

بررسی عملکرد بتن های پوزولانی استان کرمان

علی اکبر رضانیانپور

استاد

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی اکبر مقصودی

استادیار

بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

بمنظور تعیین درصد بهینه مقدار جایگزین پوزولانهای گدارسفید بافت، سیرجان و گدارسرخ واقع در استان کرمان با سه نوع سیمان کارخانه سیمان کرمان ابتدا به دو روش میزان فعالیت پوزولانی آنها تعیین گردیده و سپس مخلوطهای مختلف بتنی با درصدهای متفاوت جایگزین پوزولان ساخته و در سنین گوناگون مقاومت فشاری نمونهها آزمایش شده است. بر مبنای مقاومت فشاری ۲۸ روزه درصدی از پوزولانها که بنظر می رسد برای جایگزینی مناسب میباشد، بعنوان درصد بهینه انتخاب و با انجام آزمایشات طولانی مدت گوناگون، خواص مکانیکی بتن های پوزولانی با نمونه های شاهد تعیین و بصورت کیفی مورد مطالعه قرار گرفته اند. همچنین با توجه به نقش مهم دوام، نمونه های بتنی با و بدون پوزولانهای مزبور ساخته و برای شرایط مختلف محیطی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفته، ضمن اینکه نتایج بدست آمده از پوزولانهای فوق با نتایج بعضی پوزولانهای رایج دنیا مورد مقایسه قرار گرفته است.

ارزیابی انجام شده نشان میدهد، بتن های حاوی پوزولان در اغلب موارد عملکرد برتری نسبت به نمونه های شاهد دارند، ضمن اینکه پوزولان گدارسفید بافت از نظر خواص مقاومتی بتن از پوزولان گدارسرخ برتر و رفتار نامناسب تری نسبت به پوزولان سیرجان دارد.

کلمات کلیدی

درصد بهینه، پوزولان کرمان، خواص مکانیکی، دوام.

Performance of Kerman Pozzolonic Concretes

A.A. Maghsoudi
Assistant Professor
Shahid Bahonar University

A.A. Ramezaniانpour
Professor
Amirkabir University of Technology

Abstract

Determination of Optimum contents of godarsorkh, sirjan, and godarsefid pozzolans to be replaced by 3 types of cement was carried out by two pozzolanic activity methods. Concrete mixtures with different amounts of pozzolans were made and their compressive strengths were measured. Mixtures showing higher strengths were selected as optimum mixtures for further investigation on their mechanical properties. Durability of concrete mixtures with and without pozzolans was assessed and compared with some other pozzolans.

Test results show that concrete mixtures containing pozzolans have better performance than normal concrete mixtures. Concrete mixtures containing sirjan pozzolan showed the highest compressive strengths followed by godarsefid and godarsorkh pozzolans.

Keywords

Optimum Content Kerman Pozzolan, Mechanical Properties, Durability

با توجه به اینکه تحقیقات مشخصی برای میزان قابل قبول و مناسب جایگزین پوزولانهای کرمان با سیمان صورت نگرفته است، با همکاری بخش عمران دانشگاه شهید باهنر و کارخانه سیمان کرمان تحقیقات نسبتاً وسیعی در مورد پوزولانهای کرمان معروف به پوزولانهای سیرجان، گدارسرخ، گدارسفید بافت، شرق و غرب جوپار آغاز گردید که نتایج بعضی تحقیقات در مراجع [۱، ۸ و ۹] آورده شده است، در این گزارش نتایج و مقایسه مربوط به پوزولانهای سیرجان، گدارسرخ و گدارسفید بافت یادآور شده است.

جهت انتخاب مناسب‌ترین مقدار مصرف پوزولانها، نمونه‌های مختلف بتنی با سه تیپ سیمان مزبور و با درصدهای مختلف پوزولان ساخته و نمونه‌ها تا سن آزمایش در شرایط غرقاب و گونی پیچ مرطوب نگهداری شده و مقاومت فشاری آنها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه تعیین گردیده است. براساس نتایج آزمایش ترموگراویمتری و مقاومت فشاری ۲۸ روزه، بتن‌های حاوی درصدهای مختلف جایگزین با اسلامپ ثابت، بعنوان معیار تعیین مقدار بهینه جایگزین مد نظر قرار گرفته است. بر این اساس آزمایشات طولانی مدت جهت بررسی کاملتر و مقایسه خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی دارای درصد بهینه پوزولانها برترتیب با سه و دو نوع سیمان مزبور انجام گردیده است. از آنجاکه بررسیها در فواصل زمانی مختلف صورت گرفته است، بنابراین مصرف نوع سیمان بستگی به تولید کارخانه سیمان در هنگام تحقیق دارد که این مهم با ترسیم دو خط در جداول از همدیگر تفکیک شده‌اند.

تعیین درصد بهینه مقدار جایگزین پوزولان

بدین منظور به دو روش اقدام به تعیین میزان فعالیت پوزولانی گردیده است: (i) به روش Thermo-Gravimetry (TG) میزان فعالیت پوزولانهای مزبور تعیین و بمنظور مقایسه، نتایج بدست آمده با نتایج چند نوع پوزولان دیگر در جدول ۱ آورده شده است (جزئیات بیشتر این روش در مراجع [۳ و ۲] موجود است). همچنین آزمایش تعیین ضریب فعالیت مقاومت (Strength Activity Index) بر اساس مرجع [۵] و استفاده از ماسه استاندارد اتاوا انجام گرفته که نتایج نشان می‌دهد، پوزولان گدارسرخ دارای شاخص فعالیت مقاومت بیشتری نسبت به پوزولان سیرجان است [۲]. چنین نتیجه‌ای با نتایج بدست آمده از آزمایش (TG) تا حدودی سازگار است [۲]. (ii) روش آزمایش مقاومت فشاری: براین اساس نمونه‌های بتنی دارای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد پوزولان با ۲ و ۳ نوع سیمان دارای اسلامپ ثابت ۵ سانتیمتر (با در نظر گرفتن مقادیر شن، ماسه و سیمان ثابت در هر حالت و با تغییر دادن مقدار آب، به اسلامپ ثابت رسیده) تهیه و بصورت غرقاب عمل آوری و در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مقاومت فشاری آنها تعیین گردیده است [۳ و ۲].

بر مبنای مقاومت فشاری ۲۸ روزه درصدی از پوزولانها که بنظر می‌رسد برای جایگزینی مناسب باشد، بعنوان درصد بهینه انتخاب گردیده و در آزمایشات طولانی مدت زیر مورد استفاده قرار گرفته است. در این جداول هر یک از مخلوطها با علامت اختصاری ABCD معرفی شده است، حرف A نشان دهنده نوع پوزولان، حرف B نوع سیمان و حروف CD گویای درصد بهینه جایگزینی سیمان با پوزولان میباشد. بعنوان نمونه BII۲۰ بیانگر نمونه پوزولان بافت با سیمان نوع II و عدد ۲۰ درصد بهینه جایگزینی می‌باشد. برای اغلب آزمایشات مکانیکی سه نمونه ساخته و متوسط نتایج آزمایش سه نمونه در این گزارش آورده شده است.

مقاومت فشاری

بمنظور تعیین مقاومت فشاری سیزده حالت مخلوطها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، اقدام به ساخت ۱۵۶ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ cm گردیده است. کلیه آزمایشات طولانی مدت برای دو شرط عمل آوری در آب و هوای مرطوب انجام گردیده و نتایج نحوه عمل آوری در مراجع [۱، ۳ و ۲] آورده شده است، لیکن در اینجا تنها اطلاعات مربوط به نمونه‌های نگهداری در آب گزارش شده است.

شکل‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از سیزده حالت مورد مطالعه را بصورت نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر حسب سن نشان میدهد. همانگونه که از شکلها ملاحظه می‌گردد، آهنگ رشد مقاومت فشاری برای حالات گوناگون متفاوت بوده و می‌توان

با محاسبه شیب نمودارها (m) در فواصل زمانی ۳ تا ۷ روز (m3-7)، ۷ تا ۲۸ روز (m7-28) و ۲۸ تا ۹۰ روز (m28-90) و مقایسه آنها با یکدیگر آهنگ رشد مقاومت را بطور کمی مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از محاسبه شیب نمودارها در جدول ۲ درج شده است [۳۲].

همانگونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشترین درصد رشد مقاومت در نمونه‌های مختلف در سنین اولیه رخ داده و با گذشت زمان از آهنگ رشد مقاومت کاسته شده است. در یک بررسی کلی با توجه به رشد مقاومت در سنین پائین (تا ۲۸ روز) می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقاومت فشاری نمونه‌های دارای پوزولان گدارسرخ در سنین اولیه از آهنگ رشد بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد برخوردار بوده و در عین حال نمونه‌های حاوی پوزولان سیرجان دارای آهنگ رشد بیشتری در سنین بعدی هستند، در حالیکه در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با پوزولان گدارسرخ از آهنگ رشد کمتر و مقاومت فشاری نمونه‌های دارای پوزولان سیرجان از آهنگ رشد بالاتری برخوردار است. برای نمونه در بتن پوزولانی گدارسفید بافت مشاهده می‌گردد در سن ۹۰ روز ۸۸ درصد مقاومت فشاری نمونه شاهد را کسب کرده در حالی همین نمونه در سن ۳ روز فقط ۷۳ درصد مقاومت فشاری نمونه شاهد را دارد (البته، دلیل مقاومت‌های متغیر اولیه و ثانویه بستگی بمقدار سیلیس و فعالیت آن در پوزولان دارد). همچنین نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با پوزولان سیرجان طی یک روند نسبتاً یکنواخت و در عین حال سریعتر از روند افزایش مقاومت نمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد. این اختلاف رفتار، تأییدی بر این موضوع است که تعیین درصد بهینه پوزولان بر اساس مقاومت‌های دراز مدت می‌تواند با اطمینان بیشتری نسبت به نتایج آزمایشات مقاومتی کوتاه مدت (چند هفته اول بتن‌ریزی) همراه باشد. علاوه بر تحلیل فوق، رقابت نمونه‌های بتنی ساخته شده از مخلوط سیمانهای پوزولانی با نمونه‌های بدون پوزولان، جهت کسب مقاومت فشاری در سنین مختلف می‌تواند مورد توجه قرار گرفته و در ارزیابی اهداف دراز مدت مفید واقع شود. بدین منظور نسبت مقادیر نمونه‌های پوزولانی به نمونه‌های مشابه شاهد در سنین مختلف محاسبه و نتایج در جدول ۳ درج شده است.

از مقایسه نتایج مثلاً نمونه‌های پوزولانی سیرجان و گدارسرخ می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر چند پوزولان سیرجان در کسب مقاومت کوتاه مدت بطور قابل توجهی ضعیف‌تر از پوزولان گدارسرخ عمل می‌کند ولی در سنین بالا (۹۰ روز) چنین وضعی وجود ندارد و لذا چنین رفتاری برای پوزولان سیرجان در مقایسه با پوزولان گدارسرخ که با روند کند کسب مقاومت همراه است می‌تواند یک برتری بحساب آید زیرا پی آمد آن، کنترل موفقیت آمیز حرارت هیدراتاسیون که عواقب ناشی از آن، نظیر ترک‌های حرارتی از مشکلات عمده و مهم سازه‌های بتنی حجیم نظیر سدهای بتنی می‌باشد را داراست.

تعیین مقاومت خمشی

تعداد ۱۴۸ نمونه منشوری به ابعاد $10 \times 10 \times 45$ سانتیمتر ساخته شده است که مقادیر میانگین نمونه‌ها در هر یک از چهار سن در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. آهنگ رشد مقاومت خمشی نیز به روش قبل محاسبه و نتایج در جدول ۲ منعکس شده است. از نتایج جدول معلوم میشود که آهنگ رشد مقاومت خمشی همانند مقاومت فشاری با گذشت زمان کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده در فاصله زمانی ۷ تا ۲۸ روز نشان می‌دهد که آهنگ رشد مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در اغلب حالات بیش از میزان آن برای نمونه‌های بتنی شاهد است، ضمن اینکه در سنین بالاتر تمامی نمونه‌های پوزولانی از آهنگ رشد محسوسی برخوردار نیستند.

بمنظور ارزیابی رقابت نمونه‌های بتنی دارای پوزولان با نمونه‌های شاهد، جهت کسب مقاومت کششی در سنین مختلف، نسبت مقاومت‌های دو نوع نمونه محاسبه و نتایج در جدول ۳ درج گردیده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که مقاومت خمشی کسب شده بترتیب با سیمان نوع ۲ و نمونه‌های پوزولانی گدارسفید بافت بر مقاومت کسب شده توسط نمونه‌های پوزولانی گدارسرخ برتری دارد و از مقاومت کسب شده توسط نمونه‌های پوزولانی سیرجان کمتر است، همچنین مقاومت خمشی کسب شده توسط نمونه‌های پوزولانی گدارسفید بافت و سیمان نوع ۵ کمتر از مقاومت کسب شده توسط نمونه‌های حاوی پوزولانهای گدارسرخ و سیرجان می‌باشد.

با توجه به جداول ۲ و ۳، پوزولان گدارسفید بافت از نظر خواص مقاومتی بتن برتر از پوزولان گدارسرخ و رفتار نامناسب‌تری نسبت به پوزولان سیرجان دارد. اهمیت این موضوع زمانی آشکار میشود که این نتیجه با نتایج حاصل از آزمایش

ترموگراویمتری برای ارزیابی فعالیت پوزولانی با هم مقایسه گردد. چنین مقایسه‌ای نشان می‌دهد که روش ترموگراویمتری، بویژه در دراز مدت نمیتواند ملاک ارزیابی فعالیت مقاومتی یک پوزولان باشد. با آزمایش نمونه‌های بتنی در سنین بالاتر (۶ ماه و یکساله) این نتیجه مشخص تر میگردد.

اغلب آئین نامه‌ها رابطه تجربی پیشنهاد شده برای رابطه بین مقاومت فشاری f_c و مقاومت خمشی f_r را بصورت $f_r = K \sqrt{f_c}$ ارائه میدهند. برای ۱۳ حالت بررسی شده در این تحقیق مقادیر K محاسبه و در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که (به استثنای نمونه‌های حاوی پوزولان گدارسرخ) بیشترین مقادیر K تقریباً در سن ۲۸ روزه حاصل شده است.

مدول الاستیسیته

نمونه‌های آزمایشی مورد استفاده، همان نمونه‌های بکار رفته در آزمایش خمش هستند که بکمک دستگاه مدرن موجود در آزمایشگاه عمران منحنی نیرو-خیز برای نمونه‌های تحت خمش (با بار دو نقطه‌ای) رسم گردیده، سپس بر اساس خیز، مقادیر مدول الاستیسیته بکمک روش پیشنهادی [۲] محاسبه و مقادیر در جدول ۴ درج گردیده است. از مقایسه این نتایج با روش استاندارد انگلستان [۶] انحراف معیار کمی برابر با $S_{n-1} = 4/5\%$ بدست آمد [۲]. عبارت دیگر ۱۹٪ اختلاف بدست آمده بین دو روش ضمن تاکید بر انجام آزمایش تعداد بیشتری نمونه جهت تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی بروش پیشنهادی، رابطه زیر پیشنهاد گردیده است.

$$E_c = 2/11 f_{cu}^{0.73} \quad (1)$$

که در آن E_c مدول الاستیسیته استاتیکی بتن بر حسب GPa و f_{cu} مقاومت فشاری نمونه مکعب بتنی ۲۸ روزه بر حسب MPa می‌باشد.

نتایج بوضوح نشان میدهد، به استثنای نمونه پوزولانی SII، مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان کمتر از مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی شاهد است. با مقایسه نسبت مدول الاستیسیته نمونه‌های مختلف بتنی به مقاومت فشاری نمونه‌های مشابه و مدول الاستیسیته نمونه‌های شاهد [۳ و ۱] چنین نتیجه‌گیری شده است که قضاوت در مورد مدول الاستیسیته بتن‌های پوزولانی تنها وابسته به نوع پوزولان نیست بلکه نوع سیمان نیز دارای اهمیت است.

انقباض بتن

بمنظور تعیین انقباض ملاتهای مختلف، تعداد ۳۶ نمونه منشوری به ابعاد $2/5 \times 2/5 \times 28$ سانتیمتر استاندارد آمریکا (۲ نمونه برای هر یک از حالات جدول ۶) ساخته و پس از نصب وسایل اندازه‌گیری کرنش نمونه‌ها در رطوبت نسبی حدود ۷۵٪ و درجه حرارت $21^\circ C$ تا $27^\circ C$ نگهداری شده‌اند. میزان انقباض با کرنش سنج تعیین و متوسط دو قرائت برای هر نمونه در جدول ۵ درج گردیده است.

غیر از عامل نسبت آب به سیمان، اغلب عوامل مؤثر بر انقباض ناشی از خشک شدن برای تمامی نمونه‌ها یکسان است. عامل مهمی که می‌تواند باعث این تفاوت در انقباض باشد میزان آب اضافی است که در ملاتهای حاوی پوزولان برای نیل به کارایی یکسان بکار رفته است. هر چند این عامل می‌تواند توجه کننده میزان انقباض بیشتر ملاتهای حاوی پوزولان باشد ولی چنین بنظر میرسد که تنها عامل مؤثر نمی‌باشد. زیرا با وجود اینکه آب در ملاتهای دارای پوزولان گدارسرخ بیشتر از ملاتهای پوزولانی سیرجان بکار رفته است، لیکن انقباض کمتری رخ داده است. این خود نشاندهنده این است که علاوه بر نسبت آب به سیمان، ماهیت پوزولان بکار رفته نیز مؤثر است. با توجه به اینکه مقدار جایگزینی سیمان پرتلند با پوزولان میتواند در مقدار انقباض، دوام و انبساط نقش داشته باشد، لذا بمنظور بررسی مناسبتر، این آزمایشات با درصدهای مختلف بیشتری پوزولان جایگزینی صورت گرفته و نتایج در جداول و اشکال ۵ و ۶ آورده شده است.

همانگونه که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی پوزولان دارای انقباض بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد هستند و در این بین بیشترین میزان انقباض مربوط به پوزولان سیرجان می‌باشد، در حالیکه با جایگزینی پوزولان گذار

سفیدبافت با سیمان نوع ۲ انقباض افزایش ولی با سیمان نوع ۵ افزایشی مشاهده نمی‌گردد. بیشترین نرخ رشد انقباض مربوط به ۲۸ روز اولیه سن نمونه‌ها میباشد که پس از آن نرخ رشد رو به کاهش می‌گذارد. با توجه به نتایج آزمایش انقباض برای سیمان نوع یک با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولانهای سیرجان و گدارسرخ، با افزایش درصد پوزولان در ملات انقباض کاهش و یا برای نتایج نمونه‌های مختلف ملاتهای با درصدهای مختلف پوزولان گدارسفید بافت با سیمان نوع ۲ با افزایش درصد پوزولان مقدار انقباض افزایش می‌یابد. برای تأیید این موضوع که علاوه بر نسبت آب به سیمان عوامل دیگری نیز نظیر کمیت پوزولان در مخلوط، انقباض را تحت تاثیر قرار می‌دهد، پیشنهاد می‌شود آزمایش با نسبت آب به سیمان ثابت انجام گیرد.

انبساط بتن

بدین منظور اقدام به ساخت ۵۶ نمونه ملات همزمان و مشابه نمونه‌های انقباضی با ملات یکسان گردیده و پس از نصب پولکها میزان انبساط در فواصل مختلف زمانی بکمک کرنش سنج قرائت گردیده و نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

همانگونه که از نتایج مشاهده می‌گردد، در کلیه حالات مقدار کرنش ناشی از انبساط برای ملاتهای حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه‌های شاهد بیشتر است.

در ارزیابی نتایج فوق و تحلیل موجود در مراجع [۱، ۲ و ۳] نه تنها بررسی عوامل شیمیایی، بلکه بررسی عوامل فیزیکی و مقایسه با خاک سنتورین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که پوزولان به مشابه یک ماده افزودنی، علاوه بر اینکه خصوصیات شیمیایی مخلوط را تحت تاثیر قرار می‌دهد، می‌تواند به همان نسبت خصوصیات فیزیکی مخلوط را نیز تحت تاثیر قرار دهد، پیشنهاد می‌گردد بمنظور مشخص شدن علت این افزایش اضافی در انبساط تحقیقات وسیع‌تری صورت گیرد.

دوام بتن

جهت انجام این آزمایش براساس مرجع [۷] تعداد ۵۷۶ نمونه ملات مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتیمتر ساخته و در دو شرایط مختلف محیطی آب معمولی و محلول ۵ درصد سولفات سدیم نگهداری و به دو روش؛ آزمایش مقاومت فشاری و بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها در سنین مختلف پرداخته و در مورد دوام نمونه‌ها نتیجه گیری و قضاوت شده است. شرح کامل نتایج در مراجع [۲، ۳ و ۱۰] آورده شده است، هرچند نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف در جدول ۶ درج گردیده است.

نتایج و پیشنهادات

همانگونه که از بررسی نتایج بدست آمده استنتاج می‌شود، کاربرد پوزولانهای سیرجان، گدارسرخ و گدارسفید بافت بعنوان جایگزین سیمان، در ساخت بتن مزایا و معایبی بشرح زیر داشته است:

- ۱- در یک بررسی کلی با توجه به رشد مقاومت در سنین پایین (تا ۲۸ روز) می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقاومت فشاری نمونه‌های دارای پوزولان گدارسرخ در سنین اولیه از آهنگ رشد تندتری نسبت به نمونه‌های شاهد برخوردار بوده و در عین حال نمونه‌های حاوی پوزولان سیرجان دارای آهنگ رشد بیشتری در سنین بعدی می‌باشد، در حالیکه در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با پوزولان گدارسرخ از آهنگ رشد کمتر و مقاومت فشاری نمونه‌های دارای پوزولان سیرجان از آهنگ رشد بالاتری برخوردار است. این اختلاف رفتار در دو نوع پوزولان مزبور، تأییدی بر این موضوع است که تعیین درصد بهینه پوزولان بر اساس مقاومت‌های درازمدت می‌تواند با اطمینان بیشتری نسبت به نتایج آزمایشات مقاومتی کوتاه مدت (چند هفته اول بتن‌ریزی) همراه باشد.
- ۲- مقاومت فشاری نمونه‌های پوزولانی در سن ۹۰ روز کمتر از بتن‌های بدون پوزولان است و ممکن است در سنین بالاتر چنین روند مقاومتی تغییر یابد، در هر صورت توصیه به انجام آزمایشات در سنین بالاتر از ۹۰ روز میگردد.
- ۳- پوزولان گدارسفید بافت از نظر خواص مقاومتی بتن از پوزولان گدارسرخ برتر و رفتار نامناسب‌تری نسبت به پوزولان سیرجان دارد.

- ۴- مقاومت خمشی نمونه‌های دارای پوزولان گدارسرخ و گدارسفید در سن ۹۰ روز کمتر از نمونه‌های بدون پوزولان است.
- ۵- مدول الاستیسیته بتن‌های دارای هر سه نوع پوزولان (به استثناء نمونه SII) در مقایسه با بتن‌های بدون پوزولان کمتر است، در اینصورت عملکرد ساختمانهای بتن مسلح در شرایط خدمت نامناسب‌تر میباشد.
- ۶- در اغلب موارد انقباض نمونه‌های دارای پوزولان سیرجان و گدارسرخ بیشتر از نمونه‌های شاهد هستند و در این بین بیشترین میزان انقباض مربوط به پوزولان سیرجان می‌باشد، در حالیکه با جایگزینی پوزولان گدارسفید بافت با سیمان نوع ۲، انقباض افزایش ولی با سیمان نوع ۵ افزایشی در انقباض مشاهده نمی‌گردد. کاهش در میزان انقباض منجر به بهبود شرایط خدمت سازه‌های بتن مسلح میگردد.
- ۷- پدیده انبساط در محیط آب معمولی، برای هر سه نوع پوزولان افزایش می‌یابد که در نتیجه ممکن است در دراز مدت از دوام بتن بکاهد و بهمین دلیل باید احتیاط‌های لازم مورد استفاده قرار گیرند.
- ۸- در محیط سولفاتی، بتن‌های حاوی پوزولانهای سیرجان و بویژه گدارسرخ در مقایسه با بتن‌های شاهد ممکن است در دراز مدت، پدیده انبساط را بهبود بخشد.
- ۹- اغلب مقاومت فشاری ملاتهای حاوی هر سه نوع پوزولان در محیط سولفاتی از نمونه‌های شاهد بیشتر است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که ممکن است از این لحاظ دوام بتن بهبود یابد.
- ۱۰- روند تند کسب مقاومت در بتن‌های حاوی پوزولان گدارسرخ، چنین نشان می‌دهد که این پوزولان در کاهش گرمای هیدراتاسیون در سنین پائین بطور موفقیت آمیزی عمل نمی‌کند و بنابراین استفاده آنها در بتن‌های حجیم مناسب نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی

تحقیقات انجام شده با حمایت مدیریت کارخانه سیمان کرمان و بخش عمران دانشگاه شهید باهنر بصورت دو پروژه کارشناسی ارشد آقایان پوریعقوبی و فاضلی صورت گرفته است که بدینوسیله تشکر و قدردانی میگردد.

جدول (۱) میزان فعالیت پوزولانهای مختلف در برابر آهک نسبت به زمان.

۹	۶	۳	۱	۸	۲	زمان
						نوع پوزولان
روز	روز	روز	روز	ساعت	ساعت	
۵۱/۰۵	۵۰/۱۳	۴۹/۲۶	۴۵/۷۰	-	۱۳/۷۸	پوزولان سیرجان
-	-	-	۴۰/۳۳	-	۱۵/۸۴	پوزولان گدارسرخ
۲۶/۹۸	-	-	-	-	-	پوزولان گدارسفید بافت
۸۱/۹۰	۸۰/۸۲	۷۸/۲۷	۷۳/۳۴	۵۲/۲۷	۴۹/۲۳	سنگ دیاتومه [۴]
۷۸/۴۸	۷۶/۰۱	۷۴/۳۴	۶۵/۱۱	۵۵/۲۸	۳۸/۴۴	سنگ تراس [۴]
-	-	-	۱۰۰/۰۰	۸۸/۶۰	۳۷/۰۰	میکروسیلیس [۴]
۷۸/۷۲	۷۷/۸۳	۶۹/۵۹	۵۵/۶۶	۲۹/۱۰	۲۸/۶۴	PFA [۴]
۵۱/۴۴	۵۰/۰۲	۳۴/۹۲	۳۱/۹۱	۳۰/۷۳	۲۵/۸۸	سرباره آهنگدازی کوره اصفهان [۴]

جدول (۲) شیب نمودارهای نشان داده شده برای سه فاصله زمانی مختلف (عمل آوری در آب).

نوع نمونه	شیب (m) نمودارهای نشان داده شده			شیب (m) نمودارهای نشان داده شده		
	در اشکال ۳ و ۴ برای سه فاصله زمانی مختلف			در اشکال ۱ و ۲ برای سه فاصله زمانی مختلف		
	m ۲۸-۹۰	m ۷-۲۸	m ۳-۷	m ۲۸-۹۰	m ۷-۲۸	m ۳-۷
I	۰/۱۰	۰/۴۸	۰/۰۰	۱/۱	۲/۳	۱۰/۵
II	۰/۱۳	۰/۵۷	۲/۸	۰/۸	۲/۷	۷/۵
V	۰/۰۵	۰/۵۷	۱/۵	۱/۳	۲/۳	۹/۰
SI۱۵	۰/۰۶	۰/۸۶	۰/۰۰	۱/۵	۲/۸	۱۲/۳

۰/۰۸	۰/۸۱	۲/۳	۱/۳	۳/۲	۵/۳	SI۱۵
۰/۲۴	۰/۴۳	۱/۰۰	۰/۸	۲/۱	۹/۸	SV۲۰
۰/۰۸	۰/۷۱	۲/۳	۰/۴	۳/۷	۱۱/۰	GI۲۵
۰/۱۱	۰/۸۱	۱/۳	۰/۵	۲/۵	۸/۵	GII۲۵
۰/۰۳	۰/۸۱	۴/۰۰	۰/۲	۳/۳	۱۴/۵	GV۴۰
۰/۱۲	۰/۹۴	۳/۱۲	۱/۲	۵/۶۲	-	II
۰/۱۴	۱/۰۵	۳/۲۵	۱/۵۳	۵/۱۹	-	V
۰/۰۸	۱/۱۱	۲/۵	۰/۸۵	۷/۰	-	BII۲۰
۰/۱۴	۰/۹۴	۲	۱/۱۷	۴/۷۶	-	BV۲۵

جدول (۳) مقادیر نسبت‌های مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های پوزولانی به مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های شاهد، نگهداری شده در آب در سنین مختلف بر حسب درصد.

نوع نمونه	نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های پوزولانی به مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد در سنین مختلف (روز)				نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های پوزولانی به مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد در سنین مختلف (روز)			
	۹۰	۲۸	۷	۳	۹۰	۲۸	۷	۳
I	-	-	-	-	-	-	-	-
II	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-
SI۱۵	۹۸	۱۰۲	۸۲	۸۷	۸۹	۷۶	۶۴	۴۹
SII۱۵	۹۸	۱۰۴	۹۳	۹۷	۹۹	۸۷	۷۷	۷۸
SV۲۰	۱۰۲	۸۰	۸۱	۸۴	۷۲	۷۶	۷۲	۶۵
GI۲۵	۸۹	۹۰	۷۴	۵۰	۸۸	۱۰۲	۸۸	۸۳
GII۲۵	۷۷	۷۵	۵۶	۶۰	۶۷	۶۹	۶۱	۵۱
GV۴۰	۹۳	۹۵	۸۱	۵۱	۶۶	۸۰	۶۶	۴۷
II	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-
BII۲۰	۸۵	۸۸	۷۷	۷۶	۸۸	۹۲	۷۷	۷۳
BV ۲۵	۷۵	۷۱	۶۶	۶۱	۷۶	۷۶	۶۷	۷۸

جدول (۴) مدول الاستیسیته نمونه‌های مختلف بتنی و مقادیر ضریب K.

نوع نمونه	I	II	V	SI۱۵	SII۱۵	SV۲۰	GI۲۵	GII۲۵	GV۴۰
$E_c(\text{ton/cm}^2)$	۲۴۷	۲۵۲	۲۴۱	۲۱۱	۲۸۵	۲۳۳	۱۶۷	۱۹۸	۱۹۶
و ضریب K ۹۰ روز	۳/۱۰	۳/۵۶	۳/۱۳	۳/۲۱	۳/۵۲	۳/۷۵	۲/۹۴	۳/۲۴	۳/۵۸
و ضریب K ۲۸ روز	۳/۱۱	۳/۴۱	۳/۷۹	۳/۶۵	۳/۷۹	۳/۱۰	۲/۷۶	۳/۱۰	۳/۵۷
نوع نمونه	II	V	BII۲۰	BV۲۵					
$E_c(\text{ton/cm}^2)$	۲۶۹	۱۹۶	۱۷۲	۱۳۷					
و ضریب K ۲۸ روز و	۲/۹۹	۲/۸۸	۲/۷۶	۲/۳۵					
ضریب K ۹۰ روز	۳/۰۲	۲/۸۵	۲/۷۲	۲/۴۵					

جدول (۵) کرنش ناشی از انقباض برای نمونه‌های مختلف منشوری بر حسب ($\mu\text{m}/\text{m}$).

سن (روز)									نوع نمونه
۹۰	۶۰	۲۸	۲۱	۱۴	۷	۳	۲	۱	
۲۴۰	۲۲۴	۱۹۲	۱۷۶	۱۶۰	۱۲۸	۸۰	۶۴	۳۲	I
۲۲۴	۲۰۸	۲۰۸	۲۰۸	۲۰۸	۱۹۲	۱۶۰	۱۲۸	۶۴	II
۱۷۶	۱۷۶	۱۶۰	۱۶۰	۱۴۴	۱۴۴	۱۱۲	۹۶	۶۴	V
۳۶۸	۳۳۶	۳۰۴	۳۰۴	۲۸۸	۲۴۰	۲۰۸	۱۷۶	۸۰	SI۱۵
۳۳۶	۳۰۴	۲۸۸	۲۸۸	۲۷۲	۲۵۶	۲۴۰	۱۹۲	۱۱۲	SI۲۰
۳۶۸	۳۵۲	۳۲۰	۳۰۴	۲۸۸	۲۴۰	۱۹۲	۱۷۶	۹۶	SIH۱۵
۳۲۰	۳۲۰	۳۰۴	۲۸۸	۲۸۸	۲۵۶	۲۴۰	۲۰۸	۱۴۴	SV۲۰
۲۵۶	۲۲۴	۱۹۲	۱۹۲	۱۷۶	۱۴۴	۱۲۸	۹۶	۶۴	GI۱۰
۲۵۶	۲۵۶	۲۲۴	۲۰۸	۱۹۲	۱۴۴	۱۲۸	۸۰	۴۸	GI۲۵
۲۸۸	۲۵۶	۲۲۴	۱۹۲	۱۹۲	۱۷۶	۱۲۸	۱۱۲	۴۸	GII۲۵
۱۴۴	۱۲۸	۱۱۲	۱۱۲	۹۶	۹۶	۶۴	۳۲	۱۶	GI۴۰
۲۴۰	۲۰۸	۱۹۲	۱۷۶	۱۴۴	۱۱۲	۶۴	۴۸	۴۸	GV۴۰
۳۸۰	-	۲۶۰	-	-	۱۰۶	۹۳	۳۰	-۳۴	II
۲۶۴	-	۲۰۰	-	-	۱۰۰	۷۷	۲۸	۰	V
۳۶۰	-	۳۴۰	-	-	۱۹۲	۱۴۶	۷۴	۲۴	BII۲۰
۵۸۰	-	۳۵۰	-	-	۲۶۲	۲۰۸	۱۳۸	۹۰	BII۳۰
۱۰۱۵	-	۴۵۲	-	-	۲۱۰	۱۵۴	۸۰	۲۴	BII۴۰
۲۸۲	-	۱۸۰	-	-	۵۴	۳۰	۰	-۸۶	BV۲۵

جدول (۶) مقاومت فشاری (Kg/cm^2) نمونه‌های مختلف ملات در شرایط محیطی آب معمولی و سولفات سدیم.

محلول سولفات سدیم			آب معمولی			نوع نمونه
۹۰ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	
۲۰۰	۱۴۱	۱۲۵	۲۲۸	۱۵۱	۱۴۲/۵	II
۱۵۰	۱۲۸	۱۰۱	۲۱۹	۱۲۸	۹۰	BII۲۰
۱۸۰	۱۱۷	۹۴	۱۵۶	۱۲۱	۱۰۲	BII۳۰
۱۵۷	۱۳۶	۸۷	۱۵۰	۱۲۰	۶۰	BII۴۰
۱۵۸	۱۵۵	۱۰۳	۱۵۲	۱۴۰	۱۰۵	V
۱۵۴	۱۰۵	۶۷	۱۵۷	۱۰۸	۵۵	BV۲۰
۱۵۰	۱۰۳	۶۲	۱۲۲	۱۱۰	۷۰	BV۳۰
۱۱۸	۱۰۱	۶۰	۱۲۰	۱۰۸	۶۱	BV۴۰
۳۱۳	۲۹۷	۱۹۹	۳۸۵	۳۶۵	۲۱۸	I
۳۰۶	۲۲۷	۱۸۶	۳۱۰	۲۳۹	۱۹۰	II
۳۲۸	۲۹۳	۲۱۵	۳۳۳	۳۰۳	۲۱۶	V
۴۱۱	۲۸۲	۲۲۱	۳۹۲	۲۵۴	۱۹۴	SI۱۵
۳۳۸	۳۰۰	۲۶۳	۳۲۹	۲۸۸	۲۳۶	GI۲۵
۳۲۷	۲۲۶	۲۰۶	۳۰۸	۲۲۳	۲۱۱	SIH۱۵
۳۰۱	۲۸۹	۲۱۷	۲۸۳	۲۷۷	۲۰۲	GII۲۵
۳۲۶	۲۷۳	۲۰۲	۳۰۶	۲۵۲	۱۸۲	SV۲۰
۲۶۹	۲۵۸	۲۲۹	۲۶۹	۲۵۵	۲۰۷	GV۴۰
۲۸۱	۲۶۷	۱۹۴	۲۵۱	۲۴۹	۱۸۱	SI۲۰
۳۱۸	۲۶۵	۲۴۲	۳۳۷	۳۱۷	۲۴۸	GI۱۰
۲۶۴	۲۵۹	۲۱۷	۲۶۷	۲۴۱	۲۱۰	GI۴۰

مراجع

- [۱] مقصودی، علی اکبر، رضانیانپور، علی اکبر و پوریعقوبی، سیدعباس، بررسی خواص مکانیکی و دوام بتنهای ساخته شده با پوزولانهای سیرجان و گدارسرخ (کرمان) و مقایسه آن با بتن کنترل، مجله امیرکبیر، سال هشتم، شماره ۳۲/پائیز ۱۳۷۵.
- [۲] پوریعقوبی، سیدعباس، بررسی خواص مکانیکی و دوام بتنهای ساخته شده با پوزولانهای سیرجان و گدارسرخ (کرمان) و مقایسه آن با بتن کنترل، پایان نامه کارشناسی ارشد بخش عمران دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ۱۳۷۳.
- [۳] فاضلی، عبدالحسین، بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتنهای حاوی پوزولان گدارسفید بافت و مقایسه آن با بتن کنترل، پایان نامه کارشناسی ارشد بخش عمران دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ۱۳۷۶.
- [۴] رضانیانپور، علی اکبر، رنجبر تکلیمی، ملک محمد، بررسی خواص مهندسی و پایایی بتنهای ساخته شده با سرباره کوره آهنگدازی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۸.
- [5] ASTM C311-90, Sampling and Testing Fly Ash and or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- [6] British Standard Institute, B.S. 1985, part 2, British Standard Institute London, 1985.
- [7] ASTM C109-87, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or 50-mm Cube Specimen).
- [8] Maghsoudi, A.A. ,The Study of Mechanical Properties of Concrete Containing Pozzolans from Sources in the Kerman areas (i.e. Sirjan and Ghodarsorkh) and their Comparison with the Control Concrete, ConChem International Exhibition and Conference, Conference Proceedings, pp. 341-350, 28-30 Nov. 1995, Brussels.
- [9] Maghsoudi, A.A. ,The Study of Mechanical Properties of Concrete Containing Pozzolans of Iran and their Comparison with the Control Concrete, ConChem International Exhibition and Conference, 2-4 Dec. 1997, Dusseldorf, Germany.
- [۱۰] فاضلی، عبدالحسین و مقصودی، علی اکبر، بررسی دوام بتن های حاوی پوزولان گدارسفید بافت در محلول سولفات سدیم، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی. تهران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آذر ۱۳۷۷.