



## بررسی امکان سنجی استفاده از پوزولان طبیعی جهت اصلاح الگوی مصرف سیمان و بهبود دوام بتن در شرایط محیطی خلیج فارس

مهدی ولی پور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

[valipour.ma@gmail.com](mailto:valipour.ma@gmail.com)

فرهاد پرگر

کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران

[farhad\\_pr2000@yahoo.com](mailto:farhad_pr2000@yahoo.com)

### چکیده

تولید سیمان برای مصرف در بتن با مشکلات عدیده‌ای از جمله مصرف انرژی زیاد و آلودگی محیط زیست مواجه است. بنابراین اصلاح الگوی مصرف و بهینه‌سازی تولید سیمان بیش از پیش ضرورت دارد. از جمله راه‌های بهسازی تولید سیمان، جایگزین کردن بخشی از آن با مواد افزودنی معدنی ارزان قیمت و در دسترس است که پوزولان‌های طبیعی از جمله این مواد می‌باشند. هدف از این تحقیق معرفی ماده معدنی ژئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی توانمند و بررسی عملکرد آن بعنوان جایگزین سیمان در بتن به منظور بهبود دوام بتن می‌باشد. نتایج نشان دهنده بهبود مقاومت فشاری و نفوذ در برابر یون کلر آزمون‌های بتنی حاوی پوزولان طبیعی ژئولیت است.

### کلمات کلیدی

سیمان، پوزولان طبیعی ژئولیت، دوام بتن

## ۱. مقدمه

رشد روزافزون و توسعه اقتصادی و صنعتی در دنیا، بویژه در کشورهای در حال توسعه و در پی آن نیاز به اجرای سازه‌های مختلف و مقاوم موجب شده تا بتن بعنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته شود. به طوری که نسبت مصرف بتن به فولاد ۱۰ به ۱ و میزان مصرف آن در جهان بیش از یک تن به ازای هر نفر می‌باشد. با توجه به این نکته می‌توان دریافت که هر گونه بهینه‌سازی در مصالح و اجزاء تشکیل دهنده این ماده ساختمانی از جمله مصالح سنگی، مواد سیمانی، آب و مواد افزودنی، مزایای قابل توجه اقتصادی و صنعتی در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر با توجه به این رشد و نیاز بوجود آمده، بحران انرژی و منابع طبیعی بیش از حد خود نمایی می‌کند و همچنین اهمیت مسأله حفظ محیط زیست بشر نیز قابل چشم پوشی نیست. در اینجا مفهوم توسعه پایدار بوجود می‌آید و استفاده بی‌رویه انرژی و منابع طبیعی را زیر سؤال می‌برد و لزوم بهینه‌سازی را در صنعت ساختمان آشکار می‌سازد. بهینه‌سازی مصالح ساختمانی از جمله بتن یکی از پایه‌های توسعه پایدار می‌باشد و اصول ابتدایی آن بر صرفه جویی در استخراج منابع طبیعی، صرفه جویی در مصرف انرژی، حفظ محیط زیست و به کارگیری ضایعات صنعتی و مواد مضر برای محیط زیست و غیره استوار است. سیمان به عنوان یکی از اجزاء تشکیل دهنده بتن، جزئی که از یک سو انرژی فراوانی برای تولید آن مصرف می‌شود و از سوی دیگر موجب تولید حدود ۸ درصد گاز کربنیک تولید شده در جهان می‌شود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب می‌کند [۱]. بنابراین بهسازی ترکیب آن به گونه‌ای که کمترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شود و کمترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و در نهایت بهترین کارآیی ممکن از آن گرفته شود، به عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌گردد.

از راه‌های بهسازی تولید سیمان، جایگزین کردن بخشی از آن با مواد افزودنی معدنی ارزان قیمت و در دسترس است که پوزولان‌های طبیعی از جمله این مواد می‌باشند. به این ترتیب بخشی از سیمان با موادی جایگزین می‌شود که نه تنها عموماً ارزان قیمت‌تر از مواد خام اصلی سیمان می‌باشند و احتیاجی به عملیات حرارتی پر هزینه ندارند بلکه موجب بهبود خواص سیمان از دیدگاه‌های مختلف مکانیکی و پایایی می‌گردند.

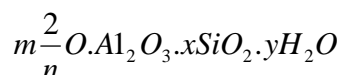
به طور کلی پوزولان‌ها به خودی خود خاصیت چسبندگی ندارند اما در کنار سیمان، آب و آهک حاصل از واکنش آب و سیمان یا آهک مخلوط در کلینکر سیمان، در دمای معمولی ترکیب شده و خاصیت چسبندگی از خود نشان می‌دهند. طرح‌های توسعه عظیمی در کشور برای افزایش تولید سیمان پیش بینی شده است. در سال‌های اخیر میزان تولید سیمان در کشور به بیش از ۳۵ میلیون تن در سال رسیده است. تولید و عرضه سیمان در طول سال ۱۳۸۴ در ۴۲ کارخانه تولیدی، حدود ۳۳ میلیون تن و حدود ۲ میلیون تن کمتر از تقاضا بوده است [۲]. پیش بینی می‌شود تا پایان سال ۱۳۸۹ میزان تولید سیمان به بیش از ۷۰ میلیون تن یعنی بیش از دو برابر میزان تولید فعلی برسد و ایران به یکی از بزرگترین کشورهای تولید کننده سیمان تبدیل شود [۳]. مسلماً این میزان افزایش در تولید سیمان سبب رشد فزاینده مصرف انرژی در کشور خواهد شد و متعاقباً مسائل زیست محیطی جدی خصوصاً از نظر تولید گاز کربنیک، ایجاد خواهد شد. همچنین، حتی با این رشد در تولید، مقدار سیمان تولیدی جوابگوی همه طرح‌های عمرانی نیست و در برخی از موارد نیاز به واردات سیمان ایجاد می‌شود. همچنین تنها با کلینکر نمی‌توان به این مقصود دست یافت زیرا بی شک مجامع بین‌المللی در زمینه محیط زیست معترض خواهند شد و احتمالاً با بحران مصرف بیش از اندازه انرژی روبرو خواهیم شد. در نتیجه استفاده از مواد پوزولانی خصوصاً پوزولان‌های طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند گزینه‌ای درخور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد. از آنجا که در کشور نیروگاه‌های حرارتی ذغال سنگ نداریم، تولید خاکستر بادی منتفی است. تولید دوده سیلیسی نیز در کشور بسیار کم است که به هیچ وجه جوابگوی مصرف داخلی نمی‌باشد. خاکستر پوسته برنج برای مصرف پوزولانی و همچنین متاکائولین نیز در کشور تولید نمی‌شود. از این رو چاره‌ای نداریم جز اینکه از پوزولان‌های طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کنیم.

همچنین با توجه به رشد صنعت ساختمان در بخش‌های گوناگون بویژه سد سازی و لزوم ساخت سازه‌های بتنی با عمر مفید بیشتر و کارآیی بهتر خصوصاً در محیط‌هایی با شرایط نامناسب همچون حاشیه خلیج فارس، اهمیت استفاده از پوزولان‌ها بویژه پوزولان‌های طبیعی که در دسترس و ارزان قیمت باشند بیش از پیش مشخص می‌شود.

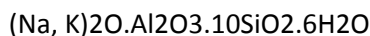
هدف از این پژوهش معرفی ماده معدنی ژئولیت به عنوان یک پوزولان طبیعی توانمند می‌باشد. در راستای این امر از پوزولان طبیعی ژئولیت بعنوان جایگزین سیمان با سه درصد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان برای ساخت آزمون‌های بتنی استفاده شده است. آزمون‌های ساخته شده به منظور بررسی نفوذ یون کلر در بتن که یکی از مهمترین پارامترهای دوام بتن می‌باشد، در دو ناحیه پاشش و جزرومد در منطقه خلیج فارس قرار داده شدند.

## ۲. معرفی پوزولان طبیعی ژئولیت [۴]

ژئولیت یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیوم هیدراته از عناصر قلیائی و قلیائی خاکی می‌باشد. در نیم قرن اخیر با بهره‌گیری از روش‌ها و ابزار پیشرفته در مطالعات کانی شناسی، نظیر X-Ray Diffractometry (XRD) و میکروسکوپ الکترونیکی، شناسایی و بررسی تعداد زیادی از کانی‌های متبلور بسیار ریز (Cryptocrystalline) ژئولیت میسر گردیده است. در صورتی که رویت آنها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان در روش‌های متداول نوری قلمی مقدور نبوده است. با استفاده از این روش‌ها، در نیم قرن اخیر حدود ۵۰ نوع ژئولیت طبیعی شناسایی شده است. ژئولیت دارای خواص فیزیکی بسیار ارزشمندی است و این امر سبب شده است که از ژئولیت بصورت طبیعی یا مصنوعی بطور گسترده در صنعت و کشاورزی استفاده شود. با شناخت خواص فیزیکی بیشتر آن، کاربرد و استفاده از این ماده روز به روز افزون‌تر می‌گردد. فرمول شیمیائی ژئولیت به شرح زیر خلاصه می‌شود:



در این فرمول  $m$  نوع کاتیون‌های قلیائی و قلیائی خاکی،  $n$  ظرفیت عنصر و  $x$  و  $y$  ضرایب متغیر با مقادیری به ترتیب ۲ تا ۱۰ و ۲ تا ۷ می‌باشد. برای مثال فرمول شیمیائی یک نوع کانی آلکالی کلینوپتیلولیت از کانی‌های ژئولیت به شرح زیر است:



این ماده می‌تواند از آب انداختگی و جداشدگی بتن تازه جلوگیری کند، فرآیند پمپاژ بتن را آسانتر کند، نفوذپذیری بتن سخت شده را کاهش دهد، پایایی بتن را خصوصاً مقاومت در برابر واکنش قلیائی سنگدانه‌ها را افزایش دهد و سبب افزایش مقاومت بتن شود [۵]. عمده‌ترین خواص ژئولیت که استفاده این ماده را در بتن رایج ساخته است خواص پوزولانی، تبادل یونی و جذب سطحی است [۷۶].

بنابراین ژئولیت ماده معدنی با ارزشی است که کاربردهای فراوانی در صنعت دارد و به فور و با کیفیت مناسب در کشور ایران یافت می‌شود. با توجه به این موضوع و مشکلات موجود در تولید و مصرف سیمان و با توجه به تخریب و خرابی زودرس سازه‌های بتنی بخصوص در مناطق جنوبی کشور بعثت دوام کم بتن تحت شرایط محیطی شدید، لزوم استفاده از این پوزولان طبیعی برای اصلاح الگوی مصرف و بهبود دوام سازه‌های بتنی و افزایش عمر مفید سازه‌ها بیشتر نمایان می‌شود. چنانچه در کشور چین سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون تن سیمان تولید می‌شود و بیش از ۲۰٪ وزن این سیمان تولیدی با ژئولیت مخلوط می‌شود [۸] و [۹]. در حال حاضر بیشترین مصرف ژئولیت در کشور چین در صنعت تولید سیمان آمیخته می‌باشد. به نظر می‌رسد بزرگترین بازار آینده ژئولیت در استفاده از آن به عنوان پوزولان به جای قسمتی یا تمام سیمان پرتلند خواهد بود [۱۰].

## ۳. برنامه آزمایشگاهی

در کلیه طرح اختلاط‌ها از سیمان پرتلند تیپ دو هرمزگان، مصالح سنگی تهیه شده از منطقه، نسبت آب به سیمان ۰/۴، عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار آب ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مجموع سنگدانه‌ها به طور تقریبی ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه سنگدانه مورد استفاده ۱۹ میلیمتر می‌باشد. اسلامپ طرح‌ها ۷ تا ۱۰ سانتیمتر است. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان مصرفی در جدول ۱ و مشخصات طرح اختلاط‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



برای اندازه‌گیری یون کلر، آزمون‌های منشوری  $15 \times 15 \times 60$  سانتی متری ساخته شده و در دو شرایط رویارویی پاشش و جزرومد قرار داده شده‌اند. مدت زمان عمل‌آوری مرطوب آزمون‌ها تحت شرایط محیطی منطقه سه روز بوده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی

L.O.I	K2O	Na2O	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	عنوان
۲	۰/۶	۰/۵	۱/۶	۱/۸	۶۳	۳/۵	۵	۲۱	سیمان
۱۰/۳۲	۱/۴۲	۲/۰۴	۰/۵	۱/۲	۱/۶۸	۱/۴۴	۱۳/۶۶	۶۷/۷۹	زئولیت

جدول ۲: مشخصات طرح‌های اختلاط

فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار آب (kg/m <sup>3</sup> )	پوزولان جایگزین (kg/m <sup>3</sup> )	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به سیمان	کد آزمون
۰/۲	۱۶۰	-	۴۰۰	۰/۴	C2
۴	۱۶۰	۴۰	۳۶۰	۰/۴	ZE10
۸	۱۶۰	۸۰	۳۲۰	۰/۴	ZE20
۱۴	۱۶۰	۱۲۰	۲۸۰	۰/۴	ZE30

#### ۴. تعیین میزان نفوذ یون کلر

برای اندازه‌گیری یون کلر، پس از نه ماه از ساخت آزمون‌های بتنی و قرارگیری در شرایط رویارویی، از آزمون‌های منشوری پودرگیری شد. عملیات پودرگیری از آزمون‌ها طبق استاندارد NT Build 443 و با استفاده از تجهیزات مربوطه از جمله دستگاه پروفیل‌گریندل انجام گرفت [۱۱]. مطابق استاندارد ASTM C114 از پودرهای حاصل محلول‌سازی شد و با استفاده از روش رنگ سنجی نوری (فتومتر) میزان یون کلر محلول‌های تهیه شده اندازه‌گیری شد [۱۲].

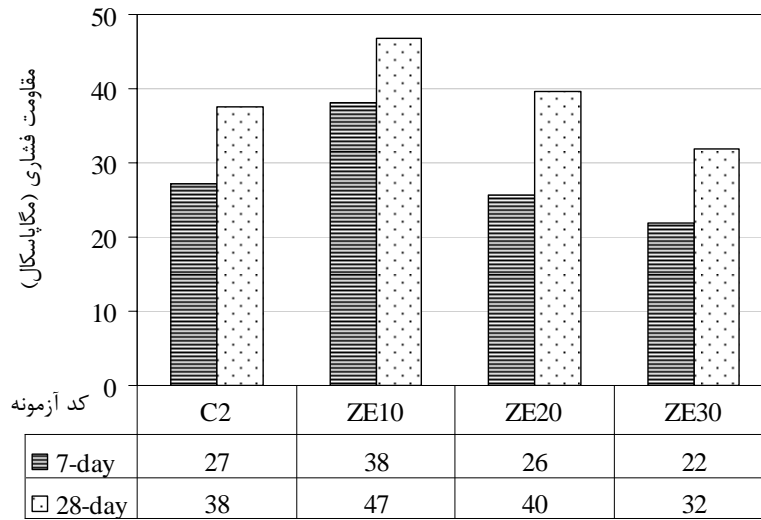
#### ۵. محاسبه ضریب انتشارپذیری

ضریب انتشارپذیری یون کلر و کلر سطحی با استفاده از قانون دوم فیک بدست آمده است. به طوری که در هر پروفیل، دو سری هشت تایی درصد وزنی یون کلر و عمق مربوطه وجود دارد. با برازش منحنی معادله دوم فیک از میان نتایج آزمایش مقادیر DC و CS بدست می‌آید [۱۳].

#### ۶. نتایج تحقیق و بحث

##### ۱.۱. آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری آزمون‌ها با ساخت آزمون‌های مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلیمتر اندازه‌گیری شد. نتایج مربوط به متوسط مقاومت فشاری سه آزمون بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روز در نمودار ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت ۷ و ۲۸ روزه آزمون ZE10 و مقاومت ۲۸ روزه آزمون ZE20 بیشتر از آزمون شاهد می‌باشد. ولی مقاومت ZE30 در هر دو سن از مقاومت فشاری آزمون شاهد کمتر می‌باشد.



نمودار ۱: مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی

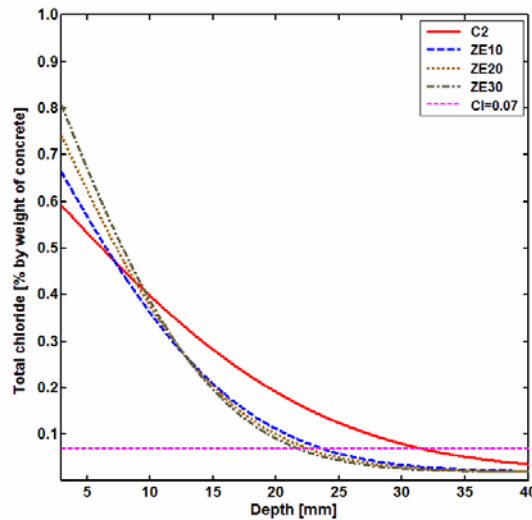
## ۲.۶. پروفیل یون کلر

پروفیل‌های کلر محلول در اسید (کلر کل) بدست آمده از نمونه‌های حاوی پوزولان در ناحیه پاشش و جزرومد به ترتیب در نمودارهای ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، مقدار کلر بحرانی برای شروع خوردگی در ناحیه خلیج فارس حدود ۰/۰۷ درصد وزن بتن در نظر گرفته شده است که در نمودارها به صورت خط موازی محور X مشخص شده است [۱۴].

همانطور که از پروفیل‌های ارائه شده مشاهده می‌شود در هر دو ناحیه پاشش و جزرومد عملکرد هر سه نمونه ZE10، ZE20 و ZE30 از نظر مقدار و روند انتشار یون کلر بهتر از نمونه C (شاهد) می‌باشد.



نمودار ۲: پروفیل‌های یون کلر از نمونه‌های واقع در ناحیه قرارگیری جزرومد



نمودار ۳: پروفیل‌های یون کلر آزمون‌های واقع در ناحیه قرارگیری پاشش

مقدار نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلیمتری بتن در جدول ۳ و مقادیر ضریب انتشارپذیری به ترتیب در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که از نتایج بر می‌آید مقدار نفوذ یون کلر در آزمون‌های حاوی پوزولان طبیعی زئولیت نسبت به آزمون شاهد (بدون پوزولان) در هر دو ناحیه پاشش و جزرومد کاهش محسوس داشته است به طوری که در ناحیه جزرومد به طور متوسط ۶۹ درصد و در ناحیه پاشش ۴۶ درصد کاهش در مقدار نفوذ یون کلر در عمق مشخص شاهد هستیم. در بین آزمون‌های حاوی پوزولان در هر دو ناحیه پاشش و جزرومد آزمون ZE30 عملکرد مناسبتری داشته است.

جدول ۳: مقادیر نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلیمتری بتن در طرح اختلاط‌های مختلف (درصد وزنی بتن)

کد آزمون	ناحیه جزرومد	درصد کاهش نسبت به آزمون شاهد	ناحیه پاشش	درصد کاهش نسبت به آزمون شاهد
C2	۰/۱۵۱	شاهد	۰/۱۹۲	شاهد
ZE10	۰/۰۴۶	۶۹	۰/۱۱۳	۴۱
ZE20	۰/۰۴۷	۶۹	۰/۱۰۱	۴۷
ZE30	۰/۰۴۴	۷۱	۰/۰۹۲	۵۲

ضریب انتشارپذیری آزمون‌های حاوی پوزولان نسبت به آزمون شاهد به طور متوسط در ناحیه پاشش ۵۵ درصد و در ناحیه جزرومد ۸۱ درصد کاهش نشان می‌دهد. و در بین آزمون‌های حاوی پوزولان طبیعی زئولیت آزمون ZE20 در ناحیه جزرومد و آزمون ZE30 در ناحیه پاشش عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند.



جدول ۴: نتایج ضریب انتشارپذیری یون کلر در طرح اختلاط‌های مختلف (متر مربع بر ثانیه)

ناحیه پاشش		ناحیه جزرومد		کد نمونه
درصد کاهش نسبت به شاهد	D×10-12	درصد کاهش نسبت به شاهد	D×10-12	
شاهد	۶/۶۶	شاهد	۱۱/۰۷	C2
۴۸	۳/۴۳	۸۱	۲/۱۱	ZE10
۵۶	۲/۹۳	۸۲	۲/۰۰	ZE20
۶۱	۲/۶۰	۸۱	۲/۱۴	ZE30

همچنین با توجه به پروفیل‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که با جایگزین کردن پوزولان زئولیت با سیمان مقدار کلر سطحی بتن افزایش می‌یابد به طوری که در هر دو ناحیه، هر سه نمونه حاوی پوزولان کلر سطحی بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند. نمونه ZE20 در ناحیه جزرومد و نمونه ZE30 در ناحیه پاشش بیشترین مقادیر کلر سطحی را دارا هستند. البته با توجه به تاثیرپذیری پارامترهای ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی از همدیگر، باید به طور همزمان مورد تحلیل قرار گیرند.

## ۷. نتیجه گیری

با توجه به نتایج ارائه شده و تحلیل صورت گرفته در متن مقاله می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان طبیعی زئولیت موجب بهبود ریزساختار و پایایی بتن در محیط‌های خورنده از جمله خلیج فارس می‌شود و با جایگزینی این پوزولان می‌توان عمر مفید سازه‌های بتنی را افزایش داده و از تخریب زودرس آنها در اثر عوامل مخرب از جمله خوردگی آرماتور در بتن جلوگیری نمود.

با در نظر گرفتن توام مقدار نفوذ یون کلر در عمق مشخص ۲۰ میلیمتری، ضریب انتشارپذیری یون کلر، مقدار کلر سطحی و مقاومت فشاری به دست آمده می‌توان گفت که جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد پوزولان زئولیت برای کم کردن مصرف سیمان و بهبود مشخصه‌های بتن مناسب می‌باشد.

بررسی پارامترهای تحلیل شده نشان می‌دهد وضعیت ناحیه پاشش نسبت به ناحیه جزرومد بحرانی‌تر بوده و در این ناحیه تمهیدات ویژه‌ای برای افزایش دوام و نگهداری از بتن لازم می‌باشد.

مواد پوزولانی توانمند همچون دوده سیلیسی، روبراه آهن گدازی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن و خاکستر بادی یا در کشور به صورت محدود و قیمت زیاد تولید می‌شوند یا اینکه با قیمت گزاف از کشورهای دیگر وارد می‌شوند. کشور ما ایران، با توجه به دارا بودن آتشفشان‌های متعدد و به لحاظ تنوع زمین‌شناسی، دارای منابع غنی از پوزولان‌های طبیعی می‌باشد. در نتیجه بسیار ارزشمند خواهد بود که منابع پوزولانی کشور با طرح‌های جامع شناسایی و مورد ارزیابی فنی قرار گیرند.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که با توجه به اینکه مواد پوزولانی توانمند همچون دوده سیلیسی، روبراه آهن گدازی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن و خاکستر بادی یا در کشور به صورت محدود و قیمت زیاد تولید می‌شوند یا اینکه با قیمت گزاف از کشورهای دیگر وارد می‌شوند، پوزولان طبیعی زئولیت می‌تواند یکی از بهترین گزینه‌ها برای جایگزینی این پوزولان‌ها بوده و با جایگزینی آن با سیمان، تولید سیمان را کاهش داد و از این طریق بتوان مشکلات موجود در تولید سیمان از جمله مصرف انرژی فراوان و آلودگی محیط زیست را تا حدودی برطرف نمود.



## مراجع

1. Mehta PK, "Greening of the concrete industry for sustainable development", *Concrete International, Volume 24, Issue 7, Pages 23-29, 2002.*
۲. جلال زاده، ع.ا.، (۱۳۸۵)، "ضرورت استفاده از سیمانهای آمیخته (مخلوط) در طرحهای عمرانی"، مجموعه مقالات همایش سیمانهای پوزولانی از تولید به مصرف، تهران، دانشگاه علم و صنعت.
3. [www.irancement.com](http://www.irancement.com)
۴. احمدی، ب.، (۱۳۸۶)، "بررسی و امکان سنجی استفاده از زئولیت به عنوان پوزولان در بتن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
5. N. Q. Feng and G. F. Peng, "Applications of natural zeolite to construction and building materials in China", *Construction and Building Materials, Volume 19, Issue 8, Pages 579-584, 2005.*
6. N. Q. Feng, H. M. Yang and L. H. Zu, "The strength effect of mineral admixture on cement concrete" *Cement and Concrete Research, Volume 18, Issue 3, Pages 464-472, 1988.*
7. N. Q. Feng, G. Z. Li and X. W. Zang, "High-Strength and flowing Concrete zeolitic mineral admixtures", *Cement, Concrete and Aggregates, Volume 12, Issue 2, Pages 61-69.*
8. Sammy Y. N. Chan and Xihuang Ji, "Comparative Study of the Initial Surface Absorption and PFA Concretes", *Cement and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, Pages 293-300, 1999.*
9. C. S. Poon, L. Lam, S. C. Kou and Z. S. Lin, "A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes", *Construction and Building Materials, Volume 13, Issue 8, Pages 427-432, 1999.*
10. Roskills Report, "The Economics of Zeolites", [www.roskill.com/reports/zeolites](http://www.roskill.com/reports/zeolites), 2003.
11. NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration," ESPOO, Finland, 1995.
12. ASTM C114-00, *Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.*
۱۳. رفیعی، ع.ر.، (۱۳۸۶)، "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس با رویکرد احتمال اندیشانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
۱۴. پرگر، ف.، (۱۳۸۵)، "بررسی پارامترهای موثر بر غلظت کلر بحرانی برای شروع خوردگی میلگردهای فولادی در بتن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.