تحقیقات بتن
سال دهم، شمارهٔ سوم
پاییز ۹۶
ص ۸۰ – ۶۷
تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۰
تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۸

ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از واکنش ژئوپلیمریزاسیون در تولید آجر

امیرطریقت
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
ساناز موذن چی *
دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

چکیده

در سال های اخیر به دلیل پیچیدگی و تحولات روز افزون جامعه جهانی، عامل انرژی و محیط زیست نقش اساسی در اقتصاد و سیاست هر ملت ایفا می کند. به همین دلیل شناخت و تولید مصالحی که باعث کاهش هزینه های ساخت و همچنین کاهش مصرف انرژی و کمک به محیط زیست گردند بسیار مورد توجه می باشد. این مقاله امکان استفاده از خاک لتریت معادن ایران را برای تولید آجرهای سازگار با محیط زیست بر پایه‌ی تکنولوژی ژئوپلیمریزاسیون مورد مطالعه قرار می‌دهد. روش تولید این نوع آجر، اختلاط خاک لتریت با محلول قلیایی، ماسه یا بدون آن و آب و تحت فشار قرار دادن آن در قالب و عمل آوری در گرمخانه می باشد. در این روش بر خلاف روش سنتی نیاز به حرارت بالای کوره نیست که این مساله منافع زیست محیطی قابل توجهی به دنبال دارد. در این مطالعه تاثیر پنج عامل موثر نوع محلول قلیایی، افزودن میکروسیلیس به مخلوط، دمای عمل آوری، مقدار لتریت و سن نمونه روی مشخصات آجر بررسی شده و با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب و التراسونیک نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داده است که خاک لتریت موجود در شمال غرب ایران می تواند برای تولید آجرهای سازگار با محیط زیست بر پایه‌ی تکنولوژی ژئوپلیمریزاسیون براساس استاندارد شماره ۷ ملی ایران و استاندارد ASTM-C67–03a استفاده شود. یکی از مزیت های مهم این تحقیق بر مطالعات پیشین، بررسی امکان استفاده از محلول هیدروکسیدکلسیم به عنوان فعال کننده ی ژئوپلیمری در نمونه های آجری است. نمونه های ساخته شده با این محلول در طرح های اختلاط و دماهای خاصی مقاومت مطلوبی را نشان داده اند. استفاده از محلول قلیایی هیدروکسیدکلسیم به جای محلول‌های قلیایی دیگر خطرات ناشی از تولید آجر به این روش را از بین برده و بهره برداری آسان تر از آجر ژئوپلیمری را در صنعت آجر ممکن می سازد.

واژه‌های کلیدی: **آجر ژئوپلیمری، خاک لتریت، محیط زیست.**

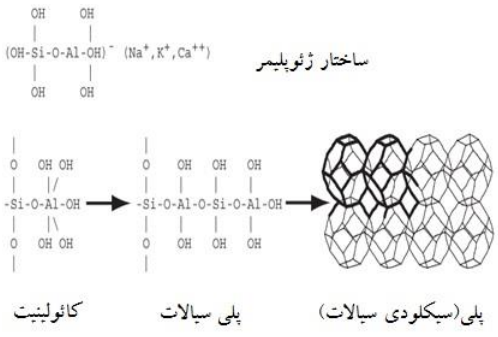
* نویسنده مسئول: s.moazzenchi@yahoo.com

۱- مقدمه

صنعت آجر یکی از صنایع بزرگ هر کشور است و در واقع یکی از معیارهای صنعتی شدن هر کشور وابسته به پیشرفت و توسعهٔصنعت ساختمان و آجر آن است. انرژی قابل توجهی سالانه صرف این صنعت در هر کشور می‌شود. از این‌رو توجه خاص به این صنعت و بهبود و توسعه آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آجر سنتی برای کسب مقاومت در ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتیگراد حرارت کوره پخته می شود. برای رساندن کوره به این درجه نه تنها بایستی سوخت زیادی مصرف شود بلکه باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای شده و در نتیجه باعث از بین رفتن منابع انرژی و صدمه به محیط زیست می‌گردد. طبق آمار ارائه شده بین سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۲ توسط سایت بهینه‌سازی مصرف سوخت شرکت ملی نفت ایران حدود ۷۰۰۰ کارخانهٔفعال آجر در ایران وجود دارد که میزان تولید اسمی آن‌ها بیش از ۵۰ میلیون تن در سال است. سهم ۴۵ درصدی هزینه‌های انرژی در تولید آجر در ایران از دیدگاه اقتصاد ملی، خود بیانگر شدت انرژی مصرفی بسیار بالا در این صنعت و لزوم توجه به آن می‌باشد[۱]. این موضوع تولید آجرهایی با مصرف انرژی کمتر و سازگار با محیط زیست را آشکار می سازد. با بررسی و تولید آجر ژئوپلیمری تا حد زیادی می توان به این هدف دست پیدا کرد.« Davidovits »و همکارانشان روی تولید آجر ژئوپلیمری با خاک لتریت مطالعه‌ای انجام داده و تأثیر دمای عمل آوری و مقدار محلول قلیایی را در نمونه‌ها بررسی کرده‌اند. بالاترین مقاومت به‌دست آمده در این تحقیق در دمای عمل‌آوری ۸۵ درجه سانتیگراد، ۱۸ مگاپاسکال و در دمای عمل‌آوری ۴۵۰ درجه ی سانتیگراد، ۶۰ مگاپاسکال با افزودن ۵٪ محلول قلیایی است. در آن مطالعه به مزایای آجرهای ژئوپلیمری به این شرح دست یافته‌اند: هزینهٔی ساخت و تجهیزات کمتر، صرف ۸ برابر انرژی کمتر برای به دست آوردن مقاومت در مقایسه با آجر سنتی و تهویهٔهوا به‌صورت طبیعی[۲]. در مطالعهٔدیگر استفاده از بقایای معدن مس برای تولید آجر ژئوپلیمری بررسی شد. بقایا با محلول قلیایی مخلوط شده و تحت فشار قرار می‌گیرند و در نهایت در کوره حرارت می‌بینند. در مطالعهٔ مذکور دمای بهینه برای عمل-آوری، ۹۰ درجه و غلظت محلول قلیایی بهینه ۱۵ مولار برآورد شد. بالاترین مقاومت فشاری آجر ۱۶ مگاپاسکال به‌دست آمده است[۳]. تحقیق دیگری ساخت آجرهای بدون سیمان را بررسی می‌کند. در این تحقیق برای تولید آجر از پودر سنگ آهک، خاکستر بادی، میکروسیلیس و آب استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش میکروسیلیس تا ۲۰ درصد وزنی آجر مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین هزینهٔتولید این نوع آجر ۶/۴ برابر از آجرهای سنتی کمتر است. تولید این نوع آجر باعث کاهش مصرف انرژی و کمک به محیط زیست می‌شود [۴].

در مقالهٔحاضر از خاک لتریت شمال غرب ایران برای تولید آجرهای ژئوپلیمری استفاده شده است. علت مطالعهٔاین خاک ارزان و در دسترس بودن آن و همچنین اثرات مطلوبی است که در آجر به‌جا می‌گذارد. کاربرد خاک لتریت با ساختار آلومینوسیلیکاتی همراه با محلول‌های قلیایی در آجرهای ژئوپلیمری مورد مطالعه قرار گرفت. استفاده از این خاک قرمز رنگ در این نوع آجر باعث کاهش مصرف انرژی تولید، کمک به محیط زیست و همچنین خصوصیات بهتری نسبت به آجر سنتی می‌شود. این موضوع می‌تواند اهمیت مطالعه و استفاده از این خاک را در صنعت ساختمان آشکار سازد.

پلیمرهای معدنی آلومینوسیلیکاتی با نام ژئوپلیمر توسط Davidovits در سال ۱۹۷۹ معرفی و بعنوان طبقه‌ی جدیدی از مصالح با انرژی کم و مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطلوب مطرح شدند. ژئوپلیمرها گروهی از پلیمرهای معدنی هستند که عمدتا ریزساختار آمورف یا نیمه بلورین دارند و در دمای محیط یا حداکثر تا دمای ۱۲۰ درجه از طریق پلیمریزاسیون مونومرهای آلومینوسیلیکاتی در محلول‌های قلیایی تولید می شوند[۵]. ساختار ژئوپلیمر در شکل ۱ نشان داده شده است. در ۳۰ سال اخیر این تکنولوژی در کاربردهای زیادی در مهندسی مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- ساختار ژئوپلیمر[۲]

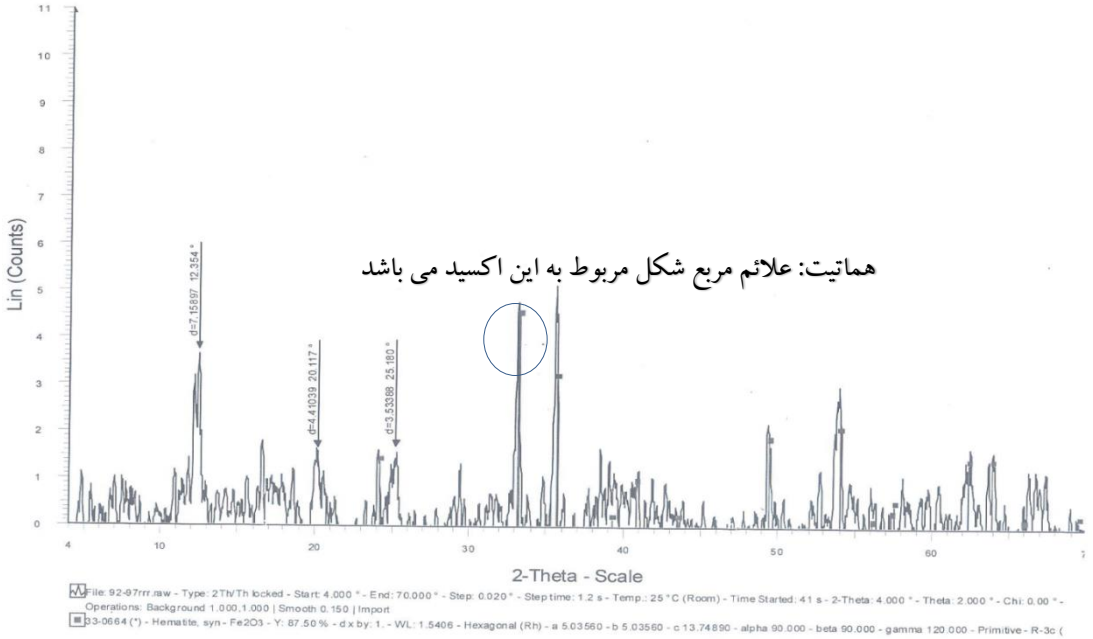
۲- مطالعه ی آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

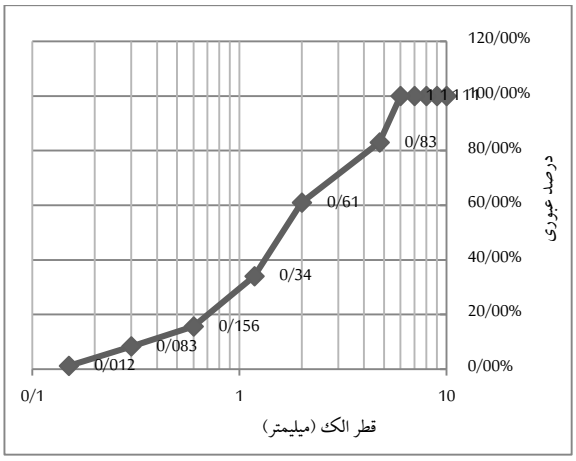
مصالح اصلی به‌کار رفته در این تحقیق خاک لتریت است. این خاک قرمز رنگ از معدن جاده ی مراغه – تهران به‌صورت کلوخه استخراج شده و برای استفاده در ساخت نمونه‌ها به‌صورت پودر در آمده است. ترکیب شیمیایی این خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود این خاک غنی در آلومین، سیلیس و اکسید آهن است. رنگ قرمز این خاک نیز به‌دلیل محتوای آهن بالای آن است. همچنین نتیجهٔ آزمایش XRD روی لتریت در شکل ۲ آمده است. کریستال این خاک، مادهٔی معدنی رسی آهن دار شناخته شده است. زیرا همانطورکه از شکل ۲ مشخص است در این آزمایش بیشترین کریستال مشاهده شده مربوط به هماتیت (Fe_2O_3) است. از مصالح دیگر استفاده شده در این تحقیق میکروسیلیس است. ترکیب شیمیایی این ماده نیز در جدول۱ آمده است. همانطور که از این جدول بر می‌آید این ماده غنی در سیلیس است. به‌عنوان محلول قلیایی ازهیدروکسیدسدیم و هیدروکسیدکلسیم استفاده شد. از ماسه به عنوان مصالح سنگ‌دانه برای تأمین استحکام و مقاومت آجر استفاده شده است. دانه بندی این سنگ‌دانه به‌صورت نمودار لگاریتمی در شکل ۳ آمده است .

جدول ۱- تجزیه شیمیایی لتریت و میکروسیلیس

نام اکسید	مقادیر اکسیدها در مصالح (٪)	
	لتریت	میکروسیلیس
سیلیس(SiO_2)	۲۸/۵۳	۸۸/۷
آلومین(Al_2O_3)	۲۶/۳۴	۱/۲
اکسید آهن III (Fe_2O_3)	۲۶/۷۷	۱/۱
اکسیدکلسیم(CaO)	۱/۴۱	۰/۸
اکسید منیزیم(MgO)	۱/۰۱	۰/۹
دی اکسید تیتانیم(TiO_2)	۴/۱۲	<۰/۱
اکسید فسفر V (P_2O_5)	۰/۱۴	۰/۱
اسید منگنز II(MnO)	۰/۰۲	۰/۱
اکسید سدیم(Na_2O)	۰/۱۲	۰/۷
اکسید پتاسیم(K_2O)	۰/۹۹	۱/۰
افت حرارتی($L.O.I$)	۱۰/۳۳	۵/۰۲
تری اکسیدگوگرد (SO_3)		۰/۲



شکل ۲- نتیجه ی آزمایش XRD خاک لتریت



شکل ۳- دانه بندی ماسه

۲-۲- نحوۀساخت نمونه‌های آجر

روند ساخت نمونه‌ها به ترتیب مراحل زیر انجام شده است:

- پس از توزین مصالح در اندازه‌های از پیش تعیین شده، خاک لتریت با محلول قلیایی مخلوط می شود.

- برای به‌دست آوردن محلول قلیایی هیدروکسیدسدیم با غلظت مناسب، مقدار معینی از این ماده که به صورت پولک تهیه شده، در آب حل و به مدت ۵ دقیقه هم زده می‌شود. حل کردن این ماده در آب باعث تولید گرمای بسیار زیاد می‌شود که بایستی قبل از استفاده از آن در تولید نمونه‌ها زمان لازم جهت سرد شدن و رسیدن آن به دمای اتاق داده شود. جهت تهیه‌ی محلول هیدروکسیدکلسیم نیز بایستی مقدار معینی از پودر آن در آب حل شده و مورد استفاده قرار گیرد. این محلول‌ها در غلظت ۱۰ مولار تهیه و استفاده شدند. لتریت و محلول قلیایی به مدت ۵ دقیقه مخلوط می شوند تا واکنش ژئوپلیمریزاسیون اولیه و چسبانندگی بین این دو ماده ایجاد شود.

- در این مرحله ماسه و آب به مخلوط اضافه می‌شود.

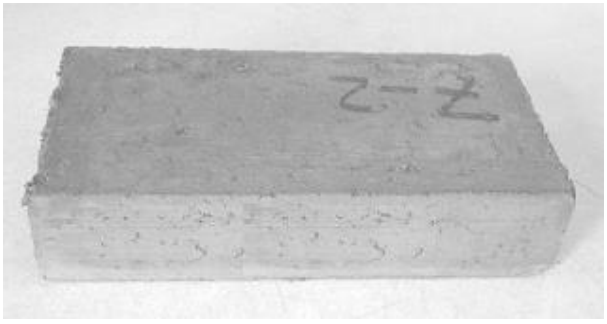
- در نمونه های حاوی میکروسیلیس بایستی این ماده به کمک مقداری از آب اختلاط به صورت ژل درآید و سپس در مخلوط استفاده شود.

- از آنجا که مقدار مخلوط کم است عمل اختلاط به کمک دست انجام گرفت. حدود ۲۰ دقیقه بایستی هم زده شود تا مواد به خوبی با یکدیگر مخلوط شوند. مخلوط در قالب های فلزی مستطیل شکل به ابعاد ۲۱۰ میلی متر طول، ۱۰۰ میلی متر عرض و ۷۰ میلی متر ارتفاع ریخته و سطح آن صاف می شود.

- مخلوط های ریخته شده در قالب توسط دستگاه آزمایش مقاومت فشاری با فشار ۷ مگاپاسکال متراکم می شوند تا هوای اضافی از داخل نمونه ها خارج شود. بعد از اعمال فشار ارتفاع نمونه ها در محدوده ی ۵۵-۵۰ میلیمتر قرار می گیرد. انجام فشار بیشتر باعث خارج شدن آب می شود که این خروج آب روی مقدار محلول قلیایی تاثیر می‌گذارد.

- بعد از اعمال فشار قالب‌ها باز می شوند و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با حرارت های مختلف نگهداری می‌شوند تا عمل آوری در گرما انجام شود.

- نمونه ها پس از خارج شدن از گرمخانه در دمای اتاق نگهداری می شوند. آزمایش‌ها در دو زمان ۷ و ۲۸ روز روی نمونه ها انجام می گردند. نمونه ای از آجر ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴- آجر ژئوپلیمری

۲-۳- روش آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌ها در دو زمان ۷ و ۲۸ روز و آزمایش جذب آب و التراسونیک در زمان ۲۸ روز روی نمونه‌ها انجام شد.

۲-۳-۱- آزمایش مقاومت‌فشاری طبق دو استاندارد

آجرهای رسی استاندارد شماره۷ ملی ایران[۶] و استاندارد ASTM-C67-03a [۷] روی نمونه‌ها انجام گرفت.

مقاومت فشاری از رابطه زیر به دست می آید:

$$P = \frac{R}{A} \qquad (۱)$$

R حداکثر بار بر حسب نیوتن

A سطح مقطع آجر بر حسب میلیمتر

P مقاومت فشاری آجر بر حسب مگاپاسکال

تأثیر پنج عامل دمای عمل آوری، سن نمونه، افزودن میکروسیلیس به نمونه، نوع محلول قلیایی و مقدار لتریت روی مقاومت فشاری نمونه ها بررسی شدند.

۲-۳-۲- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب درهر دو استاندارد ایران و ASTM-C67–03a با روندی مشابه انجام می شوند. از روش ۵ ساعت جوشاندن برای این آزمایش استفاده شده است. نتایج جذب آب برحسب درصد افزایش وزن نمونه‌های خشک با تقریب ۰/۱ درصد طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \qquad (۲)$$

w_1 وزن نمونه خشک بر حسب گرم

w_2 وزن نمونه پس از جذب آب بر حسب گرم

۲-۳-۳- آزمایش التراسونیک

آزمایش التراسونیک معیاری برای سنجش تراکم و کیفیت و یکنواختی نمونه‌های آجری است. در واقع ترک‌ها، خلل و فرج‌ها و دیگر نقص‌ها در آجر توسط دستگاه التراسونیک دیده می‌شود. هرچه سرعت صوت عبوری از داخل نمونه بیشتر باشد، یعنی نمونه متراکم‌تر است و در نتیجه خاصیت‌های مکانیکی و دوام آن بهتر هستند. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C597-09 انجام شده است. سرعت عبور صوت از نمونه از رابطه‌ی۳ بدست می آید. در این معادله l طول نمونه و t زمان عبور صوت از نمونه می‌باشد[۸]. در این فرمول طبق قوانین فیزیک سرعت صوت عبوری با تقسیم طول آجر بر زمان عبور امواج به دست می‌آید. دو پروب این دستگاه در دو سمت طولی آجر قرار می گیرند و دستگاه با محاسبه ی زمان عبور امواج ، سرعت را محاسبه و نمایش می‌دهد.

$$V = \frac{L}{t} \qquad (۳)$$

۲-٤- طرح اختلاط

جدول۲ طرح اختلاط های نمونه های ساخته شده را نشان می دهد. در ۸ طرح اولیه ، ۵۰ ٪ وزنی آجر و در ۴ طرح بعدی فقط ۱۵٪ وزنی کل آجر به مواد آلومینوسیلیکاتی (لتریت و میکروسیلیس) اختصاص داده شده است. درصد آب به مواد آلومینوسیلیکاتی نیز ۱۴ درصد با توجه به بررسی های مختلف در نظر گرفته شد. محلول‌های قلیایی، هیدروکسید سدیم و هیدروکسید کلسیم ۱۰ مولار هستند که ۵٪ وزنی آجر استفاده شدند. این طرح ها بر اساس مطالعات گسترده روی مقالات مشابه و در نظرگرفتن بهترین نتایج با توجه به مطالعات محققین پیشین انتخاب شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

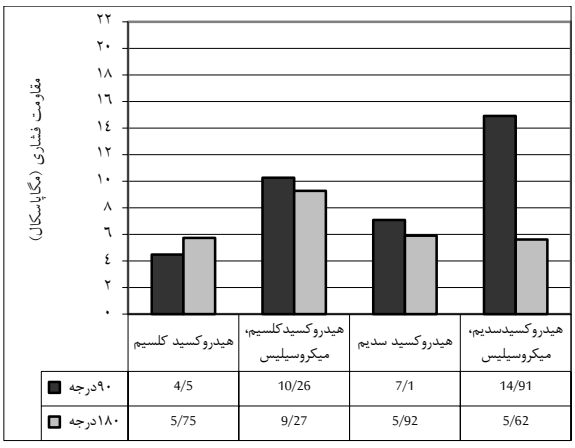
مقاومت فشاری آجر یکی از مهم‌ترین آزمایش‌ها است و می‌تواند شمای کلی از کیفیت آجر ارائه دهد. مقاومت‌های به دست آمده در روش آیین نامه ی ASTM-C67–03a بیشتر از مقاومت‌های به دست آمده در آیین نامهٔایران است.

۳-۱-۱- تأثیر دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری

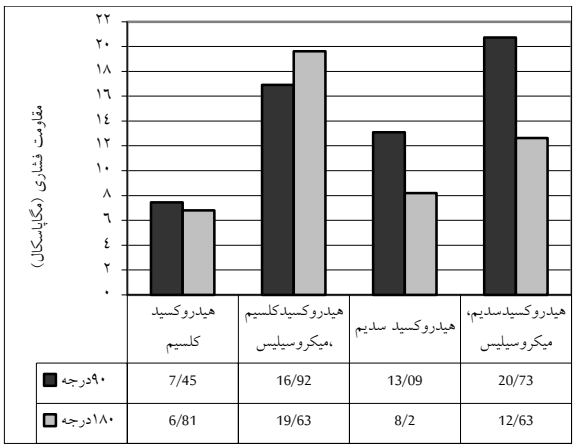
عمل آوری یکی از مهم‌ترین مراحل تولید آجر است که روی مقاومت آجرها تأثیر زیادی دارد. در این‌جا از روش عمل آوری در حرارت استفاده شده است. عمل آوری در آب کمکی به پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون نمی‌کند. آب فقط محیطی برای انجام این واکنش است و برای افزایش کارایی مخلوط استفاده می‌شود[۹]. اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری نمونه‌ها در نمودارهای ۵ و ۶ نشان داده شده است. به طور کلی افزایش دمای عمل آوری باعث پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه است. ولی این افزایش بعد از دمایی خاص، باعث کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ها می‌شود که به‌دلیل کند یا متوقف شدن واکنش ژئوپلیمری به‌دلیل تبخیر آب مخلوط است[۱۰]. این دمای خاص طبق مطالعهٔ «سعید احماری» و همکارانشان ۹۰ درجه برآورد شده است[۳]. در این تحقیق افزایش دمای عمل آوری تا ۱۸۰ درجه در اکثریت مخلوط ها باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها گردیده است. افزایش دمای عمل آوری باعث تسریع تجزیه‌ی سیلیکا و آلومینا و سپس ژئوپلیمریزاسیون تراکمی است. وقتی از سطحی بالاتر رود تشکیل سریع ژئوپلیمریک و نبودن آب کافی تجزیهٔسیلیکا و آلومینا را به تأخیر می‌اندازد و روی مقاومت اثر عکس می گذارد [۱۲،۱۱]. از آنجا که عمل آوری نمونه‌ها بدون پوشش انجام شده است افزایش حرارت باعث تبخیر سریع آب می‌شود و از آنجا که آب محیط واکنش ژئوپلیمری است، این مساله باعث ژئوپلیمریزاسیون ناقص شده و مقاومت فشاری نمونه کاهش می‌یابد. وجود آب باعث می شود مونومرهای تجزیه شده به الیگومرتبدیل شوند و اگر آب کافی موجود باشد ذرات واکنش نداده، واکنش می دهند و مخلوط ژئوپلیمری تشکیل می شود [۳].بر اساس نمودارها بالاترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه، حاوی هیدروکسیدسدیم و میکروسیلیس در هر دو روش آیین نامه ها است.

جدول ۲- طرح اختلاط نمونه ها

طرح	نوع محلول قلیایی	مواد آلومینوسیلیکاتی		نسبت آب به مواد آلومینوسیلیکاتی	نسبت ماسه به کل نمونه	درصد قلیا در کل نمونه	دمای عمل آوری
		نسبت لتریت به کل آجر	نسبت میکروسیلیس به مواد آلومینوسیلیکاتی				
۱-۹۰-Ca	هیدروکسید کلسیم	٪۵۰	۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۹۰
۲-۹۰-Ca-M	هیدروکسید کلسیم	٪۴۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۹۰
۳-۱۸۰-Ca	هیدروکسید کلسیم	٪۵۰	۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۱۸۰
۴-۱۸۰-Ca-M	هیدروکسید کلسیم	٪۴۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۱۸۰
۵-۹۰-Na	سود	٪۵۰	۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۹۰
۶-۹۰-Na-M	سود	٪۴۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۹۰
۷-۱۸۰-Na	سود	٪۵۰	۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۱۸۰
۸-۱۸۰-Na-M	سود	٪۴۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۳۸	٪۵	۱۸۰
۹-۹۰-L%-Na	سود	٪۱۵	۰	٪۱۴	٪۷۸	٪۵	۹۰
۱۰-۹۰-L%-Na-M	سود	٪۱۳/۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۷۸	٪۵	۹۰
۱۱-۹۰-L%-Ca	هیدروکسید کلسیم	٪۱۵	۰	٪۱۴	٪۷۸	٪۵	۹۰
۱۲-۹۰-L%-Ca-M	هیدروکسید کلسیم	٪۱۳/۵	٪۱۰	٪۱۴	٪۷۸	٪۵	۹۰



شکل ۵- تأثیر دمای عمل آوری روی مقاومت آجر طبق آیین نامه‌ی ایران.



شکل۶- تأثیر دمای عمل آوری روی مقاومت آجر طبق آیین‌نامه‌ی ASTM-C67–03a

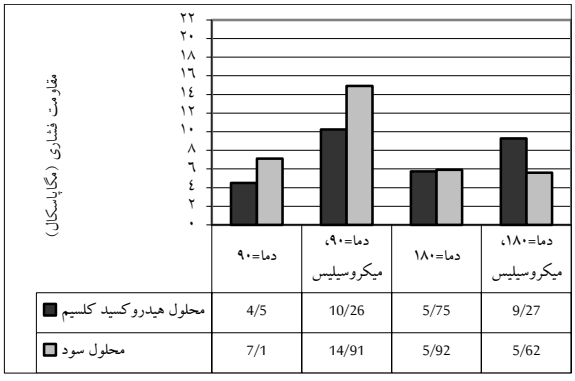
۳-۱-۲- تأثیر نوع محلول قلیایی

در نمودارهای ۷ و ۸ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی محلول‌های هیدروکسیدسدیم و هیدروکسیدکلسیم مقایسه شده است. تشکیل ژئوپلیمر نیاز به مصالح اولیه و غلظت بالای محلول قلیایی دارد. در واقع ژئوپلیمر یک گروه مخلوط‌های معدنی که ساختار آلومینیوم- اکسیژن- سیلیکون دارند را توصیف می‌کند[۱۴،۱۳]. محلول‌های قلیایی قوی استفاده می‌شود تا سبب شود یون‌های آلومینیوم و سیلیکون در مصالح منبع تجزیه شود و ملات ژئوپلیمر را تشکیل دهد [۱۵،۱۴]. نوع محلول قلیایی تأثیر مهمی روی مقاومت فشاری آجرها دارد. در تحقیقات مربوط به ژئوپلیمر معمولا از NaOH و KOH به‌عنوان محلول قلیایی فعال کننده استفاده شده است. در این تحقیق اثر $Ca(OH)_2$ نیز به عنوان محلول فعال کننده بررسی شده است. همانطورکه در نمودار دیده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی هیدروکسید سدیم بالاتر از نمونه‌های حاوی هیدروکسید کلسیم است. علت این است که هیدروکسیدسدیم نسبت به هیدروکسید کلسیم قلیای قوی‌تری است و در واکنش ژئوپلیمریزاسیون به‌عنوان فعال-کنندۀقلیایی بهتر عمل می‌کند. یون سدیم نسبت به یون کلسیم بزرگ‌تر است و باعث تشکیل الیگومرهای سیلیکات بزرگ‌تر شده، ژئوپلیمر بیشتر تولید و در نتیجه مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی هیدروکسید کلسیم به‌دست می‌آید. در مورد نمونه های حاوی میکروسیلیس در دمای ۱۸۰ درجه این موضوع صدق نمی‌کند. این نمونه به دلیل شوک حرارتی پس از بیرون آوردن از گرمخانه دچار ترک خوردگی شد و مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر به‌دست آورد. شوک حرارتی، ترک خوردن در نمونه به‌دلیل تنش حرارتی ناشی از تغییرات دمایی شدید است که در بتن و آجر اتفاق می افتد. بیشترین مقاومت مربوط به نمونۀحاوی هیدروکسیدسدیم در دمای عمل آوری ۹۰ درجه و با افزودن میکروسیلیس بر اساس هر دو آیین نامه است. علی رغم این‌که نمونه‌های حاوی محلول هیدروکسیدسدیم مقاومت بالاتری از نمونه های حاوی هیدروکسید کلسیم دارند، ولی از آنجا که هیدروکسید کلسیم خطرات استفاده از محلول هیدروکسیدسدیم در هنگام کار کردن با آن را ندارد و نسبت به آن ارزان تر است، استفاده از آن در آجر ژئوپلیمری توجیه‌پذیر است. به‌عنوان مثال نمونۀحاوی هیدروکسید کلسیم عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه و با افزودن میکروسیلیس مقاومت فشاری قابل قبولی دارد.

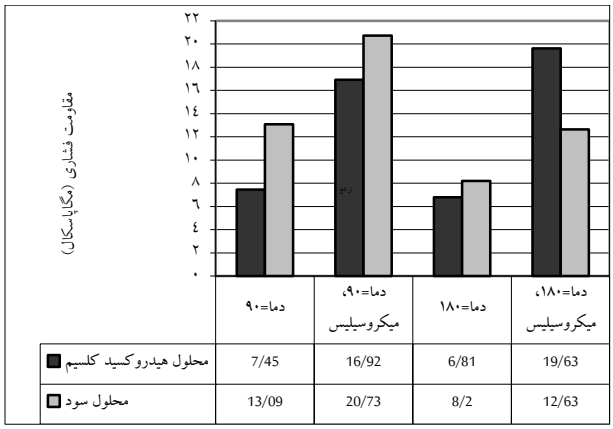
علت اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس دو آیین‌نامه که در مقایسه بین اشکال ۶ و ۷ مشخص است تفاوت در روش آزمایش است. طبق آیین نامه ی ایران نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش بایستی ۲۴ ساعت در آب غوطه ور شوند، در صورتی‌که در روش آیین‌نامه ASTM-C67–03a نمونه ها به صورت خشک تحت آزمایش قرار می گیرند که علت مقاومت بالاتر به‌دست آمده در این روش است.

۳-۱-۳- تأثیر افزودن میکروسیلیس

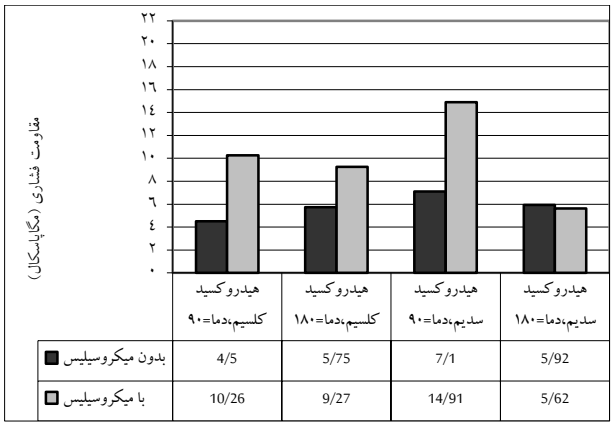
همانطور که از نمودارهای ۹ و ۱۰ مشخص است افزودن میکروسیلیس تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت دارد. این مسأله به دلیل شرکت کردن میکروسیلیس در واکنش ژئوپلیمریزاسیون به‌عنوان مادۀآلومینوسیلیکاتی در کنار لتریت وهمچنین اثر پرکنندگی آن است. میکروسیلیس حاوی مقدار زیادی سیلیس است. وقتی مدول سیلیکات افزایش می یابد مقدار سیلیکای قابل حل و پیوند Si-O افزایش یافته و مقاومت فشاری ژئوپلیمر بالا می‌رود[۱۶]. بر اساس مطالعه ای دیگر افزایش سیلیس باعث بهبود خواص ژئوپلیمر می‌شود. با افزودن سیلیس آمورف به نمونه بایستی آب اختلاط نیز افزایش یابد. در این تحقیق گزارش شده است که با افزودن ۲۰ درصد سیلیس آمورف خلل و فرج ها به میزان زیادی کاهش می‌یابد[۱۷].



شکل ۷- مقایسه ی تاثیر نوع محلول قلیایی روی مقاومت آجر طبق استاندارد ایران



شکل ۸- مقایسه ی تاثیر نوع محلول قلیایی روی مقاومت آجر طبق آیین نامه ی ASTM

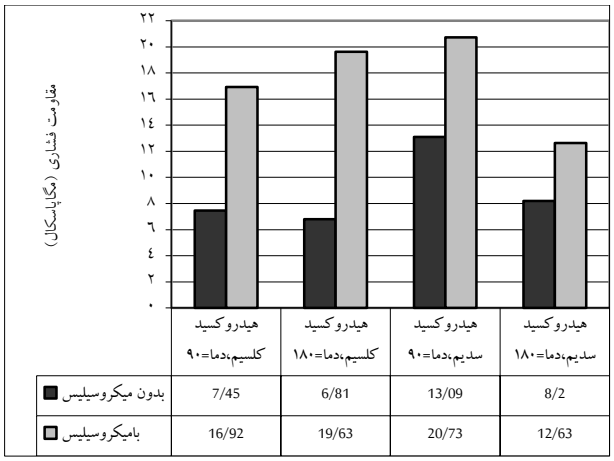


شکل ۹- اثر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت آجر طبق آیین نامه ی ایران

۳-۱-٤- تاثیر مقدار لتریت

این مقایسه با استفاده از نتایج نمونه های عمل آوری شده در۹۰ درجه صورت می گیرد. طبق جدول ۳ در ۸ طرح اول نمونه‌ها با ۵۰ درصد مواد آلومینوسیلیکاتی حاوی لتریت و میکروسیلیس و در ۴ طرح انتهایی جدول نمونه‌ها با مقدار ۱۵٪ مواد آلومینوسیلیکاتی ساخته شدند. نتایج مقایسه‌ی مقاومت فشاری در نمودار۱۱ طبق آیین نامهٔایران نشان داده شده است.

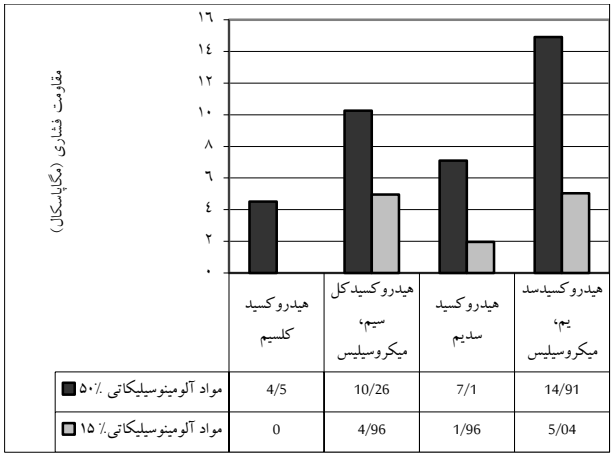
نمودار ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار لتریت مقاومت فشاری به‌صورت قابل توجهی افزایش یافته است که این به‌دلیل وجود مقدار کافی لتریت به‌عنوان مادهٔی آلومینوسیلیکاتی جهت پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون است. بنابراین مقدار مادهٔی آلومینوسیلیکاتی نیز می‌تواند تأثیر مهمی روی مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری داشته باشد و باید به‌عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰- اثر افزودن میکروسیلیس روی مقاومت آجر طبق آیین نامه ی ASTM-C67–03a

۳-۱-۵- مقایسهٔی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه

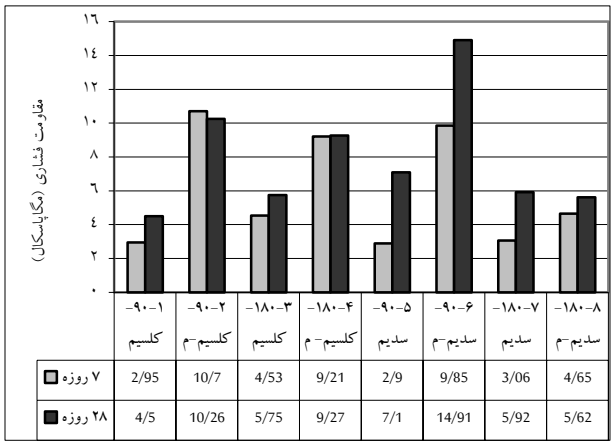
مقایسهٔ مقاومت فشاری آجرها در سنین ۷ و ۲۸ روز بر اساس استاندارد شماره ۷ ایران در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار مشخص است مقاومت فشاری۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه افزایش داشته است. این به‌دلیل کامل شدن واکنش ژئوپلیمریزاسیون با گذشت زمان است. ولی این مقدار افزایش، تفاوت چشمگیری نیست. تحقیقات نشان می‌دهد که مادهٔچسباننده ی ژئوپلیمری بر خلاف سیمان پرتلند بخش زیادی از مقاومت ۲۸ روزه را در دو روز اول به دست می آورد[۱۸].



شکل ۱۱- مقایسه ی اثردو طرح اختلاط با مقدار مختلف لتریت روی مقاومت فشاری آجر

این یکی از مزایای واکنش ژئوپلیمریزاسیون نسبت به هیدراتاسیون سیمان است که نمونه ها در مدت زمان کمی قابل بهره برداری هستند. در واقع با توجه به بررسی‌های اولیه روی تحقیق دیگر

محققین، نسبت مصالح طوری انتخاب شده که نتایج به‌دست آمده در ۷ روز در محدودهٔ شناخته شده هستند.

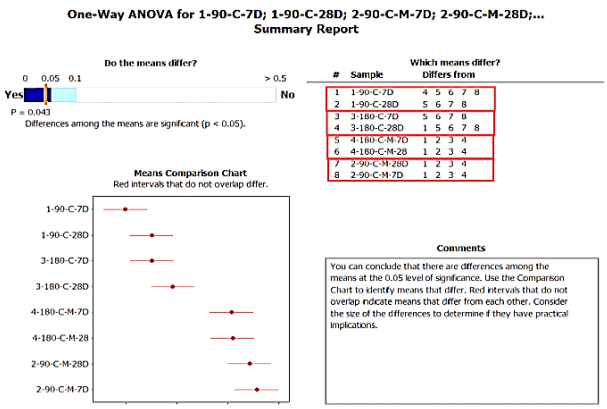


	۱-۹۰-کلسیم	۲-۹۰-کلسیم-م	۳-۱۸۰-کلسیم	۴-۱۸۰-کلسیم-م	۵-۹۰-سدیم	۶-۹۰-سدیم-م	۷-۱۸۰-سدیم	۸-۱۸۰-سدیم-م
۷ روزه	2/95	10/7	4/53	9/21	2/9	9/85	3/06	4/65
۲۸ روزه	4/5	10/26	5/75	9/27	7/1	14/91	5/92	5/62

شکل ۱۲- مقایسه ی مقاومت ۷ و ۲۸ روزه.

بی معنی بودن زمان در مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط روش آماری ANOVA در برنامهٔMinitab نیز بررسی شده است که نتیجه در شکل ۱۳ آمده است. طرح اختلاط نمونه‌های ۱و۲، ۳و۴، ۵و۶، ۷و۸ در تمام موارد یکسان و فقط در سن متفاوت هستند. در این روش، برنامه میانگین های نتایج مقاومت فشاری را مقایسه می‌کند و مشخص می‌کند که آیا میانگین‌ها با توجه به متغیرها متفاوت هستند یا خیر. در واقع اگر برنامه تفاوت معنی‌داری را تشخیص دهد کد نمونه‌ها را در مقابل نمونه‌ی مورد نظر نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۳ مشخص است برنامه بین نمونه‌هایی که از نظر متغیر زمان متفاوت هستند تفاوت معنی‌داری را تشخیص نداده و در واقع بر اساس تحلیل این روش آماری، زمان در مقایسه‌ی مقاومت فشاری این نمونه‌ها بی‌معنی شناخته شده است.

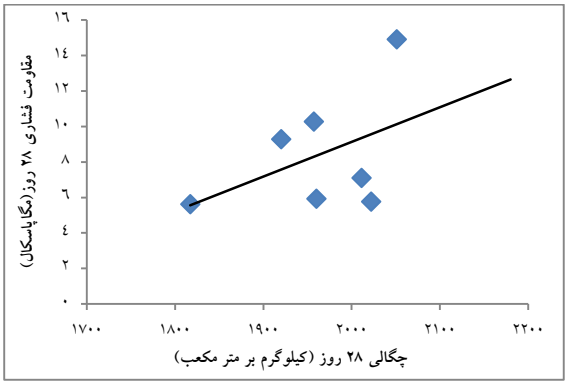
.



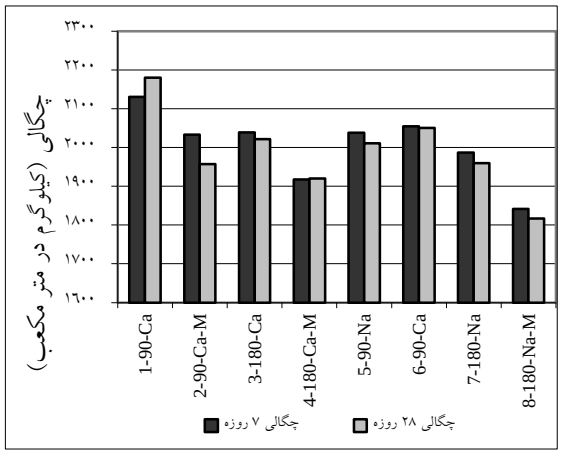
شکل ۱۳- بررسی معنادار بودن زمان با استفاده از روش ANOVA

۳-۲- چگالی آجرها

به طور کلی مقاومت فشاری با زیادتر شدن چگالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این رابطه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. علت این است که با افزایش چگالی، نمونه متراکم‌تر بوده، خلل و فرج کمتری دارد و در نتیجه مقاومت آن بالاتر می‌رود. نمونه‌ها در اثر اعمال فشار در مرحلهٔ ساخت متراکم‌تر شده و چگالی آن‌ها افزایش می‌یابد. مقدار فشار اعمالی روی چگالی و مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۴- نمودار ارتباط مقاومت فشاری و چگالی



شکل ۱۵- نمودار مقایسه ی چگالی ۷ و ۲۸ روزه

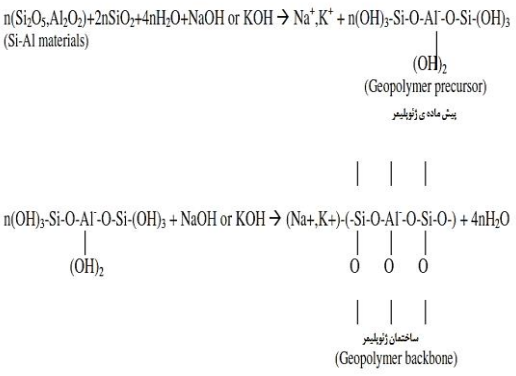
در این تحقیق نمونه ها با فشار ۷ مگاپاسکال متراکم شده‌اند. این مقدار فشار با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین اعمال فشاری که باعث خروج آب از نمونه نشود انتخاب شده است. زیرا خروج آب ممکن است روی مقدار محلول قلیایی تاثیر گذارد. اعمال فشار بیشتر باعث متراکم تر شدن و افزایش چگالی نمونه ها می شود.

همچنین از نمودار ۱۵ که چگالی نمونه‌ها را در سن ۷ و ۲۸ روز مقایسه می‌کند مشخص است که با افزایش سن نمونه ها چگالی

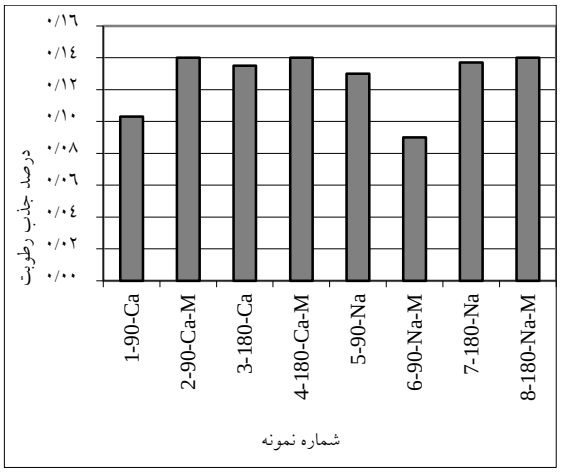
کاهش می یابد. این به دلیل تبخیر آب از نمونه ها با گذشت زمان و کاهش وزن آنهاست. طبق آخرین قسمت معادلات نشان داده شده در شکل ۱۶، طی واکنش شیمیایی ژئوپلیمریزاسیون مقداری آب آزاد می‌شود. این آب در طول مدت عمل آوری و اعمال فشار از نمونه ها خارج می شود. به طور کلی آب در فرآیند ژئوپلیمر نقشی در واکنش شیمیایی ندارد، فقط جهت افزایش کارایی به مخلوط اضافه می‌شود. این مساله برخلاف واکنش های انجام شده در سیمان پرتلند در طی مراحل هیدراتاسیون است[۱۹]. فشار ۷ مگاپاسکال وارد شده روی نمونه ها طوری انتخاب شده است که آب خارج شده از نمونه ها به حداقل برسد.

۳-۳- جذب آب

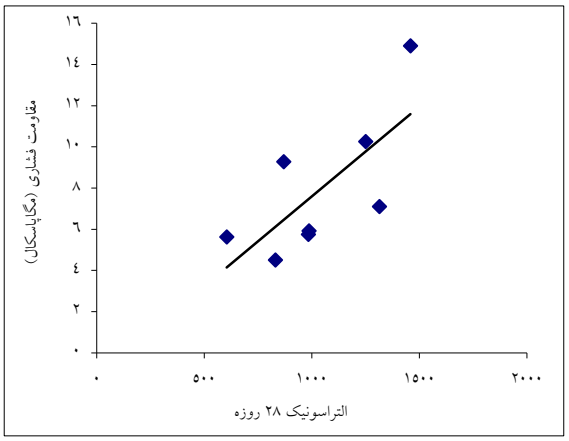
جذب آب عامل مهمی برای آجرهاست. این عامل، تخلخل آجرها و درجه‌ی واکنش آنها را نشان می دهد[۳]. فشار تراکم و مقدار آب اختلاط روی جذب آب تأثیر می‌گذارد. وقتی فشار تشکیل در حد مناسبی باشد و آب و محلول کافی برای تشکیل ژل ژئوپلیمری وجود داشته باشد مقدار این ژل در نمونه بیشتر شده، در نتیجه نمونه متراکم‌تر می‌شود و جذب آب پایین‌تری دارد. جذب آب پایین باعث مقاومت در برابر خطرهای محیطی و شیمیایی است. به این دلیل درصد جذب آب به مقادیر جدول ۴ و ۵ طبق آیین نامه‌ی آجرهای رسی ایران و آیین‌نامه‌ی ASTM-C67–03a محدود شده است. حداقل جذب آب طبق آیین نامه ی ایران ۸ درصد است که این مورد به دلیل چسبیدن ملات به آجرهاست. جذب آب نمونه‌ها در نمودار شکل ۱۷ نشان داده شده است. این مقادیر بین ۸ تا ۱۴ درصد به دست آمده است که در محدوده‌ی مجاز استانداردهای آجرهای رسی ایران و ASTM-C67–03a که در جداول ۴ و ۵ آمده اند قرار دارند.



شکل ۱۶- واکنش های ژئوپلیمر[۱۵،۲۰]



شکل۱۷- نمودار درصد جذب آب نمونه ها



شکل ۱۸- ارتباط مقاومت فشاری به التراسونیک

۳-۴- نتایج آزمایش التراسونیک

هرچه سرعت امواج التراسونیک بیشتر باشد نمونه متراکم‌تر و مقاومت فشاری بیشتر است. این مساله در نمودار شکل ۱۸ کاملا مشخص است.

۳-۵- نحوهٔ شکست آجرهای ژئوپلیمری

شکست این نوع آجر به صورت خرد شدن است. زیرا در هنگام پرکردن مخلوط در قالب و اعمال فشار، مخلوط چگال تر شده و این مساله باعث شکستن آجر از پهلو می شود.

۳-۶- استاندارد ایران

مقادیر استاندارد مقاومت فشاری و جذب آب برای آجرهای رسی طبق استاندارد ملی ایران در جداول ۳ و۴ آمده است. همانطور که از نتایج بندهای ۳-۱ مشخص است مقاومت ۲۸ روزه ی آجرها طبق

روش استاندارد ایران در محدوده ی ۴/۵ تا ۱۵ مگاپاسکال است. مقاومت های به دست آمده در مقایسه با مقاومت مورد نیاز طبق این آیین نامه که مربوط به آجرهای رسی است و در جدول ۳ نشان داده شده در محدوده ی مناسب برای آجرهای توکار و نما قرار دارد. جذب آب آجرها نیز در محدوده ی مناسب آیین نامه قرار دارد.

۳-۷- استاندارد ASTM

جدول ۵ مقادیر مقاومت فشاری و جذب آب را بر اساس استاندارد ASTM-C62-04 [21] برای کاربردهای مختلف آجر نشان می دهد. مقاومت به دست آمده برای نمونه ها بر اساس روش آیین نامه ی ASTM-C67–03a در بندهای ۳-۱ در محدوده ی ۸ تا ۲۱ مگاپاسکال قرار دارند که طبق جدول ۵ به جز کاربرد در روسازی برای بقیهٔ کاربردها مناسب هستند. جذب آب آجرها بر اساس این آیین نامه نیز در محدوده ی مناسب قرار دارد.

جدول ۳- مقاومت فشاری طبق آیین‌نامه ملی ایران[۶]

نوع آجر		حداقل مقاومت فشاری(مگاپاسکال) آجر منفرد
آجر مهندسی	درجه ۱	۳۰
	درجه ۲	۲۰
آجر نما	درجه ۱	۱۱
	درجه ۲	۹
آ جر توکار	درجه ۱	۶
	درجه ۲	۳

جدول ۴- درصد جذب آب آجر طبق استاندارد ملی ایران[۶]

نوع آجر	جذب آب حداکثر (درصد) آجر منفرد
آجر مهندسی	۱۵
آجر نما	۲۰
آجر توکار	-
جذب آب انواع آجر نباید کمتر از ۸ درصد باشد.	

جدول ۵- مشخصات استاندارد ASTM-C62-04 [21]

عنوان آجر	نوع	حداقل مقاومت فشاری	حداکثر جذب آب
دیوار باربر	LBX[A]	۹/۶	۱۶
	LBX	۴/۸	۱۶
	LB[B]	۶/۸	۲۵
	LB	۴/۸	۲۵
آجر ساختمان	SW[F]	۲۰/۷	۱۷
	MW[G]	۱۷/۲	۲۲
	NW[H]	۱۰/۳	بدون محدودیت
آجر بنایی سوراخدار	عمودی	۲۰/۷	NA
	افقی	۱۳/۸	NA
آجر نما	SW	۲۰/۷	۱۷
	MW	۱۷/۲	۲۲
آجر روسازی	SX	۵۵/۲	۸
	MX	۲۰/۷	۱۴
	NX	۲۰/۷	بدون محدودیت

٤- نتیجه گیری

در این مقاله آجرهای ژئوپلیمری با استفاده از روش ژئوپلیمریزاسیون ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. از خاک لتریت موجود در معادن شمال غرب ایران به‌عنوان ماده‌ی آلومیناسیلیکاتی و از محلول-های هیدروکسید سدیم و کلسیم به‌عنوان فعال کنندهٔ قلیایی در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. اثر متغیرهای مقدار خاک لتریت، میکروسیلیس، نوع محلول بازی، دمای عمل آوری، سن نمونه و مقدار مادهٔآلومینوسیلیکاتی روی مقاومت فشاری و برخی خواص آجرها بررسی شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق به قرار زیراست:

۱- با توجه به مقادیر مقاومت فشاری به دست آمده، آجرهای ژئوپلیمری حاوی محلول هیدروکسیدسدیم از نمونه‌های حاوی محلول هیدروکسید کلسیم بهتر عمل می‌کند.

۲- میکروسیلیس ضمن اثر پرکنندگی وارد واکنش ژئوپلیمری شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد.
۳- به صورت کلی اختلاف فاحشی بین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز دیده نمی شود. این مساله از مزایای استفاده از ژئوپلیمر است که مقاومت ۲۸ روز را در سنین اولیه به دست آورده و قابل بهره برداری است.
۴- با افزایش دمای عمل آوری پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون بیشتر است. لیکن افزایش دمای عمل آوری تا ۱۸۰ درجه در پاره‌ای موارد کاهش مقاومت را در برداشت. این نتیجه به‌دلیل تبخیر آب زیادی از مخلوط و کند شدن یا متوقف شدن واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون اتفاق افتاده است.
۵- مقدار مادۀی آلومینوسیلیکاتی نقش مهمی در مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد. با افزایش مقدار این ماده مقاومت فشاری افزایش می یابد.
۶- افزایش مقادیر سرعت امواج گذرنده از نمونه‌ها توسط آزمایش التراسونیک نشاندهنده‌ی این حقیقت است که نمونه‌ها متراکم تر بوده و مقاومت فشاری آن‌ها بیشتر است.
۷- با افزایش چگالی نمونه‌ها مقاومت فشاری آن‌ها افزایش می‌یابد و همچنین با گذشت زمان چگالی آجرها رو به کاهش می‌رود.
۸- مد شکست آجرهای ژئوپلیمری به‌صورت خرد شدن است. در واقع شکست این ماده به صورت تدریجی است.
۹- لتریت ماده ی خوبی جهت ژئوپلیمریزاسیون است.
۱۰- در این تحقیق اثر هیدروکسیدکلسیم به‌عنوان محلول قلیایی روی مقاومت فشاری و مشخصات نمونه ها مطالعه شده که در هیچ کدام از تحقیقات قبل، از این محلول به عنوان فعال کننده‌ی ژئوپلیمری در آجر استفاده نشده است. با استفاده از محلول هیدروکسیدکلسیم جایگزین محلول هیدروکسیدسدیم خطرات تولید آجر ژئوپلیمری بعلت وجود این محلول قلیایی از بین می‌رود که این موضوع خود باعث بهره برداری موثر تر از این روش در صنعت آجر می گردد.
۱۱- نتایج مقاومت فشاری و درصد جذب آب نمونه ها در محدوده‌ی استاندارد شماره ۷ آجرهای رسی ایران و استاندارد ASTM-C62-04 قرار دارند. همچنین با توجه به قیمت مناسب خاک لتریت، محلول هیدروکسیدکلسیم و میکروسیلیس بهره برداری از این آجر در صنعت توجیه اقتصادی دارد. بنابراین این نوع آجر می‌تواند در صنعت ساختمان مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد و باعث صرفه‌جویی کلان در مصرف انرژی و کمک به محیط زیست گردد.

۵- مراجع

[۱]. شرکت بهینه سازی مصرف سوخت شرکت ملی نفت ایران http://ifco.ir/industry/industryParts/mine/brick.asp ۱۳۸۲-۱۳۹۲.

[2]. Boutterin, C., Davidovits, J., "The geopolymer brick L.T.G.S. Geopolymeric Cross-Linking (LTGS) and Building materials", http://www. Geopolymer.com, Paris,1982.

[3]. Ahmari, S., Lianyang, Z., "Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization", Construction and Building Materials, 2012, 29, 323-331.

[4]. Turgut, Paki. 2012. "Manufacturing of building bricks without Portland cement ". Journal of Cleaner Production: Volume 37, December, Pages 361-367.

[5]. Rowles, M., O'connor, B., "Chemical optimization of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite", Journal of Materials Chemistry ,2003, 13(5),1161-1165.

[۶]. آیین نامه ی آجر رسی، ویژگی ها و روش های آزمون، استاندارد ملی ایران، شماره ۷، تجدید نظر چهارم.

[۷]. ASTM Designation: C 67 – 03a, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile,2003.

[۸]. ASTM (American Society for Testing and Materials), Standard test method for pulse velocity thruogh concrete, ASTM C597-09, ASTM Publication, 1995.

[۹]. Anas, M., lutfi, A., "engineering properties of geopolymer mortar bricks", Thesis for Bachelor Civil Engineering, , Malaysia, 2011.

[10]. Qhatani, M., Nasser Yossef, M., "Investigating the possibility of utilizing low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks", Journal Ceramics – Silikáty, Hawayia, Taif, Saudi Arabia, 2010, 54(2):160-168.

[11]. Dongxu, L., Zhongzi ,X., Zhimin, L., Zhihua, P., Cheng, L., "The activation and hydration of glassy cementitious materials", Cement and Concrete Research, 2002, 1145–1152.

[12]. Kayali,O., Zhu,B., "Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete", Construction and Building Materials,2005, 327–336.

[13]. Palomo, A., Macias, A., Blanco M., Puertas, F., "Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers", In: Proc 9th International Congress the Chem Cement, 1992, 505–11.
[14]. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A., Van Deventer S., "Geopolymer technology", the current state of the art. J Mater, Sci, 2007, 42:2917–33.
[15]. Davidovits, J., "Chemistry of geo-polymeric system terminology", Presented at the Geopolymer 99 International Conference, France, 1999.
[16]. Xu, H., Van Deventer, J., "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals", Elsevier company, International Journal of Mineral Processing, 2000, 247–266.
[۱۷]. رزمی، خ.، رضایی، ب.، صدری، ع.، "استفاده از بتن های ژئوپلیمری به جای بتن های پرتلند در پروژه های عمرانی"، اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ایران، بهمن ۱۳۸۹.
[18]. Comrie, D. C., Paterson, J. H., Ritchey, D. J.,"Geopolymer Technologies in Toxic Waste Management", First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiegne, France,1988.
[19]. Hardjito, D., Rangan, B. V., "Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete", Faculty of Engineering, Curtin University of Technology Perth, Australia, 2005.
[20] .Van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J., Lorenzen, L., "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals", Minerals Engineering,1997, Pages 659–669.
[21]. ASTM Designation: C 62 – 04 Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).

Laboratory evaluation of geopolymerization reaction in bricks production

Amir Tarighat
Assistant Professor of Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran,Iran
Sanaz Moazzenchi*
M.Sc. student in civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran,Iran Saeed

Abstract

Recently, Energy and environmental factors play important roles in economy and politics of different countries due to increasing complexity and evolution of international community. Therefore introducing and designing new materials which reduce manufacturing cost, decreasing energy consumption and being environmental-friendly are crucial. This paper studies the feasibility of utilizing laterite soil for production of eco-friendly bricks based on the geopolymerization technology. The procedure for producing this kind of brick simply includes: mixing laterite soil with an alkaline solution, water, sand or without sand and forming the bricks by compressing the mixture in a mold under a specified pressure. Final step is curing the bricks at a slightly elevated temperature. Unlike the conventional method for producing bricks, the new procedure does not require high temperature kiln firing hence it has significant environmental benefits. In this study, effects of five major factors including types of alkaline solution, addition condensed silicafume to mixture, curing temperature, amount of laterite soil and age of bricks were investigated. The results for compressive strength, water absorption and ultrasonic test value were analyzed by statistical method. Findings show that laterite soil available in northwest of Iran can be used to produce eco- friendly bricks based on geopolymerization technology to meet the Iran standard and ASTM requirements for engineering bricks. One of the important advantages of this research on previous studies is the possibility of using calcium hydroxide as an activator in geopolymeric brick samples. Samples made with this solution with specific mixed design and temperatures have shown good compressive strength. Using alkaline solution of calcium hydroxide instead of other alkaline solutions discards the risks of producing bricks with harmful alkaline solutions. With this more user friendly alkaline solution geopolymeric brick producing industry gains more profit with less danger.

Keywords: Geopolymeric bricks, Laterite soil, Environment.

* Corresponding Author: s.moazzenchi@yahoo.com