بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده با پوزولان‌های سیرجان و گدارسرخ (کرمان) و مقایسه آن با بتن کنترل

علی اکبر مقصودی
استادیار
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کرمان

علی اکبر رمضانیانپور
استاد
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سید عباس پوریعقوبی
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کرمان

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی خواص مهندسی و پایایی (دوام) بتن‌های ساخته شده با پوزولان‌های منطقه کرمان موسوم به پوزولان‌های سیرجان و گدارسرخ و سیمان‌های نوع I , II و V کارخانه سیمان کرمان و مقایسه با بتن کنترل (بدون پوزولان) است. ابتدا میزان فعالیت پوزولانی هر یك از پوزولان‌ها با روش‌های ترموگراویمتری و مقاومتی برآورد شده است، سپس جهت تعیین مقدار مناسب جایگزینی پوزولان‌های مزبور مخلوط‌های مختلف بتن با صفر تا ۴۰ درصد وزنی سیمان از پوزولان‌ها ساخته شده و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه مقدار بهینه جایگزینی پوزولان‌ها ۱۵ تا ۴۰ درصد وزنی سیمان (برای ۶ حالت بررسی شده) تعیین گردیده است. مقاومت فشاری بتن با ساخت نمونه‌های مختلف با درصد بهینه جایگزینی پوزولان‌ها و انجام آزمایش مقاومت فشاری برای دو شرط عمل‌آوری، یکی در آب و دیگری در هوای مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. همزمان با ساخت نمونه‌های فشاری، نمونه‌های مختلف بتن و ملات جهت انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، انقباض در سنین مختلف تا ۱۸۰ روز ساخته شد. همچنین جهت بررسی دوام بتن برای دو شرط محیطی، یکی در آب معمولی و دیگری در آب حاوی ۵ درصد سولفات سدیم نمونه‌های مختلف ملات برای انجام آزمایشات مقاومت فشاری، انبساط طولی و بررسی شکل ظاهری نمونه در سنین مختلف تا ۱۸۰ روز ساخته شد. با توجه به نتایج آزمایشات، جایگزینی نسبی پوزولان‌های سیرجان و گدارسرخ سبب بهبود کیفیت و خصوصیات مکانیکی بتن شده و همچنین دوام بتن را در محیط سولفاتی با افزایش مقاومت فشاری بهبود می‌بخشد. افزایش قابل ملاحظه انبساط نمونه‌های مختلف ملات‌های حاوی پوزولان‌های سیرجان و گدار سرخ در هر دو شرایط محیطی آب معمولی و آب حاوی سولفات می‌تواند بسته به کاربرد بتن حاوی پوزولان‌های مزبور، مفید یا مضر باشد.

Engineering Properties and Durability of Concretes Made with Sirjan and Godarsorkh Pozzolans in Comparison with the Control Concrete

A.A. Maghsoudi
Assistant Professor
Dept. of Civil Eng. Kerman Univ.

A. A. Ramezanianpour
Professor
Dept. of Civil Eng .Amirkabir Univ. of Tech.

S. A. Pour Yaghoubi
M.Sc. Student
Dept. of Civil Eng. Kerman Univ.

Abstract

The purpose of this investigation is to study the engineering properties and durability of concretes made with sirjan and Godarsorkh pozzolans of Kerman province and Type I,II and V portland cements in comparison with the control concrete.

The first step was to evaluate the pozzolanic activity of these pozzolans by means of termogravimetry and strength methods. In the next step inorder to determine the replacement level, Mixtures with 0 to 40 percent replacement of cement with pozzolans by weight were made and the compressive strength at 3,7 and 28 days showed that the optimum replacement level for different pozzolans (for 6 cases) was between 15 and 40 percent. With the optimum replacement level concrete and mortar mixtures were prepared and the compressive strength, flexural strength , modulus of elasticity and the shrinkage of these mixtures at moist and air curing conditions up to 180 days were determined. The durability of concretes in water and in 5 percent sulphate solution were assessed by comparison of compressive strentgh, expansion and visual inspection of the specimens up to 180 days of age.

The results show that replacing cement with the sirjan and Godarsorkh pozzolans can improve the mechanical properties and the durability in the sulphate solution of concretes. Howevre the increase in the expansion of mortars made with these two pozzolans in normal water and in sulphate solution is related to the application of their concretes and can be either useful or not.

۱ـ مقدمه

پوزولان های طبیعی در طبیعت فراوان یافت می شوند و خوشبختانه در کشور ما نیز معادن غنی و متعدد پوزولان وجود دارد که در این میان می توان از معادن تراس جاجرود، سبلان، میانه، بستان آباد، تفتان، سیرجان و گدارسرخ کرمان نام برد. به طور کلی بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن با به کارگیری پوزولان ها، باعث شده است این ماده در دنیا به عنوان جایگزین سیمان رواج پیدا کند. متأسفانه تاکنون در کشور ما بر روی پوزولان های طبیعی، به عنوان جایگزین نسبی سیمان تحقیقات قابل توجهی انجام نگرفته است.

در این تحقیق ابتدا به منظور تعیین ضریب فعالیت پوزولانی اقدام به دو روش آزمایشی، روش ترموگراویمتری (TG) و روش مقاومتی براساس ASTM C 311-90 [۱۳] گردیده است. نتایج به دست آمده از روش دوم نشان می دهد که پوزولان گدارسرخ دارای شاخص فعالیت مقاومت (Strength Activity Index) بیشتری نسبت به پوزولان سیرجان است [۹] که این نتیجه با نتایج به دست آمده از آزمایش روش ترموگراویمتری تا حدودی سازگاری دارد، و سپس اقدام به تعیین مقدار درصد مناسب جایگزینی پوزولان های منطقه کرمان موسوم به پوزولان های سیرجان و گدار سرخ به صورتی که در اینجا توضیح داده شده، گردیده است وبر این اساس خواص مهندسی و دوام بتن ها در سنین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲ـ آزمایش تعیین درصد بهینه مقدار جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات مشخصی روی میزان قابل قبول و مناسب جایگزینی پوزولان های کرمان باسیمان صورت نگرفته است، لذا جهت انتخاب بهترین و مناسب ترین مقدار مصرف پوزولان های کرمان (برای دو نوع سیرجان و گدار سرخ) نمونه های مختلف بتنی با درصدهای اختلاط مختلف ساخته شد. آنچه که به عنوان معیار جهت تعیین بهینه جایگزینی مد نظر قرار گرفته است، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن های حاوی درصدهای مختلف سرباره با اسلامپ ثابت می باشد. بر این اساس بتن هایی شامل ۱۵،۱۰،۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰

درصد پوزولان با اسلامپ ثابت ۵۰ میلیمتر ساخته شد وسپس در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری نمونه های تهیه شده تعیین و بر مبنای مقاومت فشاری ۲۸ روزه مناسب ترین درصد جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ با سیمان ۱۵ تا ۴۰ درصد تعیین گردید که نتایج در جدول شماره (۱) آمده است.

همانگونه که نتایج آزمایشات نشان داده است [۹] فعالیت پوزولانی در سنین پایین چندان چشمگیر نیست و بنابراین برای قضاوت مطمئن تر در مورد عملکرد پوزولان ها نیاز به انجام آزمایشات در سنین بالاتر می باشد.

هر یک از انوع مخلوط های بتنی ساخته شده با علامت اختصاری ABCD نشان داده شده است. علامت A نشان دهنده نوع پوزولان می باشد که پوزولان سیرجان با حرف S و پوزولان گدار سرخ با حرف G نشان داده شده است. علامت B نشان دهنده نوع سیمان (V, II, I) و عدد دو رقمی CD نشان دهنده درصد جایگزینی سیمان با پوزولان می باشد. به عنوان مثال علامت SII15 بیانگر نمونه ای است که با ۱۵ درصد جایگزینی پوزولان سیرجان با سیمان نوع II تهیه گردیده است. در حالی که نمونه های شاهد فقط با نوع سیمان (V, II, I) مشخص گردیده اند.

جدول (۱) درصد بهینه جایگزینی سیمان های نوع ۱، ۲ و ۵ با پوزولان های سیرجان و گدارسرخ

نوع سیمان	نوع پوزولان	درصد بهینه	علامت اختصاری
۱	سیرجان	۱۵	SI 15
۱	گدارسرخ	۲۵	GI 25
۲	سیرجان	۱۵	SII 15
۲	گدارسرخ	۲۵	GII 25
۵	سیرجان	۲۰	SV 20
۵	گدارسرخ	۴۰	GV 40
۱	بدون پوزولان	۰	I
۲	بدون پوزولان	۰	II
۵	بدون پوزولان	۰	V

پس از تعیین مقدار بهینه جایگزینی برای ۹ حالت قید شده در جدول شماره (۱)، برخی از خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با ساخت نمونه های مکعبی بتنی و ملات شامل مقدار بهینه جایگزینی با انجام آزمایشات دراز مدت زیر مورد بررسی قرار گرفت:

- تعیین مقاومت های فشاری (۱۰×۱۰×۱۰ Cm) و خمشی و(۴۵ × ۱۰ × ۱۰ Cm) نمونه های مختلف بتنی براساس آیین نامه BS [۱۴] در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز در دو شرایط عمل آوری یکی در آب و دیگری در هوای با رطوبت نسبی ۷۵٪ برای آزمایش های فشاری و فقط عمل آوری در آب برای نمونه های خمشی.
- تعیین مدول الاستیسیته نمونه های مختلف بتنی (۴۵×۱۰×۱۰Cm) با توجه به نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۹۰ روزه به نحوی که توضیح داده شده است.
- تعیین میزان انقباض و انبساط (در محیط آب و محیط سولفاتی) نمونه های ملات کنترل (۲۸×۲/۵×۲/۵ Cm) و ملات های ساخته شده با درصد بهینه جایگزینی تا سن ۱۸۰ روزه.
- تعیین مقاومت فشاری نمونه های مختلف ملات (۵×۵×۵ Cm) با انجام آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۲۸,۷، ۹۰ و ۱۸۰ روز در دو شرط محیطی، آب و محیط سولفاتی.
- بررسی شکل ظاهری نمونه های ملات نگهداری شده در آب حاوی ۵٪ سولفات سدیم با PH ثابت بین ۶ تا ۸.

گزارش کامل آزمایشهای انجام شده در جای دیگری آمده است [۹]، لیکن اجزاء طرح مخلوط های بتنی و ملات ها در جدول (۲) قید شده است.

۳- آزمایش های تعیین مقاومت فشاری بتن و نتایج آن

مقاومت فشاری بتن هنوز به عنوان یکی از مهمترین خواص بتن در نظر گرفته می شود، در صورتی که در عمل در اغلب موارد، مشخصات دیگری از بتن، نظیر پایایی (دوام)، نفوذپذیری و پایداری حجمی اهمیت بیشتری دارند. به هر حال مقاومت بتن معمولاً شمای کلی از کیفیت بتن را به دست می دهد و علت این امر آن است که مقاومت، مستقیماً به ساختمان خمیر سیمان بستگی دارد [۱].

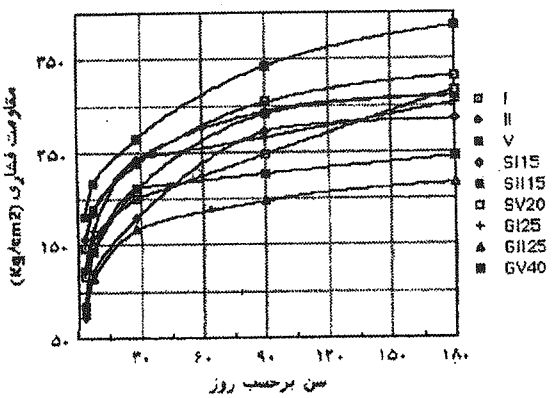
برای آزمایش مقاومت فشاری مخلوط های مختلف بتن، اقدام به ساخت ۲۱۶ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر (۲ نمونه برای هر یک از سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه با در نظر گرفتن دو

شرط عمل آوری و ۹ حالت مختلف) گردیده است. شایان ذکر است در طی آزمایشات انجام شده موارد نادری که اختلاف نتایج حاصله بین دو نمونه بیشتر از ۱۰ درصد بوده،آزمایشات تکرار شده است."شکل های شماره (۱) و (۲) نتایج را به صورت نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی بر حسب سن برای هر ۹ حالت در دو شرایط عمل آوری با آب معمولی و در هوای مرطوب (پس از سه روز نگهداری اولیه در آب) نشان می دهد.

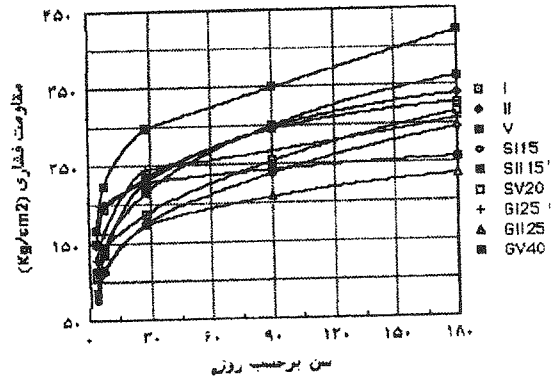
همانگونه که در شکل های شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است، در همه سنین و در اغلب حالات، مقاومت فشاری نمونه های عمل آورده شده در هوای مرطوب (۸۰ ـ ۷۵٪) با استفاده از پوشش کنفی تا حدودی بیشتر از مقاومت فشاری نمونه های مشابه عمل آورده شده در آب با دمای متوسط ۲۳ درجه سانتیگراد است. طبق تجربیات موجود در این زمینه [۱]، مقدار اختلاف در مقاومت فشاری برای شرایط عمل‌آوری (نگهداری نمونه در آب و نگهداری نمونه با پوشش کنفی) به مقدار آب به سیمان مخلوط بستگی دارد. این اختلاف برای نسبت آب به سیمان کمتر (حدود ۰/۳) زیاد بوده و برای نسبت آب به سیمان بیشتر (حدود ۰/۴) کم می باشد، با توجه به اینکه برای ساخت نمونه ها نسبت آب به سیمان در حدود ۰/۵ بوده است، لذا اختلاف ناچیز (حدود ۲ تا ۳ درصد) به دست آمده برای مقاومت فشاری در دو شرط عمل‌آوری قابل توجیه است. همچنین اختلاف دما بین دو شرایط عمل‌آوری نیز می تواند عامل مؤثر دیگری در بوجود آوردن اختلاف در مقاومت فشاری بین دو شرایط عمل‌آوری باشد.

جدول (۲) اجزاء مخلوط های مختلف بتن و ملات تهیه شده از سیمان های نوع I,II و V و پوزولان های سیرجان و گدار سرخ

نام پوزولان	نوع سیمان	درصد جایگزینی	مقدار سیمان(Kg)	مقدار پوزولان (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)
–	I	صفر	۳۷۲	صفر	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۹۰
–	II	صفر	۳۷۲	صفر	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۸۷
–	V	صفر	۳۷۲	صفر	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۸۲
سیرجان	I	۱۵	۳۱۶/ ۲	۵۵/ ۸	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۹۷
سیرجان	II	۱۵	۳۱۶/ ۲	۵۵/ ۸	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۹۴
سیرجان	V	۲۰	۲۹۷/ ۶	۷۴/ ۴	۱۰۰۵	۷۷۴	۱۹۲
گدارسرخ	I	۲۵	۲۷۹/۰	۹۳/ ۰	۱۰۰۵	۷۷۴	۲۰۸
گدارسرخ	II	۲۵	۲۷۹/۰	۹۳/ ۰	۱۰۰۵	۷۷۴	۲۰۳
گدارسرخ	V	۴۰	۲۲۳/۲	۱۴۸/ ۸	۱۰۰۵	۷۷۴	۲۱۴
–	I	صفر	۳۷۲/۰	صفر	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
–	II	صفر	۳۷۲/۰	صفر	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
–	V	صفر	۳۷۲/۰	صفر	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
سیرجان	I	۱۵	۳۱۶/ ۲	۵۵/ ۸	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
سیرجان	II	۱۵	۳۱۶/۲	۵۵/ ۸	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
سیرجان	V	۲۰	۲۹۷/۶	۷۴/ ۴	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
گدارسرخ	I	۲۵	۲۷۹/۰	۹۳/ ۰	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
گدارسرخ	II	۲۵	۲۷۹/۰	۹۳/ ۰	–	۷۷۴	۲۲۳/۲
گدارسرخ	V	۴۰	۲۲۳/۲	۱۴۸/ ۸	–	۷۷۴	۲۲۳/۲



شکل (۱) نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتنی برای مخلوط های مختلف بر حسب زمان (عمل آوری در آب)



شکل (۲) نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتنی برای مخلوط های مختلف بر حسب زمان (عمل آوری در هوای مرطوب)

در یک بررسی کلی با توجه به رشد مقاومت در سنین پایین (تا ۲۸ روز) می توان چنین نتیجه گرفت که مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با پوزولان گدار سرخ در سنین اولیه از آهنگ رشد بالاتری نسبت به نمونه های ساخته شده با سیمان خالص برخوردار بوده و در این حال نمونه های ساخته شده با پوزولان سیرجان دارای آهنگ رشد بیشتر در سنین بعدی می باشد. در حالی که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۱۸۰ روز مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با پوزولان گدار سرخ و سیرجان به ترتیب از آهنگ رشد کمتر و بالاتری برخوردار است. این اختلاف رفتار در دو نوع پوزولان مزبور نشان می دهد که با آزمایشات مقاومتی کوتاه مدت (تا ۲۸ روز) نمی توان به ارزیابی صحیحی از خصوصیات مقاومتی بتن های ساخته شده با سیمان پرتلند - پوزولان دست یافت. این نتیجه بار دیگر تأییدی بر این موضوع است که تعیین درصد بهینه پوزولان بر اساس مقاومت های دراز مدت می تواند با اطمینان بیشتری همراه باشد.

به منظور ارزیابی اهداف دراز مدت، نسبت های مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف محاسبه و نتایج آن در جدول شماره (۳) آمده ست.

جدول (۳) مقادیر نسبت مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با سیمان پرتلند- پوزولان به مقاومت فشاری نمونه های شاهد (درصد)

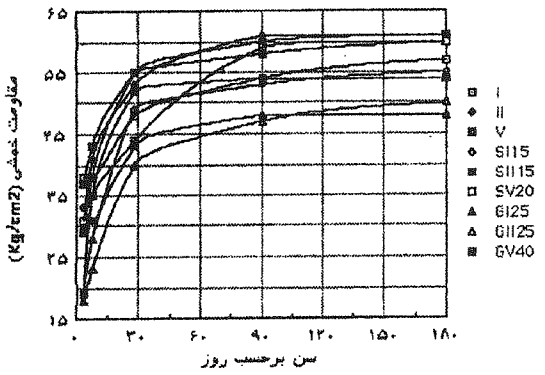
نوع نمونه	شرایط عمل آوری	سن بتن بر حسب روز				
		۳	۷	۲۸	۹۰	۱۸۰
SI15	در آب	۴۹	۶۴	۷۶	۸۹	۸۶
SI15	در هوای مرطوب	۵۱	۵۸	۷۵	۸۱	۹۰
SII15	در آب	۷۸	۷۷	۸۷	۹۹	۱۰۰
SII15	در هوای مرطوب	۷۶	۷۳	۹۳	۱۰۰	۱۰۶
SV20	در آب	۶۵	۷۲	۷۶	۷۲	۷۸
SV20	در هوای مرطوب	۶۳	۶۴	۶۳	۷۳	۷۵
GI25	در آب	۸۳	۸۸	۱۰۲	۸۸	۹۱
GI25	در هوای مرطوب	۸۷	۸۴	۱۰۴	۹۱	۹۳
GII25	در آب	۵۱	۶۱	۶۹	۶۷	۷۰
GII25	در هوای مرطوب	۵۴	۵۸	۷۵	۷۰	۶۹
GV40	در آب	۴۷	۶۶	۸۰	۶۶	۶۳
GV40	در هوای مرطوب	۵۰	۶۰	۷۶	۷۰	۶۱

نتایج جدول (۳) نشان می دهد که مقاومت فشاری نمونه های بتنی ساخته شده با پوزولان سیرجان - سیمان پرتلند طی یک روند نسبتاً یکنواخت و در عین حال سریع تر از روند افزایش مقاومت فشاری نمونه های شاهد افزایش می یابد. به عنوان مثال نمونه SI15 در شرایط عمل آوری با آب که در سه روز اول ۴۹ درصد مقاومت فشاری نمونهٔ شاهد را داراست، در سن ۱۸۰ روزه، ۸۶ درصد مقاومت نمونهٔ شاهد را خواهد داشت. در حالی که مقاومت فشاری نمونه های بتنی ساخته شده با پوزولان گدارسرخ - سیمان پرتلند چنین روند افزایشی را نشان نمی دهد. به عنوان مثال نمونهٔ GI25 در شرایط عمل آوری با آب که در سه روز اول، مقاومت قابل توجهی (۸۳ ٪) را کسب کرده، در سن ۲۸ روزه این مقدار به ۱۰۲٪ رسیده، لیکن در سن ۱۸۰ روزه افزایش

کمی داشته و به ۹۱٪ رسیده است. از مقایسه نتایج به دست آمده برای دو نمونه مذکور می توان چنین نتیجه گرفت که هر چند پوزولان سیرجان در کسب مقاومت کوتاه مدت به طور قابل توجهی ضعیف تر از پوزولان گدار سرخ عمل می کند ولی همانگونه نتایج به دست آمده برای این دو نمونه در سن ۹۰ و ۱۸۰ روز نشان می دهد، چنین ضعفی در سنین بالاتر از ۹۰ روز مطلقاً از بین می رود. چنین رفتاری برای پوزولان سیرجان در مقایسه با پوزولان گدارسرخ یک برتری به شمار می آید. زیرا روند کند کسب مقاومت در نمونه های ساخته شده با پوزولان سیرجان ـ سیمان پرتلند در مقایسه با روند تند کسب مقاومت در نمونه های ساخته شده با پوزولان گدار سرخ ـ سیمان پرتلند نشان دهنده کنترل موفقیت آمیز حرارت هیدراتاسیون است که عواقب ناشی از آن، نظیر ترکهای حرارتی از مشکلات عمده و مهم سازه های بتنی حجیم می باشد. برای شرایط عمل آوری در هوا نیز از نظر کیفی نتایج یکسانی حاصل می شود.

٤ـ آزمایش های تعیین مقاومت خمشی بتن و نتایج آن

بدین منظور اقدام به ساخت ۱۰۸ نمونه منشوری به ابعاد ۱۰×۱۰×۴۵ سانتیمتر (۲ نمونه برای هر یک از سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه، با در نظر گرفتن ۹ حالت مختلف و در شرایط عمل آوری با آب) گردیده است. لازم به یادآوری است که این نمونه ها از همان مخلوط تهیه شده برای نمونه های فشاری و همزمان با آن ساخته شده است، و مقادیر میانگین آنها در شکل (۳) به صورت نمودار نشان داده شده است.

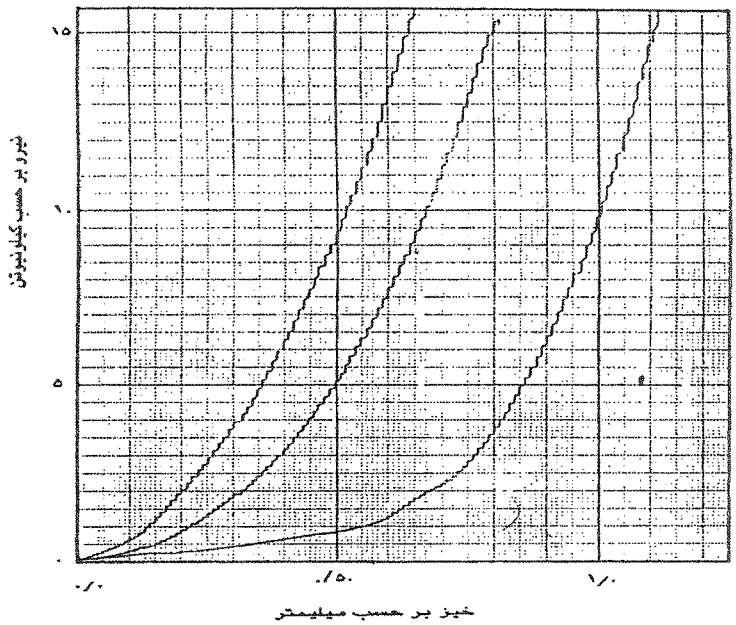


شکل (۳) نمودار تغییرات مقاومت خمشی نمونه های بتنی برای مخلوط های مختلف برحسب زمان (عمل آوری در آب)

از نتایج به دست آمده معلوم می شود که آهنگ رشد مقاومت خمشی همانند مقاومت فشاری با گذشت زمان کاهش می یابد. نتایج به دست آمده در فاصله زمانی ۷ تا ۲۸ روز نشان می دهد که آهنگ رشد مقاومت خمشی برای نمونه های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند ـ پوزولان، در اغلب حالات بیش از میزان آن برای نمونه های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند خالص است. در حالی که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰روزه در اغلب حالات، عکس این موضوع روی داده است. همچنین در سنین بالاتر تمامی آزمایشات از آهنگ رشد محسوسی برخوردار نیستند. نتایج به دست آمده در زمانهای ۳ تا ۲۸ روز و ۲۸ تا ۱۸۰ روز برای نمونه های SV20 و GV40 نشان می دهد که برای سیمان پرتلند ضد سولفات (نوع ۵) تغییر در نوع پوزولان می تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار مقاومتی داشته باشد. چون آزمایش مقاومت خمشی می تواند با خطای بیشتری نسبت به آزمایش مقاومت فشاری همراه باشد، بنابر این قطعیت چنین نتیجه ای به تکرار آزمایشات نیاز دارد.

۵ـ آزمایش های تعیین مدول الاستیسیته و نتایج آن

به منظور انجام این آزمایش از دستگاه مدرن موجود در آزمایشگاه بتن (دانشگاه شهید باهنر کرمان) استفاده شده است، این دستگاه قادر به رسم منحنی نیرو ـ افت برای تیرهای خمشی با بارگذاری دو نقطه ای می باشد [۹]. نمونه ای از این منحنی ها که توسط چاپگر دستگاه رسم شده است در شکل (۴) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است برای نیروهای کمتر از KN ۵ رابطه غیرخطی بین نیرو و افت حاکم است. ولی برای نیروهای بیشتر از KN ۵ این رابطه تقریباً خطی است. به نظر می رسد دلیل غیر خطی بودن رابطه مزبور در مراحل اولیهٔ آزمایش ناشی از ناصاف بودن سطح نمونه است که منجر به غیریکنواختی درمحل تماس سطح نمونه با جک می گردد، بنابر این جهت محاسبه ضریب ارتجاعی از قسمت خطی منحنی استفاده شده است که گزارش کامل نحوه محاسبات و مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش BS در مرجع [۹] آمده است، ولی در اینجا نتایج حاصل از محاسبات در جدول (۴) درج گردیده است.



شکل (۴)نمودار نیرو ـ خیز تیر خمشی تحت اثر دوبار متمرکز

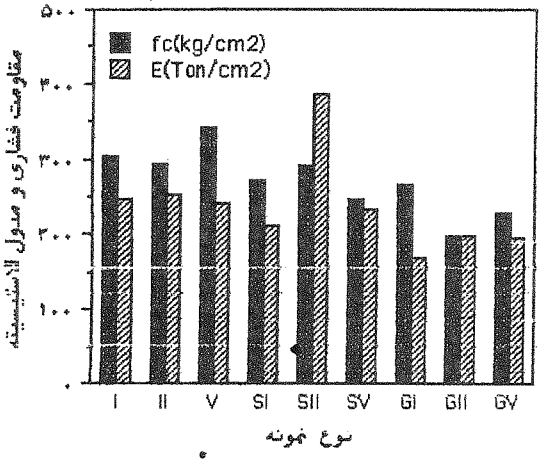
جدول (۴) مدول الاستیسیته نمونه های بتنی مختلف در سن ۹۰ روزه

نوع نمونه	DP	dl	d 2	E(Ton/cm^2)	متوسطE(Ton/cm^2)
I	۱۳۹۸۹	۰/۶۵	۰/۹۳	۲۵۴/۶	۲۴۷
	۱۱۲۳۴	۰/۲۸	۰/۵۲	۲۳۸/۵	
II	۱۵۱۹۸	۰/۳۱	۰/۶۴	۲۳۴/۷	۲۵۲
	۱۴۷۵۷	۰/۲۱	۰/۴۹	۲۶۸/۶	
V	۱۴۱۲۳	۰/۲۵	۰/۵۵	۲۳۹/۹	۲۴۱
	۱۱۴۲۶	۰/۴۸	۰/۷۲	۲۴۲/۶	
SI	۱۰۴۰۸	۰/۳۱	۰/۶۱	۱۷۶/۸	۲۱۱
	۱۳۹۴۱	۰/۲۵	۰/۵۴	۲۴۵/۰	
SII	۱۵۶۵۹	۰/۳۳	۰/۵۴	۳۸۰/۱	۳۸۵
	۱۳۷۹۷	۰/۴۵	۰/۶۳	۳۹۰/۷	
SV	۱۴۵۸۴	۰/۲۲	۰/۵۴	۲۳۲/۳	۲۳۳
	۱۴۲۴۸	۰/۲۴	۰/۵۵	۲۳۴/۳	
GI	۹۸۹۰	۰/۵۰	۰/۸۱	۱۶۲/۶	۱۶۷
	۱۰۴۷۵	۰/۳۵	۰/۶۶	۱۷۲/۲	
GII	۱۰۹۷۶	۰/۲۷	۰/۵۶	۱۹۲/۹	۱۹۸
	۹۹۷۶	۰/۲۷	۰/۵۲	۲۰۳/۴	
GV	۱۰۳۹۸	۰/۳۹	۰/۶۴	۲۱۲/۰	۱۹۶
	۱۰۶۲۹	۰/۴۴	۰/۷۴	۱۸۰/۶	

d1 ـ خیز نمونه برای بارگسیختگی d2 ـ خیز نمونه برای بار ۵ کیلو نیوتن DP اختلاف بار گسیختگی و بار ۵ کیلو نیوتن

شکل (۵) نتایج جداول (۴) و مقاومت فشاری را جهت مقایسه مدول الاستیسیته نمونه های مختلف بتن با مقاومت فشاری مشابه را نشان می دهد.

شکل (۵) به وضوح نشان می دهد که برای نمونه های GV, SV, GII, SII مدول الاستیسیته نمونه های بتنی حاوی پوزولان در مقایسه با مقاومت فشاری بیشتر از مدول الاستیسیته نمونه های بتنی مشابه شاهد است و این در حالی است که برای نمونه های SIو GI خلاف این موضوع اتفاق افتاده است. چنین نتیجه ای بیانگر این است که قضاوت در مورد مدول الاستیسیته بتن های حاوی پوزولان نه تنها به نوع پوزولان، بلکه به نوع سیمان نیز بستگی دارد. با مقایسه نسبت مدول الاستیسیته نمونه های مختلف بتنی به مقاومت فشاری نمونه های مشابه (n) و مدول الاستیسیته نمونه های شاهد (m)، می توان این موضوع را به طور کمی بررسی کرد. مقادیر فوق الذکر (n) و (m) محاسبه و نتایج در جدول (۵) درج گردیده است.



شکل (۵) مقاومت فشاری (Kg/Cm^2) و مدول الاستیسیته (Ton/Cm^2) برای نمونه های مختلف بتنی در سن ۹۰ روز و در شرایط عمل آوری با آب

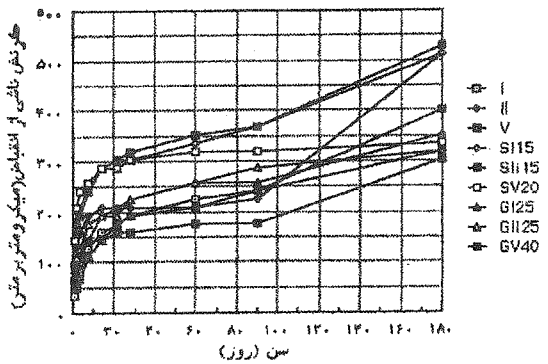
جدول (۵) نسبت مدول الاستیسیته نمونه های مختلف بتنی حاوی پوزولان به مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه های شاهد (m,n) در سن ۹۰ روز

نوع نمونه	I	II	V	SI	SII	SV	GI	GII	GV
n	۸۱۳	۸۵۷	۷۰۳	۷۷۶	۱۳۲۳	۹۴۰	۶۲۸	۱۰۰۰	۸۶۳
m	-	-	-	۰/۵۸	۱/۵۳	/۹۷	۰/۶۸	۰/۷۹	۰/۸۱

نتایج جدول (۵) نشان می دهد که قابلیت پوزولان سیرجان در کسب مدول الاستیسیته بیشتر از پوزولان گدار سرخ است. این نتیجه و نتایج به دست آمده در آزمایش های فشاری وخمشی که قبلاً بحث شد تداعی کننده این است که چگونه مقاومت فشاری نمونه های بتنی حاوی پوزولان (مانند نمونه های بتنی بدون پوزولان) سایر خصوصیات بتن، نظیر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را تحت تأثیر قرار می دهد. به همین دلیل است که آزمایش های مقاومت فشاری به صورت متداولترین و معمولترین آزمایش های بتن سخت شده درآمده است.

۶- آزمایش های انقباض و نتایج آن

جهت انجام آزمایش انقباض ملات های مختلف، اقدام به ساخت ۲۴ نمونه منشوری به ابعاد ۲۸×۲/۵×۲/۵ سانتیمتر (۲نمونه برای هر یک از حالت های ۹ گانه و ۲ نمونه برای هر یک از حالت های SI30, GI10) گردیده است. سپس پولکها در سن یک روزه روی نمونه ها نصب شده و در رطوبت نسبی ۷۵٪ و درجه حرارت ۲۱ تا ۲۷ درجه سانتیگراد نگهداری شده اند. میزان انقباض در فواصل مختلف زمانی، توسط کرنش سنج اندازه گیری و متوسط دو قرائت برای هر نمونه به صورت جمع شونده منظور شده است [۹]. نتایج به صورت شکل (۶) نشان داده شده است.



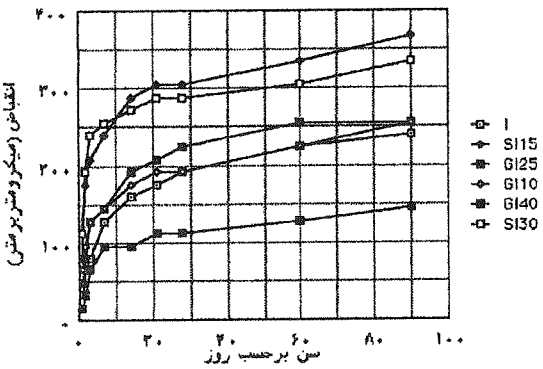
شکل (۶) نمودار کرنش ناشی از انقباض نمونه های مختلف ملات ساخته شده با درصد بهینه جایگزینی سیمان های نوع ۲، ۱ و ۵ با پوزولان های سیرجان و گدارسرخ بر حسب سن نمونه در رطوبت نسبی ۷۵٪

همانگونه که از شکل (۶) مشاهده می شود، نمونه های مختلف حاوی پوزولان دارای انقباض بیشتری نسبت به نمونه های شاهد هستند و در این بین بیشترین انقباض مربوط به پوزولان سیرجان می باشد.

بیشترین نرخ رشد انقباض مربوط به ۲۸ روز اولیه

سن نمونه های بتنی بوده که پس از آن نرخ رشد رو به کاهش می گذارد. البته عوامل مختلفی بر میزان انقباض ناشی از خشک شدن (انقباض در رطوبت نسبی کمتر از ۱۰۰ درصد) مؤثر است که از این میان می توان رطوبت نسبی محیط، نوع دانه های به کا ر رفته در ملات، نسبت آب به سیمان، مدول الاستیسیته مصالح سنگی به کار رفته در بتن و مقدار گیرداری دانه های ملات سخت شده را نام برد. ولی این عوامل، غیر از عامل نسبت آب به سیمان برای تمامی نمونه ها یکسان بوده و نمی توانند در مقایسه میزان انقباض، ملاک قضاوت باشند. عامل مهمی که می تواند باعث این تفاوت در انقباض باشد میزان آب اضافی است که در ملات های حاوی پوزولان برای نیل به کارآیی یکسان به کار رفته است. هرچند این عامل می تواند توجیه کننده میزان انقباض بیشتر ملات های حاوی پوزولان باشد، ولی چنین به نظر می رسد که تنها عامل مؤثرنمی باشد. زیرا با وجود اینکه در ملات های حاوی پوزولان گدار سرخ، بیشتر از ملات های حاوی پوزولان سیرجان آب به کار رفته است، لیکن انقباض کمتری رخ داده است. این خود نشان دهنده این مطلب است که علاوه بر نسبت آب به سیمان، ماهیت پوزولان به کار رفته نیز مؤثر می باشد. چنین اثری را به این صورت می توان بیان کرد که پوزولان سیرجان، آب موجود در ملات را در مقایسه با پوزولان گدار سرخ، همانگونه که به آسانی جذب کرده و بیشتر منبسط می شود (رجوع شود به نتایج آزمایش انبساط) به آسانی نیز از دست داده و بیشتر منقبض می شود. البته چنین قضاوتی می تواند در سنین تا ۱۸۰ روز معتبر باشد، لیکن نتایج در سنین بالاتر از ۱۸۰ روز، این قضاوت را تأیید یا مردود خواهد ساخت، زیرا اگر چنین توجیهی درست باشد باید در سنین بالاتر مقدار آب جذب شده توسط هر دو نوع پوزولان به کار رفته به یک مقدار تعادلی برسد که در این صورت مقدار انبساط در نمونه های حاوی پوزولان گدار سرخ، باید با میزان بیشتری در مقایسه با نمونه های حاوی پوزولان سیرجان رشد کند و همچنین در صورت درست بودن قضاوت فوق، نتایج انقباض باید در سنین بالا نیز نظیر سنین پایین باشد. زیرا کانی های احتمالی موجود در پوزولان گدار سرخ که در درجه حرارت عادی آب جذب می کنند، حاضر نیستند آن را در درجه حرارت عادی پس بدهند. از طرفی چون در سنین بالا انقباض ناشی از کربناتاسیون نیز نتایج اندازه گیری شده را تحت تأثیر قرار خواهد داد، لذا ممکن است بار دیگر قضاوت در مورد انقباض را دچار مشکل سازد. به نظر می رسد انجام آزمایش افت رطوبت در درجه حرارت بالا (۷۰۰ تا ۱۰۰۰) درجه سانتیگراد روی نمونه های حاوی پوزولان های مختلف در سن مشخص و مقایسه نتایج با یکدیگر، می تواند جهت فائق آمدن به این مشکل مفید باشد.

با توجه به اینکه مقدار جایگزینی سیمان پرتلند با پوزولان می تواند در مقدار انقباض نقش داشته باشد، لذا این آزمایش با درصدهای مختلف جایگزینی صورت گرفته و شکل (۷) نتایج این آزمایش را برای سیمان نوع یک با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ نشان می دهد.



شکل (۷) نمودار کرنش ناشی از انقباض نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع I و با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ

همانگونه که شکل (۷) نشان می دهد با افزایش درصد پوزولان در ملات انقباض کمتری حاصل شده است، در حالی که انتظار می رفت با افزایش درصد پوزولان انقباض بیشتری رخ دهد. زیرا برای رسیدن به کارآیی یکسان از نسبت آب به سیمان بیشتری در ملات استفاده شده است. برای تأیید این موضوع که علاوه بر نسبت آب به سیمان عوامل دیگری نیز نظیر مقدار پوزولان در مخلوط، انقباض را تحت تأثیر قرار می دهد، پیشنهاد می شود آزمایش با نسبت آب به سیمان ثابت انجام گیرد.

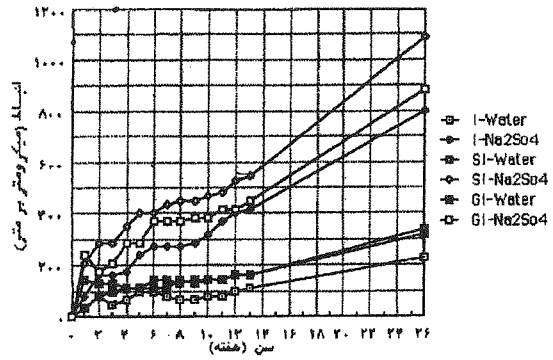
۷ـ آزمایش های انبساط و نتایج آن

جهت انجام این آزمایش اقدام به ساخت ۴۸ نمونهٔ ملات منشوری گردیده است. سپس نمونه هایی همانند نمونه های آزمایش انقباض، بعد از نصب پولک در دو

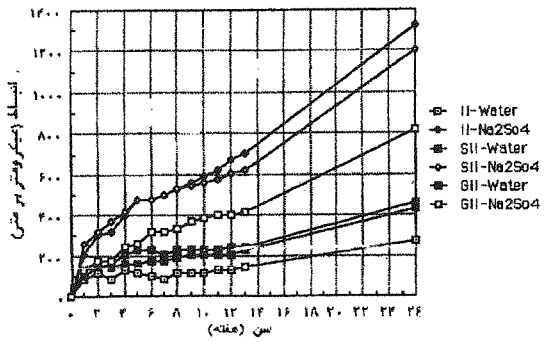
محیط آب معمولی و محیط محلول ۵ درصد سولفات سدیم قرار گرفته است. این نمونه ها همزمان با نمونه های آزمایش انقباض و با ملات یکسان ساخته شده‌اند. میزان انبساط در فواصل مختلف زمانی با کرنش سنج اندازه گیری و متوسط دو قرائت برای هر نمونه به صورت جمع شونده منظور شده است. شکلهای (۸) تا (۱۲) نتایج را به صورت نمودار کرنش ناشی از انبساط برای ملات های مختلف منشوری بر حسب سن نمونه نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از نتایج نسبت کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات در محیط سولفاتی به کرنش ناشی از انبساط نمونه های مشابه در آب معمولی در سنین ۷، ۲۸، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ روز محاسبه و نتایج در جدول (۶) درج گردیده است.

جدول (۶) مقادیر نسبت کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات در محیط سولفات به کرنش ناشی از انبساط نمونه های مشابه در آب معمولی در سنین مختلف

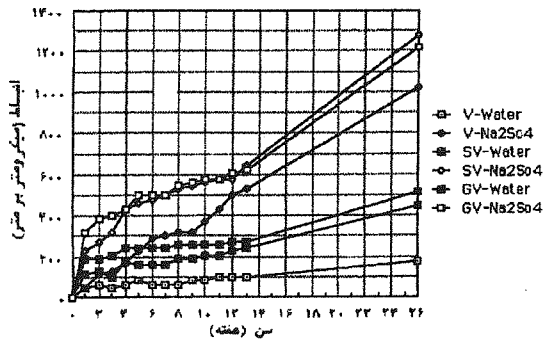
نوع نمونه	سن نمونه (روز)				
	۷	۲۸	۶۰	۹۰	۱۸۰
I	۲/۵	۲/۸	۴/۵	۳/۷	۳/۳
II	۲/۶	۳/۱	۵/۰	۴/۹	۴/۹
V	۱/۰	۲/۸	۴/۰	۵/۵	۵/۸
SI15	۱/۴	۳/۱	۳/۵	۳/۴	۳/۲
SII15	۲/۰	۲/۰	۲/۴	۲/۶	۲/۶
SV20	۲/۰	۲/۵	۲/۸	۲/۷	۲/۹
GI25	۷/۵	۲/۶	۲/۷	۲/۸	۲/۸
GII25	۱/۳	۱/۵	۱/۸	۱/۹	۱/۹
GV40	۱/۷	۱/۸	۲/۲	۲/۳	۲/۴
SI30	۷/۰	۵/۰	۳/۱	۳/۱	۳/۱
GI10	–	۴/۵	۲/۷	۲/۹	۲/۸
GI40	۳/۰	۲/۱	۲/۱	۲/۴	۲/۶



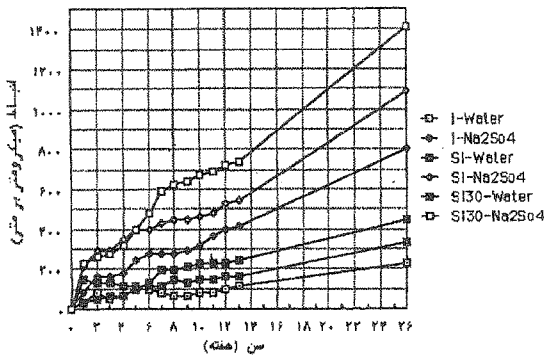
شکل (۸) نمودار کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع I حاوی درصد بهینه جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات سدیم بر حسب سن



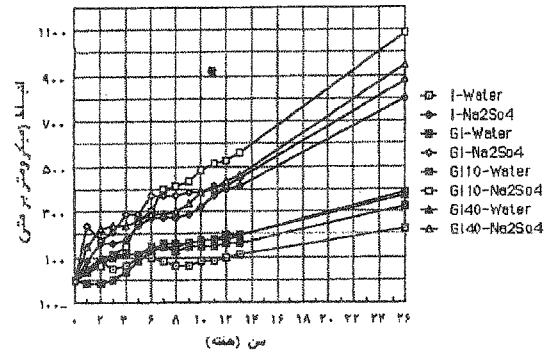
شکل (۹) نمودار کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع II حاوی درصد بهینه جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات سدیم بر حسب سن



شکل (۱۰) نمودار کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع V حاوی درصدبهینه جایگزینی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات سدیم بر حسب سن



شکل (۱۱) نمودار کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع I حاوی درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان سیرجان در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات سدیم بر حسب سن



شکل (۱۲) نمودار کرنش ناشی از انبساط نمونه های مختلف ملات ساخته شده از سیمان نوع I حاوی درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان گدار سرخ در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات سدیم بر حسب سن

با توجه به شکلهای (۸) تا (۱۲) و جدول (۶) می توان به نتایج زیر (در حالات ۲۴ گانه بررسی شده) دست یافت.

۱ـ در کلیه حالات برای هر دو شرایط محیطی، مقدار کرنش ناشی از انبساط برای ملات های حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه های شاهد (ملات بدون پوزولان) بیشتر است.

۲ـ در کلیه حالات به استثناء II - Na2 So4 که انبساط بعد از ۸ هفته بیشتر از $GII - Na_2 So_4$، $SII - Na_2So_4$ شده است کرنش ناشی از انبساط در محیط سولفاتی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از مقدار آن در محیط آب معمولی می باشد.

۳ـ در محیط آب معمولی برای سیمان های نوع ۱ و ۲، درمقدار کرنش ناشی از انبساط بین نمونه های حاوی پوزولان سیرجان و گدار سرخ اختلاف زیادی وجود نداشته، در حالی که برای سیمان نوع ۵ این اختلاف به مقدار کمی مشهود است.

۴ـ در محیط سولفاتی با سیمان های نوع ۱ و ۲، مقدار کرنش ناشی از انبساط برای نمونه های حاوی پوزولان سیرجان در مقایسه با نمونه های حاوی پوزولان گدارسرخ بیشتر می باشد، در حالی که با سیمان نوع ۵ عکس این موضوع صادق است.

۵ـ در هر دو شرایط محیطی موجود با افزایش درصد جایگزینی پوزولان سیرجان با سیمان پرتلند نوع ۱، انبساط به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است (شکل ۱۱). در این حال افزایش درصد جایگزینی پوزولان گدار سرخ با سیمان پرتلند نوع ۱ چنین افزایش قابل توجهی را نشان نمی دهد (شکل ۱۲).

۶ـ در سنین پایین (تا حدود ۶ هفته) افزایش انبساط در نمونه های حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه های شاهد عموماً از یک روند تثبیت شده افزایشی برخوردار نیستند.

۷ـ اختلاف کرنش ناشی از انبساط برای نمونه های ساخته شده با ملات های در محیط سولفاتی و محیط آب معمولی (به ویژه برای ملات های حاوی پوزولان گدارسرخ) به مراتب کمتر از اختلاف کرنش ناشی از انبساط برای نمونه های شاهد (ملات های بدون پوزولان) می باشد (جدول ۶) ولی اصل کرنش برای ملات های حاوی پوزولان بسیار بیشتر از ملات های شاهد است.

در ارزیابی نتایج ۷ گانه فوق، نه تنها بررسی عوامل شیمیایی، بلکه بررسی عوامل فیزیکی نیز ضرورت دارد. زیرا پوزولان به مثابه یک ماده افزودنی، علاوه بر اینکه خصوصیات شیمیایی مخلوط را تحت تأثیر قرار می دهد، می تواند به همان نسبت خصوصیات فیزیکی مخلوط را نیز تحت تأثیر قرار دهد. موفقیت آمیز بودن جایگزینی سیمان پرتلند با پوزولان در کاهش ضعف سیمان پرتلند به واسطه حمله سولفات ها عموماً به سه عامل زیر نسبت داده می شود:

۱ـ کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم به دلیل واکنش پوزولان با آن

۲ـ کاهش مقدار درصد C_3A در سیمان، که علت اصلی انبساط و انحطاط سیمان پرتلند در اثر حمله سولفات است.

۳ـ کاهش نفوذپذیری بتن که سبب افزایش محافظت آهک

هیدرولیزه گردیده و در نتیجه نفوذ یون های مهاجم به داخل بتن را سخت و مشکل می کند.

غیر از عوامل فوق که در بهبود انبساط مؤثر هستند، نباید وجود عوامل فیزیکی که به نوبه خود ممکن است انبساط را در نمونه های ساخته شده با ملات های حاوی پوزولان تشدید نماید، نادیده گرفته شود. نتیجه اول (از نتایج ۷ گانه فوق الذکر) نشان می دهد که در مورد پوزولان های سیرجان و گدارسرخ، چنین عاملی به صورت غالب و با تحت الشعاع قرار دادن اثرات مثبت جایگزینی پوزولان با سیمان پرتلند روی انبساط بتن ظاهر گشته است. این عامل فیزیکی می تواند ناشی از کانی های موجود در ساختار کانی شناسی پوزولان باشد که با جذب آب سبب انبساط بتن می شود. نتیجه پنجم از نتایج ۷ گانه، علاوه بر اینکه این دلیل را توضیح می دهد نشان می دهد که چنین کانی هایی احتمالاً در پوزولان سیرجان در مقایسه با پوزولان گدار سرخ به طور عمده ای وجود دارد.

لازم به تأکید است که موضوع اخیر فقط یک احتمال است، زیرا ممکن است قسمتی از انبساط ناشی از عوامل شیمیایی نظیر افزایش مقدار درصد C_3A در اثر جایگزینی پوزولان با سیمان پرتلند باشد. (برای بررسی اثر C_3A، مقدار آن به همراه برخی ترکیبات دیگر برای پوزولان های سیرجان، گدارسرخ و خاک سانتورین [۱۵] محاسبه و نتیجه در جدول (۷) درج گردیده است). نتیجه هفتم نیز وجود کانی های منبسط شونده را اثبات می کند، زیرا در سنین اولیه واکنش های پوزولانی به طور عمده ای ظاهر نشده بلکه در سنین بالا تکمیل می گردند، در حالی که جذب آب توسط کانی های منبسط شونده در سنین پایین رخ می دهد و نقاط اوج در نمودارهای مربوط به نمونه های مختلف حاوی پوزولان در سنین تا حدود ۶ هفته این موضوع را تأیید می کند (نتیجه ششم) نتایج به دست آمده از آزمایش انقباض با این نتیجه سازگاری کامل دارد.

نتیجه هفتم به صورت جالبترین نتیجه، علاوه بر اینکه وجود کانی های منبسط شونده را در ساختار پوزولان تأیید می کند، نقش پوزولان را در کنترل مقدار کرنش ناشی از انبساط در محیط های سولفاتی (در مقایسه با محیط آب معمولی) آشکار می کند. همان گونه که نتایج جدول (۶) نشان می دهد، مقدار کرنش ناشی از انبساط برای نمونه های حاوی پوزولان در محیط سولفاتی، در مقایسه با محیط آب معمولی، در سنین مختلف از ۱/۳ تا ۳/۴ برابر و برای نمونه های بدون پوزولان ۱ تا ۵/۵ برابر می باشد.

نتایج اول و دوم بیانگر این موضوع است که در مقدار انبساط، فقط وجود کانی های منبسط شونده در ساختار پوزولان مؤثر نبوده (هرچند به طور قابل ملاحظه ای مؤثر بوده)، بلکه عوامل شیمیایی نیز به نوبه خود در افزایش انبساط نقش داشته است. به نظر می رسد که با جایگزینی پوزولان، مقدار C_3A موجود در ملات تحت تأثیر قرار می گیرد. همان گونه که نتایج مندرج در جدول (۷) برای سه نوع پوزولان نشان می دهد، خاک سانتورین کمترین و پوزولان سیرجان بیشترین مقدار C_3A را در ترکیب خود داراست. در این حال مقدار کرنش ناشی از انبساط نیز برای خاک سانتورین کمترین مقدار و برای پوزولان سیرجان بیشترین مقدار می باشد. بنابراین می توان کرنش ناشی از انبساط را به متفاوت بودن مقدار درصد C_3A نسبت داد. نتایج سوم و چهارم نه تنها این موضوع را، به خصوص در محیط سولفاتی که تأثیر عوامل شیمیایی بیشتر ظاهر می شود، تأیید می کند بلکه اهمیت محدودیت ASTM C150 [۱۶] برای سیمان نوع ۵ در مورد حداکثر مقدار C_3A(۵٪) و کل مقدار C_4AF به علاوه دو برابر C_3A

جدول (۷) اکسیدهای تشکیل دهنده و برخی از ترکیبات سیمان های نوع ۱، ۲ و ۵ ساخت کارخانه سیمان کرمان و پوزولان های سیرجان، گدارسرخ و خاک سانتورین

نوع سیمان	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	C_3A	C_4AF	L.S.F.	LOI
I	۲۱/۶	۵/۳۶	۳/۶	۶۳/۲۸	۱/۶	۲/۴	۰/۵۴	۰/۳۲	۸/۱	۱۰/۹	۹۱/۵	–
II	۲۱/۷۵	۴/۹	۳/۹۲	۲/۷۲	۱/۸	۲/۱۵	۰/۵۰	۰/۳۸	۶/۴	۱۱/۹	۹۰/۶	–
V	۲۱/۴۰	۳/۸۴	۴/۷۶	۶۳/۲۸	۲/۰	۱/۵	۰/۴۴	۰/۲۳	۲/۱	۱۴/۵	۹۳/۹	–
S	۶۳/۶	۱۷/۷۲	۳/۶۸	۵/۶	۰/۸	۰/۰۰	۲/۴	۰/۲۲	۴۰/۷	۱۱/۱۹	۲/۸	۵/۲
G	۶۹/۴	۱۳/۹۶	۱/۸۴	۲/۸	۱/۶	۰/۰۰	۱/۲	۰/۲۰	۳۳/۹	۵/۵۹	۱/۳	۷/۲
SAN	۶۳/۸	۱۳/۰۰	۵/۷	۴/۰	۲/۰	–	۲/۵	۳/۸	۲۴/۸	۱۷/۳	۲/۰۲	۴/۸

S: پوزولان سیرجان　　G: پوزولان گدارسرخ　　SAN: خاک سانتورین

(۲۰٪) و حداکثر مقدار منیزیم (۶٪) را آشکار می‌کند.

علاوه بر C_3A ترکیباتی نظیر منیزیم و آهک آزاد نیز در مقدار انبساط نقش به سزایی دارند که با توجه به نتایج مندرج در جدول (۷) قضاوت کمی در این مورد مشکل به نظر می‌رسد.

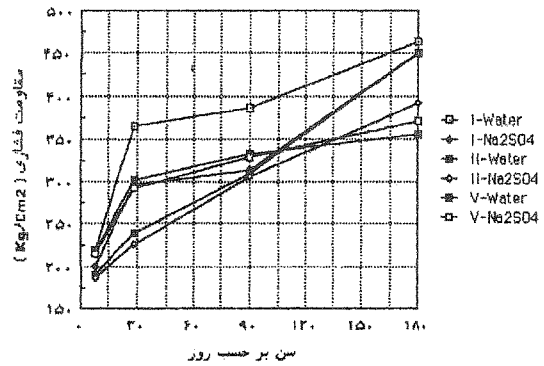
همچنین عقیده بر آن است که C_4AF در اثر هیدراتاسیون به هیدرات سه کلسیم آلومینات و یک فاز آمورف (بی شکل) احتمالاً $CaO.Fe_2O_3$ آبدار تبدیل می‌شود [۱]. بنابر این مقایسه C_4AF مربوط به پوزولان‌های سیرجان و گدار سرخ نیز بیانگر نقش این ترکیب در مقدار انبساط می باشد.

۸ـ آزمایش مقاومت فشاری جهت بررسی دوام بتن و نتایج آن

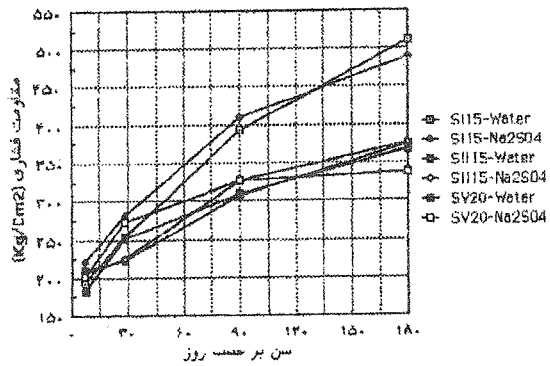
تا به حال هیچ گونه آزمون استانداردی برای تعیین مقاومت بتن در برابر حمله سولفات تدوین نشده است. معمولاً بررسی دقیق دوام بتن به مدت زمان طولانی تری نیاز دارد و برای فائق آمدن به این مشکل استفاده از روش‌های تسریع شده، مخصوصاً برای بتن‌های حاوی پوزولان که معمولاً مقاومت در دراز مدت مورد نظر است، رایج می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های تسریع شده از نسبت آب به سیمان بالاتر (۰/۶) و ماسه به کار رفته در بتن‌های متناظر استفاده گردیده است. نسبت آب به سیمان بالاتر باعث می شود که دوام بتن در برابر عوامل مخرب، بیشتر تحت تأثیر قرار گیرد.

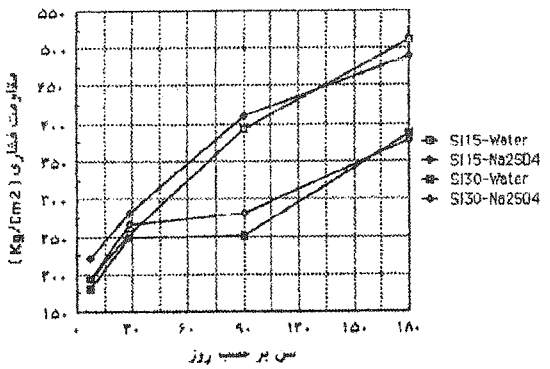
برای انجام این آزمایش نمونه‌های مختلف ملات مطابق با ASTM C109-87 [۱۷] ساخته شده و سپس تا قبل از آزمایش در سنین مختلف تا ۱۸۰ روز در دوشرط محیطی آب و محیط سولفاتی با دمای ۱۹ تا ۲۱ درجه سانتیگراد قرار گرفته اند.

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین مختلف برای نمونه‌های ملات در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) آمده است. همچنین با استفاده از نتایج و با فرض خطی بودن تغییرات مقاومت فشاری بین سنین مختلف ۷ تا ۲۸ و ۲۸ تا ۹۰ و ۹۰ تا ۱۸۰ روز، شیب خطوط محاسبه و نتایج در جدول (۸) درج گردیده است. در جدول مزبور n نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفاتی به مقاومت فشاری نمونه‌های مشابه نگهداری شده در آب می باشد.

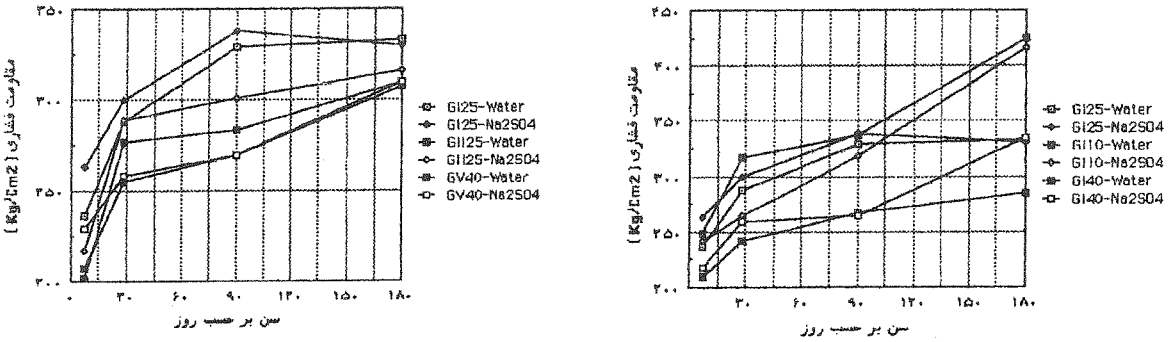


شکل (۱۳) نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف ملات ساخته شده با انواع سیمان‌های پرتلند نوع V, II, I بر حسب سن در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات





شکل (۱۴) نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف ملات ساخته شده با انواع سیمان‌های حاوی درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان سیرجان بر حسب سن در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات



شکل (۱۵) نمودار مقاومت فشاری نمونه های مختلف ملات ساخته شده با انواع سیمان های حاوی درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان گدارسرخ بر حسب سن در شرایط محیطی آب معمولی و محلول سولفات

جدول (۸) نسبت های n_i و شیب های m_{i-j} برای نمونه های مختلف ملات در دو شرط محیطی موجود

نوع نمونه	نسبت ها				شیب ها (محیط آب معمولی)			شیب ها (محیط سولفاتی)		
	n7	n28	n90	n180	m7-28	m28-90	m90-180	m7-28	m28-90	m90-180
I	۰/۹۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۹۷	۷/۰	۰/۳۲	۰/۸۷	۷/۴	۰/۲۶	۱/۵۳
II	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۸۷	۳/۲	۱/۱۵	۱/۵۶	۲/۰	۱/۲۷	۰/۹۴
V	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۸	۱/۰۴	۴/۱	۰/۴۸	۰/۲۴	۳/۷	۰/۵۶	۰/۴۷
SI15	۱/۱۴	۱/۱۱	۱/۰۵	۰/۹۶	۲/۹	۲/۲۳	۱/۳۳	۲/۹	۲/۰۸	۰/۸۷
SII15	۰/۹۸	۱/۰۱	۱/۰۶	۱/۰۰	۰/۶	۱/۳۷	۰/۷۳	۱/۰	۱/۶۳	۰/۵۴
SV20	۱/۱۰	۱/۰۸	۱/۰۶	۰/۹۲	۳/۳	۰/۹۲	۰/۶۴	۳/۴	۰/۸۵	۰/۱۳
GI25	۱/۱۱	۱/۰۴	۱/۰۳	۰/۸۹	۲/۵	۰/۶۶	۰/۰۴	۱/۸	۰/۶۱	۰/۴۷
GII25	۱/۰۷	۱/۰۴	۱/۰۶	۱/۰۲	۳/۶	۰/۱۰	۰/۳۰	۳/۴	۰/۱۹	۰/۱۷
GV40	۱/۱۱	۱/۰۱	۱/۰۰	۱/۰۱	۲/۳	۰/۲۳	۰/۴۲	۱/۴	۰/۵۲	۰/۴۶
SI30	۱/۰۷	۱/۰۷	۱/۱۲	۰/۹۸	۳/۲	۰/۰۳	۱/۵۰	۳/۵	۰/۲۳	۱/۰۸
GI10	۰/۹۸	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۹۸	۳/۳	۰/۳۲	۰/۹۸	۱/۱	۰/۸۵	۱/۰۹
GI40	۱/۰۳	۱/۰۷	۰/۹۹	۱/۱۸	۱/۵	۰/۴۲	۰/۲۰	۲/۰	۰/۰۸	۰/۷۹

نتایج مندرج در جدول (۸) نشان می دهد که:

۱ ـ نمونه های حاوی پوزولان با درصد پایین جایگزینی (بدون استثناء) کمتر از نمونه های شاهد مشابه در معرض حمله سولفات قرار گرفته اند. این نتیجه اهمیت و تأثیر مقدار پوزولان جایگزین شده را از نظر دوام نشان می دهد.

۲ ـ واکنش پوزولانی در سیمان پرتلند ـ پوزولان نه تنها به نوع پوزولان، بلکه به مقدار جایگزینی سیمان با پوزولان و همچنین نوع سیمان بستگی دارد. برای مثال موارد زیر می تواند مورد توجه قرار گیرد.

۲ ـ ۱ ـ تأثیر نوع سیمان: مقایسه نتایج مربوط به نمونه SI15 نشان می دهد که بیشترین مقاومت در برابر سولفات در سنین پایین (۷ روزه) ظاهر شده است، در حالی که با همان درصد جایگزینی برای نمونه SII15 بیشترین مقاومت در برابر سولفات در سنین بالاتر (۹۰) روز رخ داده است. این به دلیل ضد سولفات بودن سیمان نوع ۲ در مقایسه با سیمان نوع ۱ می باشد.

۲ ـ ۲ ـ تأثیر نوع پوزولان: مقایسه نتایج نمونه های

GII25, SII15 مشابه بند ۲ـ۱ـ چه از نظر مقاومت و چه از نظر رشد مقاومت تأثیر نوع پوزولان را در برابر حمله سولفات ثابت می کند و همین طور رشد منفی مقاومت برای نمونه GI25 در سنین بالا (۱۸۰ روز) و مقایسه آن با نمونه های , SI30 SI15 در محیط سولفاتی تأثیر نوع پوزولان را روی دوام نشان می دهد.

۲ ـ ۳ ـ تأثیر مقدار جایگزینی : مقایسه نتایج نمونه های SI15 و SI30 اثر مقدار جایگزینی را هم از نظر مقاومت و هم از نظر رشد مقاومت در محیط آب معمولی و محیط سولفاتی نشان می دهد.

۳ ـ نتایج به دست آمده برای نمونه های GV40 , SV20 آسیب پذیری سیمان های ضد سولفات حاوی درصد بالای جایگزینی پوزولان را به وضوح نشان می دهد. این نتیجه با محدودیت هایی که آیین نامه های BS 5328: 1976 و CP110: 1972 مبنی بر عدم استفاده از خاکستر بادی همراه با سیمان پرتلند ضد سولفات جهت مقابله با حملهٔ سولفات ها توصیه می کنند سازگاری دارد.

۴ ـ رشد مقاومت در سنین بالاتر از ۹۰ روز برای نمونه های حاوی پوزولان سیرجان به طور قابل ملاحظه ای چشمگیرتر از رشد مقاومت نمونه های شاهد در هر دو شرایط محیط آب معمولی و محلول سولفات سدیم می باشد. این در حالی است که برای نمونه های حاوی پوزولان گدار سرخ چنین رشدی حاصل نشده است. این امر احتمالاً به دلیل فعالیت بالای پوزولان سیرجان در مقایسه با پوزولان گدار سرخ است.

۹ـ بررسی شکل ظاهری نمونه های مختلف در محیط سولفاتی و نتایج آن

بتنی که توسط واکنش های محلول سولفاتی تحت تأثیر قرار گیرد، دارای ظاهری سفید رنگ بوده و بسته به نوع بتن و ترکیب شیمیایی محلول مهاجم شکل های متفاوتی از خرابی را نشان خواهد داد. خرابی از لبه ها و گوشه ها آغاز شده و تدریجاً با ترک خوردن و پوسته شدن ادامه می یابد و بتن را به حالت تُرد و حتی نرم در می آورد . عموماً سه نوع شکل گسیختگی به صورت خوردگی و نرم شدن سیمان که به جدا شدن سنگدانه ها از هم منتهی می شود، پوسته شدن سطح بتن در لایه های متوالی و ترک خوردن بتن مشاهده می گردد.

معمولاً در عمل بیش از یک نوع از این خرابی ها رخ می دهد و تمیز دادن شکل های خرابی از یکدیگر مشکل می باشد. به خصوص که عواملی مانند انبساط و انقباض ناشی از فرآیندهای تر و خشک شدن و یخبندان ـ ذوب معمولاً گوناگونی بیشتری را ایجاد می کند.

در بررسی شکل ظاهری نمونه های مختلف به جز حالات (GV40, SI15, I) تفاوتهای مشخصی مشاهده نمی شود و ممکن است در دراز مدت (بالاتر از یکسال) بیشتر قابل تشخیص باشند. شکل های متفاوتی از خرابی که به وضوح قابل تشخیص است عبارتند از :

الف ـ نوعی خرابی که از لبه ها و گوشه ها شروع شده است که نهایتاً گسترش یافته و سبب ترک خوردن بتن می شود.

ب ـ نوعی خرابی که در سطح نمونه ها ظاهر گشته و نهایتاً منجر به پوسته شدن سطح بتن و نرم شدن سیمان همراه با جدا شدن سنگدانه ها خواهد شد.

به طور کلی از وضع ظاهری نمونه های مختلف موجود در آزمایشگاه می توان نتایج زیر را استفاده نمود:

۱ ـ پوزولان سیرجان می تواند دوام بتن را در برابر حملات سولفات بهبود بخشد.

۲ ـ به کار گیری پوزولان های سیرجان و گدار سرخ (به ویژه گدار سرخ) با سیمان های ضد سولفات اثر سوء داشته و مقاومت فشاری را در دراز مدت کاهش می دهد.

۱۰ـ نتیجه گیری

با کاربرد پوزولان های سیرجان و گدار سرخ به عنوان جایگزین سیمان در ساخت انواع بتن به نتایجی به شرح زیر می توان دست یافت:

۱ ـ کاهش گرمای هیدراتاسیون با به کارگیری پوزولان سیرجان، که این کاهش سبب می شود تا بتن ریزی در قطعات حجیم مانند سدها، پل ها، پی های گسترده، دیوارهای حایل و همچنین بتن ریزی در فصول گرم با اطمینان بیشتری انجام گیرد.

۲ ـ مقاومت فشاری و کششی در سنین بالاتر (بالاتر از ۶ ماه) برابر بتن های ساخته شده با سیمان پرتلند خالص بوده و ممکن است بیشتر نیز بشود.

۳ ـ بالا بودن انبساط نمونه های حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه های حاوی سیمان پرتلند خالص در بعضی موارد (نظیر قطعات پیش تنیده بتنی) می تواند در برآورد اهداف خاص مفید واقع گردد.

۴ ـ مدول الاستیسیته بتن های حاوی پوزولان سیرجان و

گدار سرخ در مقایسه با نمونه های شاهد بیشتر می باشد.

۵ ـ از نظر اقتصادی مصرف پوزولان ها می تواند قیمت سیمان را کاهش داده و تولید آن را افزایش دهد.

۶ـ انقباض بتن حاوی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ در مقایسه با بتن های ساخته شده از سیمان پرتلند خالص کاهش می یابد که در بعضی موارد می تواند در برآورد اهداف خاص، مفید واقع گردد.

۷ـ در محیط سولفاتی، بتن های حاوی پوزولان های سیرجان و گدار سرخ (به ویژه گدار سرخ) در مقایسه با بتن های ساخته شده از سیمان پرتلند خالص ممکن است در دراز مدت پدیده انبساط را بهبود بخشد. در حالی که در محیط آب معمولی پدیده انبساط را که باعث خرابی می شود، افزایش می دهد. در نتیجه ممکن است در دراز مدت از دوام بتن بکاهد.

۸ـ نوع سیمان، نوع پوزولان و مقدار جایگزینی سیمان با پوزولان عوامل مؤثر در دوام بتن می باشند.

مراجع

[۱] نویل و بروکس، تکنولوژی بتن، ترجمه رمضانیانپور ـ علی اکبر و شاه نظری ـ محمدرضا، چاپ دوم انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۶۹.

[۲] نویل، بتن شناسی (خواص بتن)، ترجمه فامیلی ـ هرمز، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۶۹.

[۳] انجمن سیمان پرتلند، طرح و کنترل مخلوط های بتن ترجمه طسوجی ـ محمد ابراهیم، چاپ اول، انتشارات میقات، تهران، ۱۳۶۶.

[۴] رمضانیانپور ـ علی اکبر ـ طرح اختلاط بتن، لنتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۱۳۶۷.

[۵] ولفگانگ ـ چرنین، شیمی و فیزیک سیمان برای مهندسین راه و ساختمان، ترجمه عزیزیان ـ محمدرضا، شرکت مهندسی و قطعات سیمان ایران، تهران، ۱۳۶۴.

[۶] رمضانیانپور ـ علی اکبر، جعفری ـ محمدرضا، بررسی خصوصیات مهندسی بتن های حاوی پوزولان تفتان و جاجرود و مقایسه آن با بتن های معمولی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۷.

[۷] گروه تحقیقات پوزولان و مواد معدنی، گزارش مقدماتی اکتشافات پوزولان های منطقه کرمان جهت تولید سیمان پوزولانی در کارخانه سیمان کرمان، آبان ۱۳۷۲.

[۸] مقصودی علی اکبر، جزوه درس بتن حجیم (عضو هیئت علمی بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان)

(Mass Concrete, Reported by ACI Committee 207, ACI 207. 1R _ 87)

[۹] پوریعقوبی ـ سید عباس، بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن های ساخته شده با پوزولان های سیرجان و گدار سرخ (کرمان) و مقایسه آن با بتن کنترل، پایان نامه کارشناسی ارشد بخش عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۳.

[۱۰] عشقی ـ ساسان، آزمایش های بتن سخت شده، چاپ اول نشریه شماره ۷۲ ـ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۶۶.

[11] Concrete Technology Design Vol:3 Cook, D.J. "Natural pozzolans " Editor, Swamy R.N. Cement Replacement Materials (1986).

[12] ASTM C618 _ 78 "Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in portland Cement Concrete".

[13] ASTM C311 _ 90 "Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete".

[14] BRITISH STANDARD INSTITUTE, BS 3892, Part1, 1988. "Specification for Pulverized Fuel Ash for use as a Cementitous in Structural Concrete", British Standards Institute London, 1988.

[15] Mehta, P.K." Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth," Cement and Concrete Research, 1981, PP. 507 _ 518

[16] ASTM C150-86 "Standard Specification for portland Cement".

[17] ASTM C109 - 87 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydrulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50 - mm Cube Specimence)".