲/۲۰	٤٥/۹	۲۷/۹	٦/۲	۱۱/٤	۲۹۳۳	٤۲٥
T_2	۲۱/۸۳	٤/٦٤	۳/۷٦	٦۱/۸۷	٤٤	۲۹/۱	٦/۳	۱۱/٤	۳۱۰۹	٤۱۸
T_2	۲۱/۸۳	٤/٦٤	۳/۷٥	٦۲/٦٦	٤۷/۳	۲۷	٦	۱۱/٤	۲۸۷٤	٤۱۰
T_2	۲۲/۲۱	٤/۷۷	۳/۷٦	٦۲/۸۱	٤۳/۸	۳۰/۷	٦/۳	۱۱/٤	۳۰۲۱	٤۰٦
T_2	۲۱/۹۱	٤/۸۷	۳/۷۲	٦۲/۸٤	٤٦/٤	۲۷/۹	٦/٦	۱۱/۳	۲۸۱۱	٤۱۲
T_2	۲۱/۸٥	٤/۸۸	۳/۷۳	٦۲/۷۱	٤٦/۱	۲۸	٦/٦	۱۱/۳	۳۰۸۰	٤۲۷
T_2	۲۲/۰۷	٤/۸۹	۳/۷۹	٦۲/۸۰	٤٤/٥	۲۹/۸	٦/٦	۱۱/٥	۲۷٦٥	٤۲٥
T_2	۲۱/٦۸	٤/۸۱	۳/۷۸	٦۲/٥۷	٤۸	۲٦	٦/۳	۱۱/٥	۲۷٦٥	٤۱۸
T_2	۲۱/٦٥	٥/۰۱	۳/۸۹	٦۲/٥۱	٤٤/۸	۲۷/٤	٦/۷	۱۱/۸	۲۸۱۱	٤۱۲
T_2	۲۱/۳۱	٤/٦۲	۳/۸٦	٦۲/۳٤	٤۹/۸	۲۳/٦	٥/۷	۱۱/۷	۲۸۷٤	٤۲٥
T_2	۲۱/٦٥	٥/۰۱	۳/۸۹	٦۲/٥۱	٤٤/۸	۲۸/٤	٦/۲	۱۱/۸	۲۹۰٤	٤۲۱
T_2	۲۲/۰۹	٤/۷٤	۳/۸٤	٦۲/۸۷	٤٥/٤	۲۹/۲	٦/۱	۱۱/۷	۲۷۱٥	٤۱۲
میانگین	۲۱/٦۷	٤/۷٥	۳/۸۲	٦۲/٤۰	٤٦/۳۲	۲۷/۲۸	٦/۱٤	۱۱/٦٤	۲۹۲٦	٤۲۰/٤
انحراف‌معیار	۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۳٤	۲/۲۳	۲/۳۳	۰/۲۹	۰/۳٥	۱۲۹/۳	۸/۷٥
واریانس	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۲	٤/۹۷	٥/٤۳	۰/۰۸	۰/۱۲	۱٦۷۱۸	۷٦/٥٦

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های مربوط به سیمان نوع ۲ صوفیان

نوع سیمان	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	C_3S %	C_2S %	C_3A %	C_4AF %	بلین cm^2/gr	مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌سیمان kg/cm^2
T_2	۲۳/۱	٤/۲۳	۳/۸٦	٦۳/٦۲	٤۷/۷۲	۳۱/٥۳	٤/۷۲	۱۲	۲۸۷۲	٤۲۷
T_2	۲۲	٤/٤۳	٤/۸٥	٦۲/۹۱	٥۲/۳٦	۲٤/۷۹	٥/۳۲	۱۱/۹۷	۲۹۰۳	٤۲۹
T_2	۲۲/٦	٤/۱۷	۳/۹۲	٦۳/۰۱	٤۸/٦۹	۲۹/٥۳	٤/٥۱	۱۲/۱۷	۳۱۲۸	٤۳٦
T_2	۲۱/۷	٤/۰۸	۳/۸۱	٦۳/۲٥	٥۸/۳٤	۱۹/٥٦	٤/٤٤	۱۱/۸۳	۳۱٦۷	٤٥٤
T_2	۲۲/۷	٤/۱٦	٤/۰۷	٦۳/۳۳	٤۹/۷۱	۲۸/۹۸	٤/۲۳	۱۲/٦۳	۳۰٤۸	٤٤۰
T_2	۲۲/٦	٤/۰۷	۳/۹۳	٦۳/۱۳	٥۱/۰٤	۲۷/۷۲	٤/۲۲	۱۲/۲۱	۳۱٥۷	٤۲۲
T_2	۲۱/۸	٤/٦۹	۳/۷٤	٦۳/۱۳	٥۱/۹٤	۲٤/۸٥	٦/۲۱	۱۱/٦۲	۳۱۹٦	٤۳۲
T_2	۲۱/٥	٤/٤٤	۳/٤٦	٦۳/۰٦	٥۷/۱۸	۱۹/۸۷	٦/۰۳	۱۰/۷٤	۳٤۷۳	٤٥۷
T_2	۲۲/۲۲	٤/۳۰	۳/۸۰	٦۳/٥۰	٥۸/۰۷	۲۰/۳۰	٥/۲٥	۱۰/۹٤	۳۲۹۱	٤٤٤
T_2	۲۲/۲	٤/۳۰	۳/۸۰	٦۳/۳۰	٥۳/۱٦	۲٤/۹۳	٥/۰٦	۱۱/۸۰	۲۹٦۰	٤۲٤
T_2	۲۲/۹	٤/۰۷	۳/٦٥	٦۳/۹۳	٥۲/۳۱	۲۷/٥٦	٤/٦۹	۱۱/۳٤	۲۸۳۹	٤۲۱
T_2	۲۲/۹	٤/۲۲	۳/٥٥	٦۳/۹۸	٥۱/۳٤	۲۸/۳۷	٥/۲۸	۱۱/۰۱	۲۷۸٤	٤۲۷
T_2	۲۱/٦	٤/٥۲	۳/٥۰	٦۲/۹۱	٥٦/۰۷	۲۰/۸۱	٦/۱۷	۱۰/۸۸	۲۸۱۷	٤٤۸
T_2	۲۲/۷	٤/٤۲	۳/۳۳	٦۳/٤۳	٤۹/۷۷	۲۸/۸۷	٦/۲۲	۱۰/۳۳	۲۹٦٦	٤٤۲
T_2	۲۱/۸	٤/۲۳	۳/٤۰	٦۳/٦۸	٥۸/۱٦	۲۰/۰۳	٥/٥۸	۱۰/٥٥	۳۳٥٦	٤٥۱
T_2	۲۱/۸	٤/۲۰	۳/٥۲	٦۳/٤۲	٥٦/۳۹	۲۱/۲٤	٥/۲۹	۱۰/۹۹	۳۱۸٦	٤٤۸
T_2	۲۱/۸	٤/٤٤	۳/۹۳	٦۳/٥٥	٥٥/۳۲	۲۱/۹٦	٥/۲۲	۱۲/۲۱	۳۰٥۸	٤۳۹
T_2	۲۱/۹	٤/۳۱	۳/۸٤	٦۳/٦٥	٥٥/۷۱	۲۲/۰۹	٥/۰۳	۱۱/۹۱	۳۰٥۸	٤٤۳
T_2	۲۲	٤/۱۸	۳/۷٤	٦۳/۸۲	٥٦/٥۷	۲۱/۸۳	٤/۸۳	۱۱/٦۳	۳۱٦۷	٤٤٦
T_2	۲۲/۲	٤/۱۱	۳/۸۰	٦۳/۹٥	٥٦/۹۱	۲۲/٦۱	٤/٥٥	۱۱/۷۹	۳۰٦۸	٤۳۳
T_2	۲۲/۲	٤/۳٥	۳/۸٤	٦٤/۱٤	٥٥/۰٤	۲۳/٤۸	٥/۱۳	۱۱/۹٤	۲۹٦۰	٤۳۸
T_2	۲۲/۲	٤/۳۲	۳/۹۲	٦٤/٤۸	٥٥/۹۹	۲۲/۷٥	٤/۹۰	۱۲/۱۹	۳۳۱۰	٤٤۷
T_2	۲۱/۷	٤/٦۳	۳/۸٥	٦۳/٥۱	٥٤/٤۲	۲۲/٥۸	٥/۸٦	۱۱/۹۷	۲۸۸۲	٤۳۳
T_2	۲۱/۸	٤/۷٥	۳/۸٥	٦۳/٤۲	٥۲/۷۲	۲٤/۱۸	٦/۱۹	۱۱/۹٦	۲۸۳۹	٤۳٦
T_2	۲۲	٤/۷۰	٤/۰۰	٦٤/۲٤	٥٥/۰۸	۲۲/۸۳	٥/۸۱	۱۲/٤۱	۲۹٤٦	٤٤۲
T_2	۲۳	٤/٦۰	۳/۸۷	٦۳/۷۹	٤٦/۷۰	۳۲/۱٤	٥/۷٤	۱۲/۰۲	۲۹٦٦	٤۲۲
T_2	۲۲/٦	٤/۹۷	۳/۸۰	٦۳/۷٥	٤٦/۳	۳۱/٤۰	٦/۸۸	۱۱/۷۹	۲۸۰٦	٤۲۷
T_2	۲۲/۸	٤/٦۳	۳/۷۱	٦٤/۳۲	٥۰/۰۱	۲۸/۹۱	٦/۱۰	۱۱/٥٤	۲۹۳٥	٤۲٦
میانگین	۲۲/۲۱	٤/۳۷	۳/۷٥	٦۳/٥۷	٥۳/۲۹	۲٤/۸٥	٥/۳۳	۱۱/٦٤	۳۰۳۷	٤۳٦/٥
انحراف معیار	۰/٤٦	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/٤۱	۳/٤۳	۳/۷۷	۰/٦۷	۰/٥۸	۱۷٦/٥	۱۰/۲۳
واریانس	۰/۲۱	۰/۰٥	۰/۰۳	۰/۱۷	۱۱/۷٦	۱٤/۲۱	۰/٤٥	۰/۳٤	۳۱۱٥۲	۱۰٤/٦٥

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ نتایج آزمایش‌های مربوط به سیمان نوع ۵ تهران

نوع سیمان	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	C_3S %	C_2S %	C_3A %	C_4AF %	بلین cm^2/gr	مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌سیمان kg/cm^2
T_0	۲۲/۲۹	۴/۲۹	۴/۹۸	۶۲/۶۶	۴۷/۵	۲۸/۲	۲/۹	۱۵/۱	۲۶۹۸	۴۱۱
T_0	۲۱/۳	۴/۲۶	۴/۸۲	۶۲/۳۵	۵۱/۶	۲۲/۲	۳/۱	۱۴/۶	۲۷۴۹	۴۲۷
T_0	۲۱/۹۸	۴/۱۵	۴/۷۶	۶۳/۱۵	۴۹/۶	۲۵/۷	۳/۰	۱۴/۵	۲۹۰۴	۴۲۰
T_0	۲۲/۰۹	4	۴/۵۷	۶۳/۰۲	۵۰/۴	۲۵/۴	۲/۸	۱۳/۹	۲۶/۱۵	۴۱۰
T_0	۲۲/۲۳	۳/۲۷	۵/۱۴	۶۳/۳۹	۵۴/۷	۲۲/۶	۰/۰	۱۵/۶	۲۸۴۱	۴۲۱
T_0	۲۱/۹۲	۳/۸۷	۴/۹۰	۶۳/۴۶	۵۴	۲۲/۲	۲	۱۴/۹	۲۹۰۴	۴۳۱
T_0	۲۲/۶۱	۴	۴/۴۵	۶۳/۶۹	۴۹/۳	۲۷/۷	۳/۱	۱۳/۵	۱۵/۲۷	۴۱۲
T_0	۲۲	۳/۳۸	۴/۸۷	۶۳/۳۹	۵۲/۹	۲۳/۳	۱/۹	۱۴/۸	۲۸۱۱	۴۱۳
T_0	۲۱/۱۹	۳/۶۴	۴/۹۳	۶۲/۸۵	۵۸/۹	۱۶/۴	۱/۳	۱۵	۲۷۴۹	۴۴۳
T_0	۲۱/۹۵	۳/۶	۴/۵۲	۶۳/۴۷	۵۶	۲۰/۸	۱/۹	۱۳/۷	۲۶۱۵	۴۲۳
T_0	۲۲	۴/۱۱	۴/۹۷	۶۳/۵	۵۲/۲	۲۳/۸	۲/۵	۱۵/۱	۲۸۱۵	۴۲۵
T_0	۲۲/۴	۳/۷۱	۴/۴۱	۶۴/۱	۵۵	۲۲/۸	۲/۴	۱۳/۴	۲۶۱۵	۴۳۰
T_0	۲۱/۳۱	۴/۲۵	۴/۶	۶۲/۸۶	۵۳/۴	۲۰/۹	۳/۵	۱۳/۹	۲۹۰۴	۴۳۷
T_0	۲۲/۶۹	۴/۳۹	۴/۸۶	۶۲/۶۹	۴۱/۲	۳۴/۱	۳/۴	۱۴/۸	۳۰۲۱	۳۸۴
T_0	۲۲/۰۸	۳/۸۵	۴۸۳	۶۳/۲۷	۵۱/۴	۲۴/۶	۲/۰	۱۴/۷	۱۵/۲۶	۴۲۰
T_0	۲۱/۹۴	۳/۹۷	۴/۶۷	۶۳/۰۷	۴۹/۶	۲۵/۶	۲/۵	۴/۵	۳۱۰۹	۴۱۸
T_0	۲۱/۳۷	۳/۷۳	۴/۸۵	۶۲/۵۳	۵۴/۸	۲۰/۰	۱/۷	۱۴/۷	۲۴۴۳	۴۳۳
T_0	۲۱/۵۹	۳/۷۹	۴/۷۴	۶۲/۶۶	۵۳/۳	۲۱/۸	۲/۰	۱۴/۴	۲۸۲۴	۴۲۲
T_0	۲۱/۵۱	۳/۸۳	۴/۷۶	۶۲/۶۰	۵۴/۱	۲۰/۹	۲/۱	۱۴/۵	۲۶۱۵	۴۳۲
T_0	۲۱/۶۸	۳/۷۶	۴/۴۳	۶۲/۲۷	۵۱/۳	۲۳/۵	۲/۵	۱۳/۵	۲۶۴۸	۴۱۸
T_0	۲۱/۸۶	.۳/۷۲	۴/۹۲	۶۲/۴۰	۵۰/۲	۲۴/۹	۱/۵	۱۴/۹	۲۷۷۸	۴۱۲
T_0	۲۱/۸۴	۳/۶۳	۴/۸۶	۶۳/۱۶	۵۴/۵	۲۱/۶	۱/۴	۱۴/۸	۲۴۸۰	۴۲۳
T_0	۲۲	۳/۵۹	۴/۹۲	۶۳/۰۹	۵۱/۴	۲۴/۴	۱/۲	۱۴/۹	۱۱/۲۸	۴۲۰
T_0	۲۱/۹۹	۳/۸۱	۴/۸۰	۶۳/۳۳	۵۲/۹	۲۳/۲	۲/۰	۴/۶	۲۹۶۲	۴۳۰
T_0	۲۱/۴۴	۴	۴/۸۰	۶۲/۴۹	۵۲/۰	۲۲/۳	۲/۵	۱۴/۶	۲۸۴۱	۴۳۶
T_0	۲۲/۲۲	۳/۸۶	۴/۷۳	۶۳/۰	۵۰/۲	۲۵/۹	۲/۳	۱۴/۴	۲۹۰۴	۴۲۴
T_0	۲۲/۰۹	۳۳/۵۹	۴/۶۲	۶۳/۵۶	۵۵/۶	۲۱/۵	۱/۷	۱۴/۰	۲۷۱۵	۴۲۸
T_0	۲۲/۴	۴/۰۳	۴/۹۲	۶۲/۹۸	۴۷	۲۸/۹	۲/۴	۱۵	۲۸۴۱	۴۱۲
T_0	۲۲/۲۲	۳/۹۷	۴/۹۶	۶۳/۳۲	۵۰	۲۶/۱	۲/۱	۱۵/۱	۲۷۵۰	۴۰۹
میانگین	۲۱/۹۴	۳/۸۶	۴/۷۸	۶۳/۰۵	۵۱/۹	۲۳/۸۴	۲/۲۰	۱۴/۵۳	۲۷۶۹	۴۲۱/۵
انحراف‌معیار	۰/۳۸	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۴۴	۳/۳۰	۳/۲۶	۰/۷۳	۰/۵۴	۱۵۰	۱۱/۲۴
واریانس	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۱۹	۱۰/۸۹	۱۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۲۹	۲۲۵۰۰	۱۲۶/۳۴

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن:

R_{28}: مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ سیمان

C_4AF, C_3A, C_2S, C_3S : فازهای چهارگانهٔ سیمان بر حسب درصد

B : نشان دهندهٔ نرمی سیمان برحسب cm^2/gr که توسط دستگاه بلین اندازه‌گیری می‌شود.

فرمول (۱) از دو قسمت تشکیل گردیده است: قسمت اول در برگیرندهٔ مشخصات شیمیایی سیمان می‌باشد در حالی که قسمت دوم اثر نرمی سیمان را نشان می‌دهد. a و b و c و d و e ضرایبی هستند که برای هر سه نوع سیمان متفاوت بوده و حدود آنها در جدول (٤) آورده شده است. با جایگذاری حد وسط حدود مندرج در جدول فوق فرمول‌های (۲)، (۳)، (٤-۱) و (٤-۲) به شرح زیر بدست می‌آید:

برا ی سیمان نوع ۲ تهران:

$$R_{28}=\frac{475\,C_3S+114\,C_2S+865\,C_3A+480\,C_4AF}{C_3S+C_2S+C_3A+C_4AF}+0.01B$$

برا ی سیمان نوع ۵ تهران:

$$R_{28}=\frac{497\,C_3S+139\,C_2S+681\,C_3A+401\,C_4AF}{C_3S+C_2S+C_3A+C_4AF}+0.01B \qquad (۳)$$

برای سیمان نوع ۲ صوفیان در حالتی که $C_3S > ۵۰$ باشد:

$$R_{28}=\frac{475\,C_3S+127\,C_2S+865\,C_3A+480\,C_4AF}{C_3S+C_2S+C_3A+C_4AF}+0.01B \qquad (٤-۱)$$

برای سیمان نوع ۲ صوفیان در حالتی که $C_3S < ۵۰$ باشد:

$$R_{28}=\frac{522\,C_3S+99\,C_2S+865\,C_3A+480\,C_4AF}{C_3S+C_2S+C_3A+C_4AF}+0.01B \qquad (٤-۲)$$

به‌عنوان مثال برا ی سیمان نوع ۲ تهران با مشخصات زیر:

$C_3S = 49/6$، $C_2S = 24/3$، $C_3A = 6$

$C_4AF = 11/5$، $B = 3230$

مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه سیمان $۴۳۷\,kg/cm^2$ بدست می‌آید. این مقدار با اندازهٔ واقعی آن ($۴۳۱\,kg/cm^2$) فقط ۱/۵ درصد اختلاف دارد.

در همهٔ فرمول‌های فوق مخرج کسر مجموع فازهای تشکیل دهندهٔ سیمان می‌باشد که به‌دلیل افت حرارتی هیچ وقت برابر ۱۰۰ نمی‌باشد.

ضرایب a و b و c و d و e با الهام از روش‌های آزمون- خطا بدست آمده‌اند و دقت آنها در حد قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که با جایگذاری نتایج آزمایش‌های انجام یافته در این پژوهش، شامل فازهای C_3S و C_2S و C_3A و C_4AF در فرمول اساسی Bogue و محاسبه مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات سیمان ($R_{۲۸}$) و مقایسه آن با مقدار واقعی بدست آمده، ملاحظه می‌گردد دقت رابطهٔ Bogue در حد ۴۰ ± درصد بوده و نیز نرمی سیمان در رابطهٔ فوق منظور نگردیده است.

چنانکه از فرمول‌های فوق برمی‌آید هرچه نرمی سیمان بیشتر باشد مقاومت فشاری آن نیز بیشتر خواهد شد؛ زیرا هیدراتاسیون سیمان سریعتر صورت گرفته و باعث افزایش سریع مقاومت می‌گردد. البته برای تولید سیمانی با نرمی بیشتر هزینهٔ آسیا کردن بالا رفته و مقدار گچ مورد نیاز نیز افزایش پیدا خواهد کرد. از این‌رو، در کارخانجه‌های سیمان آسیاها را طوری تنظیم می‌نمایند که نرمی سیمان در حد معمول و استاندارد باشد.

ارائهٔ فرمول‌های تجربی در ارتباط با فازهای

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤ حدود تغییرات ضرایب a و b و c و d و e

ضرایب / نوع سیمان	a	b	c	D	e
سیمان نوع ۲ تهران	٤٦٣≈٤٨٧	١١١≈١١٧	٨٤٣≈٨٨٧	٤٦٨≈٤٩٢	٠/٠٠٩٩≈٠/٠١٠١
سیمان نوع ۲ صوفیان $50 > C_3S$	٤٦٣≈٤٨٧	١٢٤≈١٣٠	٨٤٣≈٨٨٧	٤٦٨≈٤٩٢	٠/٠٠٩٨≈٠/٠١٠٢
سیمان نوع ۲ صوفیان $50 < C_3S$	٥٠٩≈٥٣٥	٩٧≈١٠١	٨٤٣≈٨٨٧	٤٦٨≈٤٩٢	٠/٠٠٩٨≈٠/٠١٠٢
سیمان نوع ٥ تهران	٤٨٥≈٥٠٩	١٣٦≈١٤٢	٦٦٤≈٦٩٨	٣٩١≈٤١١	٠/٠٠٩٧≈٠/٠١٠٣

تشکیل دهندهٔ سیمان و نرمی آن با مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ سیمان، شاید برای محققین و نیز، کارخانه‌های سیمان قدمی باشد تا در تعیین درصد مواد خام و نوع آسیا و پخت به منظور رسیدن به مقاومت فشاری مطلوب از آن استفاده نمایند. بدیهی است در فرمول‌های تجربی حدودی را باید در نظر گرفت که در آن حدود دامنهٔ کاربرد فرمول‌ها صحیح باشد. ارائهٔ فرمول تجربی به نحوی که بتوان دقیقاً به جواب آزمایشگاهی نائل شد اگر امکان‌پذیر هم نباشد، دور از انتظار است.

در تولید سیمان افزون بر فازهای مندرج در این پژوهش ترکیبات دیگری مانند آهک آزاد، اکسید منیزیم، اکسید پتاسیم، اکسید سدیم و اکسیدهای دیگر به عنوان اجزای فرعی تولید می‌شوند که درصد آنها طبق آئین‌نامه‌های استاندارد ایران نباید از حدود مجازی بیشتر باشد. این شرایط در همه آزمونه‌ها مورد توجه بوده‌اند.

در ادامه این پژوهش می‌توان رابطهٔ بین فازهای تشکیل دهندهٔ سیمان با مقاومت فشاری سه ماهه و یک ساله سیمان و نیز، ارتباط بین مدول‌های سیلیس و آلومینیم بامقاومت فشاری و همچنین اثر عوامل شیمیایی و فیزیکی دیگری چون اکسید منیزیم، آهک آزاد،آلکالیها و ... را روی مقاومت فشاری مطالعه نمود و در فرمول‌های ارائه شده وارد کرد[12].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تجربی ارتباط عددی بین مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ سیمان با فازها و نرمی آن برای سه سیمان مختلف (سیمان نوع ۲ تهران، سیمان نوع ٥ تهران و سیمان نوع ۲ صوفیان) باانجام آزمایش‌های متعددی نشان داده شده است. با استفاده از روابط تجربی ارائه شده که در واقع تکمیل کننده روابط Bogue می‌باشند، می‌توان با در دست داشتن درصد فازها و نیز نرمی سیمان، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن را برای سیمان‌های کارخانه‌های یادشده با دقت قابل قبولی تعیین نمود.

تشکر و قدردانی

از کارکنان کارخانه‌های سیمان تهران و صوفیان بویژه آقای مهندس شریفیان از کارخانه سیمان تهران و آقای مهندس سعیدی از کارخانهٔ سیمان صوفیان صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست نمادها

اکسید کلسیم	CaO	اکسید سدیم	Na_2O
اکسید سیلیسیم	SiO_2	اکسید پتاسیم	K_2O
اکسید آلومینیم	Al_2O_3	سطح مخصوص ذرات سیمان	S
اکسید آهن	Fe_2O_3	ضریب ثابت دستگاه بلین	K
اکسید گوگرد	SO_3	زمان لازم برای عبور هوا در دستگاه بلین	t
اکسید منیزیم	MgO		

مراجع

۱. فامیلی، هرمز، " خواص بتن "، بازنگری چهارم، ابوریحان بیرونی، چاپ اول (۱۳۷۸).

۲. دیلمقانی، صمد، " تکنولوژی بتن "، دانشگاه تبریز، چاپ چهارم، (۱۳۸۰).

۳. عزیزیان، محمدرضا، " تکنولوژی سیمان "، سیمان اکباتان، (۱۳۷٤).

٤. عزیزیان، محمدرضا، " تکنولوژی پخت سیمان، شرکت قطعات مهندسی سیمان "، (۱۳٦٥).

٥. آیین‌نامه شماره ۳۹۳ استاندارد ایران، " روش آزمایش مکانیکی سیمان‌ها- تاب فشاری و خمشی ملات خمیری "، چاپ ششم، (۱۳٦۳).

٦. آیین‌نامه شماره ۱٦۹۲ استاندارد ایران، " تجزیه شیمیایی سیمان- اندازه‌گیری عناصر اصلی سیمان پرتلند "، چاپ اول.

۷. شریفیان، جواد، پخت کلینگر پرتلند و کیفیت آن، کارخانهٔ سیمان تهران، (۱۳۷۰).

8. Gani. M. S. J, "*Cement and Concrete*", Chapman & Hall, (1997).

9. Gartner. E. M, Grace. W. R, Uchikawa. H., "*Cement Technology*", Onoda. (1994).

10. Taylor. H. W. F, "*Cement Chemistry*", Tomas Telford. (1997).

۱۱. طائب، عباس و کوهی، فرشته، " سیمان "، انتشارات مرکز تحقیقات سیمان، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۷٤).

۱۲. مهدی‌زاده، م،" بررسی اثر ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان بر روی مقاومت‌های مکانیکی سیمان "، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، مرداد (۱۳۷۲).

www.SID.ir