

**M. N. Wahedy**

Faculty of Civil Engineering,  
Semnan University, Semnan,  
Iran.

**e-mail:**

mnajimw1@gmail.com

**M. K. Sharbatdar \***

Professor, Faculty of Civil  
Engineering, Semnan  
University, Semnan, Iran.

**e-mail:**

msharbatdar@semnan.ac.ir

**O. Rezaifar**

Professor, Faculty of Civil  
Engineering, Semnan  
University, Semnan, Iran.

**e-mail:**

orezayfar@semnan.ac.ir

## **Evaluation of Sustainable Development Indicators of Infrastructures by Replacing Natural Pozzolans with High Silicate and Alumina in Cement-Based Mortar**

*Using natural pozzolan materials to produce cement-based mortar is a suitable solution to reduce energy consumption and environmental impacts. In this experimental study, slump, compressive strength, water absorption, and sustainable development indicators statistical analysis of cement mortar containing natural pozzolans consist of high silicate aluminate with different percentages (6, 13 and 20%) substitute with cement in mortars were investigated. In this paper 8 mix designs including reference samples were compared, the main variations were pozzolan percentage replacement and sand granulation. Findings showed that the use of 13% of natural pozzolans containing high silicate and aluminate as a cement substitute after 56-days of curing increased the compressive strength of mortar by 2.23%, and decreases the water absorption of mortar 1.6% compared to the reference samples. In addition, the analysis and evaluation of sustainable development indicators of this mortar concludes that the optimal percentage of replacement with cement in the mortar, leads to a reduction in global warming potential and energy consumption by 13% in the production of one ton of cement in the conventional way. That plays a positive role to help climate change, reducing air pollution and reduce emission of greenhouse gases.*

**Keywords:** Sustainable Development Indicators, Cement Mortar, Natural Pozzolan, High Silicate Aluminate, Infrastructure Structures.

---

\* Corresponding author

Received 06 June 2022, Revised 28 August 2022, Accepted 31 August 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8267.1402

## ارزیابی شاخص‌های توسعه پایدار در اجرای سازه‌های زیربنایی با جایگزینی پوزولان طبیعی دارای سیلیکات و آلومینات بالا در ملات پایه سیمانی

استفاده از مواد پوزولان طبیعی برای تولید ملات پایه سیمانی یک راه‌حل مناسب برای کاهش مصرف انرژی و تأثیرات محیط‌زیستی می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی، روانی، مقاومت فشاری، جذب آب و همچنان تحلیل آماری شاخص‌های توسعه پایدار ملات سیمانی حاوی پوزولان طبیعی دارای آلومینات سیلیکات بالا با درصد‌های مختلف پوزولان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان (۶، ۱۳ و ۲۰ درصد) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، ۸ طرح اختلاط به همراه طرح نمونه مرجع ساخته و مقایسه شده است. متغیر اصلی درصد‌های جایگزینی و دانه‌بندی، ماسه می‌باشد. یافته‌های آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از ۱۳ درصد پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا به عنوان جایگزین سیمان در ملات مقاومت فشاری ۵۶ روزه ملات را ۲/۲۳ درصد نسبت به نمونه‌های مرجع افزایش داده و جذب آب ملات را ۱/۶ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش می‌دهد. ضمناً از تحلیل و ارزیابی شاخص‌های توسعه پایدار ملات چنین نتیجه‌گیری می‌شود که درصد بهینه جایگزینی با سیمان منجر به کاهش پتانسیل گرمایش جهانی و مصرف انرژی به میزان ۱۳ درصد در تولید یک تن سیمان به روش معمولی می‌گردد که نقش ارزنده را در تغییر اقلیم، کاهش آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای بازی می‌کند.

**واژگان کلیدی:** شاخص‌های توسعه پایدار، ملات سیمانی، پوزولان طبیعی، سیلیکات و آلومینات بالا، سازه‌های زیربنایی.

محمد نجیم واحدی

دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.  
پست الکترونیک:  
mnajimw1@gmail.com

محمد کاظم شربتدار\*

استاد، دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.  
پست الکترونیک:  
msharbatdar@semnan.ac.ir

امید رضایی‌فر

استاد، دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.  
پست الکترونیک:

orezayfar@semnan.ac.ir

### ۱- مقدمه

دارد که عبارت از آسایش مردم، رشد اقتصادی و حفظ محیط‌زیست می‌باشد. سازمان‌های مختلف بین‌المللی و کشورهای که در بخش محیط‌زیست و توسعه پایدار در سطح جهانی کار می‌کنند دارای اهدافی هستند. هدف اصلی تدوین شاخص‌ها، استفاده از آنها جهت بررسی‌های تطبیقی و همچنین نظارت بر جهت‌گیری‌های کلان کشورها و هدایت آنها در راستای توسعه پایدار عنوان شده است [۱]. البته بر این نکته نیز تأکید شده که استفاده از شاخص‌ها بسته به شرایط اقتصادی، اجتماعی و نیروی انسانی هر کشور متفاوت می‌باشد. به همین دلیل نیازی برای استفاده از کلیه شاخص‌ها از سوی کشورها مطرح

سیمان کاربرد فراوان در همه پروژه‌های عمرانی دارد ولی تولید آن باعث مصرف انرژی بیشتر و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای بالاخص دی‌اکسیدکربن شده و سبب گرمایش سطح زمین می‌گردد. به صورت کل، اهداف اساسی و بین‌المللی توسعه پایدار روی سه حوزه تمرکز

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۰۳/۱۶، بازنگری ۱۴۰۱/۰۶/۰۶، پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۰۹.  
(DOI): 10.22091/cer.2022.8267.1402 شناسه دیجیتال

نشده و به همین دلیل به کشورها توصیه شد تا شاخص‌هایی را انتخاب کنند که با سیاست‌ها و اولویت‌های ملی و کلان آنها تناسب داشته باشند. بعضی از اهداف ۱۷ گانه مرتبط به تحقیق این سازمان‌های جهانی عبارتند از: دسترسی به انرژی ارزان و پایدار و قابل تجدید، بهبود اقتصاد و امنیت شغلی برای همه، زیرساخت‌های انعطاف‌پذیر، نوآوری و ترویج صنعتی پایدار، کاهش نابرابری داخل و بین کشورها، شهرهای امن، انعطاف‌پذیر و پایدار، اطمینان از مصرف و تولید الگوی‌های سازگار با محیط‌زیست، اقدامات جدی و فوری برای تغییرات آبی و هوا و اثرات آن، حفظ و پایداری دریاها، مدیریت پایدار توقف و از دست دادن تنوع زیستی، مبارزه با بیابان‌زایی و مدیریت جنگل‌ها، ارتقای فراگیر و صلح‌آمیز برای جامعه و توسعه پایدار، تأمین و تنفیذ قانون برای همه و نهادهای مسئول و جوابگو در تمام سطوح، تقویت مشارکت جهانی برای تطبیق توسعه پایدار [۲]. کشورها تلاش دارند ابتدا به کاهش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای اقدام نمایند تا بتوانند در میانه قرن جاری به آب‌وهوای مطلوب دست پیدا کنند. هدف توافقنامه پاریس نیز کاهش گرمایش کره زمین در حد قبل از انقلاب صنعتی به زیر ۲ درجه سانتیگراد ترجیحاً ۱/۵ می‌باشد. اثر گازهای گلخانه‌ای یک عامل اصلی در گرم نگه داشتن زمین است، زیرا این گازها مقداری از گرمای سیاره را در فضا نگه می‌دارد که در غیر این حالت، از جو زمین خارج خواهند شد. گازهای گلخانه‌ای شامل بخار آب، دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن و گازهای دیگر است. دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای مانند یک پتو در جو زمین عمل می‌کند، اشعه مادون قرمز را می‌گیرند و از فرار آن به فضای خارج جلوگیری می‌کنند. اثر واضح گازهای گلخانه‌ای، گرم شدن پایدار جو و سطح زمین و در نتیجه گرم شدن کره زمین است [۳]. پتانسیل گرم شدن کره زمین یا ( $GWP^1$ )، به منظور مقایسه تأثیرات گازهای

مختلف در گرم شدن کره زمین استفاده می‌شود. مدت زمانی که معمولاً برای پتانسیل گرم شدن کره زمین استفاده می‌شود ۱۰۰ سال است؛ یعنی میزان انتشار یک تن گاز در مدت زمان معینی نسبت یک تن گاز دی‌اکسید کربن چه مقدار انرژی را جذب می‌کند. به هر اندازه که پتانسیل گرم شدن کره زمین بزرگتر باشد، به همان اندازه تأثیر گاز در گرمایش زمین بیشتر محسوب می‌شود. معادل دی‌اکسید کربن از حاصل ضرب حجم گاز به تن در پتانسیل گرمایش زمین یا پتانسیل گرم شدن کره زمین گاز مربوطه به دست می‌آید [۴]. معادل دی‌اکسید کربن به اختصار ( $CO_2\text{-eq}$ ) شناخته می‌شود. هدف اصلی از توسعه پایدار در کنار موضوعات دیگر، بهینه‌سازی مصرف منابع از جمله انرژی است. مفهوم بهینه‌سازی این نیست که انرژی مصرف نشود؛ بلکه به دنبال جلوگیری از اتلاف آن باید بود. توسعه پایدار در حقیقت عنصری است که منابع تجدیدناپذیر که متضمن زندگی نسل‌های آینده است را مدیریت می‌کند. تمرکز اصلی توسعه پایدار در حقیقت، تعادل بین سه بخش (محیط‌زیست، اقتصاد و اجتماع) است و مهم است که تعادل بین این سه بخش برقرار باشد [۱]. صنعت ساخت‌وساز یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین صنعت بوده که زیرساخت‌های اساسی برای رفاه و آرامش بشر از طریق ساخت‌وساز را تأمین می‌کند و از طرفی به بزرگ‌ترین آلوده‌کننده محیط‌زیست (آب‌وهوا) تبدیل شده است. بتن و ملات از جمله موادی هستند که بعد از آب در جهان به شکل گسترده مصرف می‌شوند [۲]. صنعت ساخت‌وساز، سالانه در سطح جهان حدود  $3 \times 10^{21}$  کیلوگرم مواد خام مصرف می‌کند که حدود نیمی از مصرف کل مواد خام است. از این‌رو، با رشد روز افزون ساخت‌وساز، نیاز به مصالح ساختمانی افزایش یافته و در مقابل، افزایش ضایعات نیز متصور است. بنابراین استفاده از روش‌های پایدار و استفاده از مواد جایگزین که انرژی و هزینه کمتر

<sup>2</sup>- Carbon dioxide equivalent

<sup>1</sup>- Global Warming Potential

عنوان جایگزین سیمان در ملات، در این پژوهش از شاخص‌های مختلف توسعه پایدار که توسط کشورهای پیشرفته و در حال پیشرفت پیشنهاد شده و تعیین‌کننده پایداری و ناپایداری وضعیت توسعه یافتگی می‌باشد، استفاده خواهد شد. شاخص‌ها، ملاک و اصولی هستند که خصوصیات کیفی را در قالب ارقام کمی بیان می‌کنند و برای سنجش داده‌ها و اطلاعات در تصمیم‌گیری مؤثر می‌باشند [۱۲]. استفاده بهینه انرژی از طریق طراحی و انتخاب مواد سازگار با محیط‌زیست باعث کاهش چشم‌گیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی اکسید کربن شده که این گازها علت اصلی تغییرات آب‌وهوا می‌باشند [۲ و ۱۳].

تولید سیمان که عامل عمده تولیدکننده دی اکسید کربن می‌باشد، می‌تواند با جایگزینی موادی مانند پوزولان‌ها، مواد افزودنی شیمیایی را کاهش دهد. استفاده از پوزولان طبیعی (مصالح بومی) که از نگاه محیط زیستی بررسی شده، یکی از راهکارهای سالم، مفید و کم هزینه می‌باشد که سازگار با محیط‌زیست است [۱۴ و ۱۵]. استفاده از مواد مکمل سیمانی (پوزولان‌ها) و استفاده مؤثر از ضایعات جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و دوده سیلیس به یک روند اصلی در فناوری بتن تبدیل شده است. این مواد معدنی با خواص پوزولانی باعث بهبود عملکرد مصالح سیمان پرتلند می‌شوند، که با جایگزینی درصد‌های مختلف با سیمان می‌توانند باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام محصولات سیمانی گردند. این موارد می‌تواند یک گزینه جایگزین مناسب برای استفاده‌های آینده از بتن باشد [۱۶]. پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که خود به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی بوده یا دارای ارزش چسبانندگی کم هستند، اما به شکل بسیار ریز در مجاورت رطوبت طی واکنش شیمیایی با هیدروکسید کلسیم، سیلیکات کلسیم هیدراته شده را به وجود می‌آورند. پوزولان‌ها به طور کلی، طبق استاندارد ملی ایران شماره ۳۴۳۳ و ASTM C311 به عنوان ماده‌ای سیلیسی تعریف می‌شود [۱۷ و ۱۸].

و کاهش آلودگی هوا را در بر داشته باشد لازم است [۵]. تولید دی اکسید کربن یکی از مشکلات جدی برای بشر و طبیعت است که صنعت ساختمان با مصرف سیمان که جز لاینفک هر نوع ساخت می‌باشد این پدیده را افزایش می‌دهد. سالانه در مقابل هر نفر در دنیا یک تن بتن تولید می‌شود [۶]. هر تن سیمان چیزی کمتر از یک تن گاز دی اکسید کربن تولید می‌کند، تولید یک تن سیمان ۷ گیگاژول انرژی نیاز دارد که معادل ۲۷۷ کیلووات بر ساعت برق می‌شود [۷]. البته فناوری‌های جدید، این مقدار را در کشورهای پیشرفته به نصف کاهش داده است. حدود ۸۰ درصد از دریاها امواج گرم دریایی را تاکنون تجربه کرده‌اند که خود نشان‌دهنده گرمایش زمین می‌باشد [۸]. از عواقب وخیم تغییرات اقلیمی می‌توان از حوادث آب‌وهوایی شدید، افزایش طوفان‌ها، موج‌های گرم طولانی، کاهش سطح پوشش برف، وقوع مکرر سیل‌ها، تغییر نسبت گونه‌های گیاهی و جانوران و از بین رفتن تنوع زیستی، کاهش آب برای انسان‌ها و کشاورزی و تولید انرژی نام برد [۹]. هر سال بیشتر از ۴ بلیون تن سیمان در سراسر جهان تولید می‌شود که ۸ درصد دی اکسید کربن دنیا را تولید می‌کند و طبق توافقنامه تغییر اقلیم پاریس ۲۰۱۵، کشورهای بزرگ تولیدکننده سیمان (انجمن بتن و سیمان جهان<sup>۳</sup>) نظر به اهداف ۱۷گانه توسعه پایدار تا سال ۲۰۳۰، مکلف به کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن به اندازه ۱۶ درصد می‌باشند [۱۰]. مرجع امتیازدهی ساختمان‌های سبز امریکا (LEED<sup>۴</sup>) نیز تأکید بر کاهش مصرف انرژی، مصرف مواد و ضایعات دارد [۱۱]. توسعه پایدار، توسعه‌ای است که از نظر فنی بهینه، از نظر اقتصادی پایدار، از نظر زیست‌محیطی غیرمخرب و از نظر اجتماعی مرفه و قابل‌پذیرش برای استفاده‌کنندگان باشد. برای بررسی و سنجش میزان توسعه پایدار و از سوی دیگر به عنوان معیار سنجش در استفاده از پوزولان طبیعی به

<sup>3</sup>- Global Cement Concrete Association

<sup>4</sup>- Leadership in Energy & Environmental Design

سنگدانه و ۱۵ درصد پوزولان به عنوان جایگزین سیمان مقاومت فشاری را نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهد [۲۶].

در این تحقیق، از پوزولان طبیعی حاوی آلومینات و سیلیکات بالا که منبع آن در استان پروان کشور افغانستان موجود است، در ترکیب ملات‌های سیمانی به عنوان جایگزین سیمان با درصد‌های مختلف استفاده شده است. بعد از آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب نمونه‌ها، درصد بهینه جایگزینی انتخاب شده و مورد بررسی شاخص‌های توسعه پایدار قرار گرفته است. قابل ذکر است این پوزولان بومی ماده جدیدی است که تا به حال به عنوان جایگزین سیمان در بتن و یا ملات‌ها استفاده نشده و هیچ اطلاعات علمی از خصوصیات آن در دست نیست. بنابراین یافته‌ها و نتایج این تحقیق مبین نوآوری مقاله می‌باشد.

## ۲- ضرورت انجام تحقیق

رویکرد توسعه پایدار و مسائل زیست‌محیطی در اجرای پروژه‌های زیربنایی دارای اهمیت زیاد است، چون از یک طرف نیازهای نسل‌های بعدی را تأمین نموده و از طرف دیگر، سبب کاهش خطرات جدی مثل گرمایش سطح زمین می‌گردد. سیمان کاربرد فراوان در همه پروژه‌های عمرانی دارد ولی تولید سیمان باعث مصرف انرژی بیشتر و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای بالاجایگزین دی اکسیدکربن می‌شود. بنابراین استفاده از مواد جایگزین سیمان که بتواند خواسته‌های مکانیکی، محیط‌زیستی و اقتصادی را برآورد سازد، یک راه‌حل مناسب بوده و حائز اهمیت است. در این تحقیق آزمایشگاهی که به شناخت و بررسی مواد پوزولان طبیعی حاوی آلومینات و سیلیکات بالا به عنوان جایگزینی بخشی از سیمان در تولید ملات پایه سیمانی پرداخته می‌شود مبین نوآوری آن نیز می‌باشد.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

بسیاری از محققان اثرات پوزولان‌های مختلف را بر مشخصات ملات سیمانی و توسعه پایدار ارزیابی کرده‌اند. ماهده خادم<sup>۵</sup> و همکاران در تحقیق خویش، اظهار داشتند تولید ملات‌های سبز با استفاده از ۱۰ درصد دوده سیلیس، مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب را بهبود می‌بخشید [۱۹]. مودی و همکاران بیان کردند استفاده از ۱۰ درصد پوزولان پومیس در ملات اگرچه افت مقاومت را در سنین اولیه به همراه داشته، اما در بلندمدت با تکمیل فرایندهای هیدراسیون و تشکیل ژل ثانویه سیلیکاتی رشد مقاومت قابل‌قبولی از خود نشان دادند [۲۰]. دانگ<sup>۶</sup> و همکاران بیان داشتند سیمان حاوی مقدار مناسب دوده سیلیس عملکرد مقاومت ملات‌های سیمانی را در معرض حملات سولفاتی به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۲۱]. محققان دیگری نیز بیان داشتند ملات‌های سبز با حجم زیاد خاکستر بادی تا ۳۰ درصد جایگزین سیمان مقاومت ملات‌های ضعیف تیپ S و N طبق استاندارد به‌دست می‌یابد [۲۲]. اسو<sup>۷</sup> و همکاران اعلام کردند که درصد جایگزینی و اندازه ذرات پوزولان کاملاً خواص مقاومتی و دوام ملات‌ها را متفاوت می‌سازد [۲۳]. همچنین پژوهشگران ملات حاوی ۲۰ درصد پودر پومیس جایگزین شده با سیمان را از نقطه‌نظر محیط‌زیستی و خواص مکانیکی آن مطالعه نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده نسبت به نمونه مبنا بهتر بوده و ملات ساخته شده سازگار با محیط‌زیست می‌باشد [۲۴]. شربتدار و همکاران در تحقیق آزمایشگاهی بیان کردند که ملات حاوی ۱۵ درصد سرباره، علاوه بر اقتصادی بودن و سازگار بودن با محیط‌زیست، دارای مقاومت فشاری ۱/۵ برابر نسبت به ملات‌های ترمیمی تجاری بوده و سازگاری قابل‌قبول بین ملات ترمیمی و بستر بتن می‌باشد [۲۵]. اقبالی و همکاران اظهار کردند جایگزینی ۱۰ درصد به عنوان

<sup>5</sup>- Maedha Khadim

<sup>6</sup>- Dong

<sup>7</sup>- Hsu

## ۳-۱- مصالح و طرح اختلاط

سیمان پرتلند تیپ II شاهرود که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده به عنوان مواد چسباننده در این تحقیق استفاده شده است. به همین ترتیب خصوصیات شیمیایی و فیزیکی پوزولان مورد نظر که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات استفاده می‌شود در جدول ۲ آورده شده است. این پوزولان براساس استاندارد ملی ایران شماره‌های ۶۷۱۳ و ۳۴۳۳ و استاندارد ASTM C618، تنها نیاز به پودر شدن دارد و فرایند دیگری برای تولید و آماده ساختن آن نیاز نیست.

در این تحقیق از روش آزمایشگاهی و تحلیل آماری استفاده شده است، به طوری که بعد از مطالعات اولیه و مرور مطالعات گذشته در قدم نخست نمونه‌های ملات سیمانی با طرح‌های اختلاط مشخص ساخته شده، سپس عمل‌آوری و انجام آزمایشات مختلف و جمع‌آوری داده‌های خام انجام شده، در نهایت، براساس نتایج استخراج شده از آزمایشات، تحلیل و ارزیابی نتایج به شکل متن، جدول و نمودار ارائه شده است. علاوه بر ارزیابی رفتار مکانیکی و دوام ملات‌ها، تحلیل و ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی آنها نیز صورت گرفته است.

جدول ۱- اجزای شیمیایی سیمان

اکسید عناصر	مقدار به درصد	اکسید عناصر	مقدار به درصد
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۱۱	K <sub>2</sub> O	۰/۵۱
AlO <sub>3</sub>	۴/۴۲	LO	۲/۰۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۶	I.R	۰/۳۲
CaO	۶۳/۳۶	Free Ca	۱/۲۳
MgO	۱/۵۱	C <sub>3</sub> S	۵۳/۰
SO <sub>3</sub>	۲/۷۰	C <sub>2</sub> S	۲۰/۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۲	C <sub>3</sub> A	۵/۰

جدول ۲- اجزای شیمیایی پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا

اکسید عناصر	مقدار به درصد	اکسید عناصر	مقدار به درصد
SiO <sub>2</sub>	۰/۳	SO <sub>3</sub>	۵۷/۴
AlO <sub>3</sub>	۰/۲	Na <sub>2</sub> O	۲۶/۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶/۵	K <sub>2</sub> O	۳/۸
CaO	۱/۱	TiO <sub>2</sub>	۲/۲
MgO	۰/۲	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۱/۴

دانه‌بندی مختلف یعنی S2 و S4.75 با بزرگترین اندازه سنگدانه به ترتیب ۴/۷۵ و ۲ میلی‌متر استفاده شده است.

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی ماسه با طرح بهینه

وزن مخصوص	۲/۶۴
جذب آب (%)	۲/۵۶
مدول نرمی	۳/۴

جدول ۴ و ۵ منحنی دانه‌بندی ماسه را براساس استاندارد ASTM C136 & C144 نشان می‌دهند. با

البته این مواد پودر شده از الک ۲۰۰ که دارای اندازه ۰/۰۷۵ میلی‌متر می‌باشد رد شده، سپس به عنوان جایگزین سیمان با درصدهای مختلف (۶، ۱۳ و ۲۰) در ملات استفاده گردیده است. علت انتخاب درصدهای جایگزین شده با سیمان را می‌توان نتایج اولیه بیان کرد. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها از جمله وزن مخصوص، جذب آب و مدول نرمی در جدول ۳ ارائه شده است. در این تحقیق از ماسه معمولی رودخانه‌ای با دو نوع

هشت طرح اختلاط براساس درصد‌های مختلف جایگزین و دانه‌بندی ماسه طبق جدول ۶ انتخاب شده است. آب استفاده شده در ملات از آب شهری می‌باشد.

توجه به موارد ذکر شده و برای نیل به روانی مناسب ملات، نسبت آب به سیمان برابر ۰/۹ و ۱ در نظر گرفته شده است. نسبت‌های سیمان به ماسه در طرح‌های اختلاط برابر ۵/۳: ۱ و ۵/۵: ۱ می‌باشد. به صورت کل،

جدول ۴- نتایج دانه‌بندی ماسه مصرفی ریزتر از الک شماره ۴

سایز الک (mm)	شماره الک	وزن ماسه روی الک (gr)	وزن تجمعی ماسه روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی گذشته از الک
۴/۷۵	۴	صفر	صفر	صفر	صفر	۱۰۰
۲/۳۶	۸	۴۲۹	۴۲۹	۳۰/۶۴	۳۰/۶۴	۶۹/۳۶
۱/۱۸	۱۶	۳۵۸	۷۸۷	۲۷/۵	۵۶/۲	۴۳/۸
۰/۶	۳۰	۲۵۶	۱۰۴۳	۱۸/۳	۷۴/۵	۲۵/۵
۰/۳	۵۰	۱۷۵	۱۲۱۸	۱۲/۸	۸۷	۱۳
۰/۱۵	۱۰۰	۱۶۰	۱۳۷۸	۱۱/۵	۹۸/۴	۱/۶
زیر الک		۲۰	۱۳۸۸	۱/۵	۹۹/۱۴	۲۵۳/۲۶
وزن مجموعی ۱۴۰۰ گرم		-	-	-	۳/۴=FM	

جدول ۵- نتایج دانه‌بندی ماسه مصرفی با ۵ درصد باقی مانده در الک شماره ۸

سایز الک (mm)	شماره الک	وزن ماسه روی الک (gr)	وزن تجمعی ماسه روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی گذشته از الک
۴/۷۵	۴	صفر	صفر	صفر	صفر	۱۰۰
۲/۳۶	۸	۵۰	۵۰	۵	۵	۹۵
۱/۱۸	۱۶	۴۷۶	۵۲۶	۴۷/۶	۵۲/۶	۴۷/۴
۰/۶	۳۰	۲۳۵	۷۶۱	۲۳/۵	۷۶/۱	۲۳/۹
۰/۳	۵۰	۱۰۶	۸۶۷	۱۰/۶	۸۶/۷	۱۳/۳
۰/۱۵	۱۰۰	۹۸	۹۶۵	۹/۸	۹۶/۵	۳/۵
زیر الک		۱۹	۹۸۴	۰/۱۹	۹۴/۴	۲۸۳/۱
وزن مجموعی ۱۰۰۰ گرم		-	-	-	-	۳/۱=FM

جدول ۶- نسبت‌های طرح اختلاط در هر مترمکعب ملات

کد طرح	مقدار آب کل (lit)	سیمان (kg)	نسبت آب بر سیمان	ماسه SSD (kg)	نسبت ماسه به سیمان	اندازه بزرگترین سنگدانه (kg)	درصد پوزولان	وزن پوزولان (kg)	جمع کل (kg)
S2C0-5.5	۳۰۰	۳۰۰	۱	۱۶۰۰	۵/۳	۲	-	-	۲۲۰۰
S2C6-5.5	۳۰۰	۲۸۲	۱	۱۶۰۰	۵/۳	۲	۶	۱۸	۲۲۰۰
S2C13-5.5	۳۰۰	۲۶۱	۱	۱۶۰۰	۵/۳	۲	۱۳	۳۹	۲۲۰۰
S2C20-5.5	۳۰۰	۲۴۰	۱	۱۶۰۰	۵/۳	۲	۲۰	۶۰	۲۲۰۰
S4.7C0-5.5	۲۷۰	۳۰۰	۰/۹	۱۶۵۰	۵/۵	۴/۷۵	-	-	۲۲۲۰
S4.7C6-5.5	۲۷۰	۲۸۲	۰/۹	۱۶۵۰	۵/۵	۴/۷۵	۶	۱۸	۲۲۲۰
S4.7C13-5.5	۲۷۰	۲۶۱	۰/۹	۱۶۵۰	۵/۵	۴/۷۵	۱۳	۳۹	۲۲۲۰
S4.7C20-5.5	۲۷۰	۲۴۰	۰/۹	۱۶۵۰	۵/۵	۴/۷۵	۲۰	۶۰	۲۲۲۰

معرفی کد طرح‌ها: S ماسه معمولی، عدد بعد S اندازه سنگدانه، C سیمان، رقم اول بعد حرف C درصد جایگزین شده با سیمان، رقم دوم نسبت ماسه بر سیمان را نشان می‌دهد.

## ۳-۲- نمونه‌های ساخته شده

ایران ۳-۱۶۰۸ و آیین‌نامه ASTM C109/C39 مشابه  
شکل ۳ انجام شده است.



شکل ۲- آزمایش اسلامپ

در هر طرح اختلاط، ۹ نمونه مکعب با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب ملات در نظر گرفته شده است. مخلوط آماده شده در قالب‌هایی از قبل آماده و چرب شده با روغن در سه لایه با تراکم ۲۵ ضربه در هر لایه مطابق شکل ۱ ریخته می‌شوند. بعد از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای مرطوب تا ۶۵ درصد و دمای ۲۱ درجه سانتیگراد در شرایط آزمایشگاهی نگهداری و سپس باز شدند. سپس نمونه‌ها در دمای فوق در حوضچه‌های آب به مدت ۲۸ و ۵۶ روز تا زمان آزمایش جهت عمل‌آوری نگهداری شدند.



شکل ۱- نحوه ساخت و نگهداری نمونه‌ها



شکل ۳- مقاومت آزمایش فشاری نمونه‌ها

## ۳-۳- روش آزمایش

به همین ترتیب جهت بررسی دوام ملات، آزمایش جذب آب نمونه‌ها با جایگزینی پوزولان طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای آزمایش جذب آب، ملات نمونه‌های مکعبی  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر حاوی صفر، ۶، ۱۳ و ۲۰ درصد پوزولان طبیعی جایگزین سیمان شده و بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری، برای ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد خشک و وزن آن گرفته شد، سپس در آب غرق شده و پس از آن توسط یک ماله، آب سطحی آن خشک و وزن آن دوباره گرفته شده است. این آزمایش برای نمونه‌ها در روزهای ۱۴، ۲۱، ۲۸، ۳۵، ۴۲، ۴۹ و ۵۶ طبق استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۴۲۷ و آیین‌نامه ASTM C642 به شکل متواتر مطابق شکل ۴ انجام شده است.

یکی از خواص اصلی و عمده ملات، روانی و کارایی آن می‌باشد تا بتواند به سادگی در هر حالت، کاربرد داشته و آب خود را حفظ کند. قابل یادآوری است که نسبت آب به سیمان در روانی و کارایی ملات مهم است و باید طوری انتخاب گردد تا خواسته‌های مکانیکی و کارایی را همزمان تأمین نماید. آب بیشتر در ملات باعث ایجاد منافذ زیاد در ملات شده و کاهش مقاومت فشاری را در پی دارد. عموماً خواسته‌های کارایی و روانی در ملات‌های بنایی بر خواسته‌های مکانیکی ارجحیت داده می‌شود. تعیین میزان روانی و کارایی ملات با استفاده از آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ملی ایران شماره ۳۲۰۳-۲ و آیین‌نامه ASTM C143 طبق شکل ۲ و مقاومت فشاری نمونه‌ها که یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی و مبنای اصلی برای ارزیابی رفتار ملات‌ها شمرده می‌شود، طبق استاندارد



که درصد جایگزینی پوزولان طبیعی افزایش یابد به همان تناسب، اسلامپ ملات کاهش می‌یابد [۲۹].

جدول ۷- اسلامپ ملات با طرح اختلاط‌های مختلف

کاهش اسلامپ (%)	اسلامپ (cm)	طرح اختلاط
صفر	۱۰	S4.75C-0-5.5
۸	۹/۲	S4.75C-6-5.5
۱۰	۹	S4.75C-13-5.5
۱۵	۸/۵	S4.75C-20-5.5
۰	۱۰	S2C0-5.5
۵	۹/۵	S2C6-5.5
۱۰	۹	S2C13-5.5
۱۵	۸/۵	S2C20-5.5

#### ۲-۴- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط‌های حاوی ۶، ۱۳ و ۲۰ درصد پوزولان طبیعی جایگزین شده با سیمان و ماسه معمولی رد شده از الک شماره ۱۰ با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر انجام شده است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه طبق جدول ۸ نشان می‌دهد که ۶ و ۱۳ درصد جایگزینی پوزولان به ترتیب باعث افزایش ۴۱/۹، ۳۴ و ۱۲/۹، ۱۱/۵ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع شده است. به همین ترتیب با جایگزینی ۲۰ درصد، تقریباً مقاومت یکسان با نمونه مرجع حاصل شده است.

جدول ۸- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری ملات با بزرگترین اندازه سنگدانه ۲ میلی‌متر با درصد‌های مختلف پوزولان طبیعی

عمل آوری (روز)	مقاومت فشاری (MPa)				جایگزینی (%)	کد طرح	ردیف
	میانگین	۳	۲	۱			
۲۸	۶/۲	۶/۳	۵/۸	۶/۶	۰	S2C0-5.5	۱
	۸/۸	۸/۶	۸/۸	۸/۹	۶	S2C6-5.5	۲
	۷	۶/۷	۶/۵	۷/۷	۱۳	S2C13-5.5	۳
	۶/۱	۶	۵/۸	۶/۶	۲۰	S2C20-5.5	۴
۵۶	۶/۹	۷	۶/۸	۶/۸	۰	S2C0-5.5	۵
	۹/۳	۹/۲	۹/۸	۸/۹	۶	S2C6-5.5	۶
	۷/۷	۷/۸	۷/۴	۷/۷	۱۳	S2C13-5.5	۷
	۷	۷/۲	۶/۵	۷/۲	۲۰	S2C20-5.5	۸



شکل ۴- آزمایش جذب آب نمونه‌ها

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج اسلامپ، مقاومت فشاری مکعبی و جذب آب نمونه‌های ملات حاوی پوزولان طبیعی دارای آلومینات و سیلیکات بالا و تأثیر درصد‌های جایگزینی به عنوان سیمان روی خواص مکانیکی و دوام ملات پرداخته شده است.

#### ۴-۱- آزمایش اسلامپ

نتایج اسلامپ در جدول ۷ نشان داده شده است، طوری که ۶، ۱۳ و ۲۰ درصد جایگزینی با بزرگترین اندازه ماسه ۴/۷۵ و ۲ میلی‌متر به ترتیب باعث کاهش ۸، ۱۰ و ۱۵ درصد و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد اسلامپ نسبت به ملات مرجع گردیده است. علت کاهش روانی ملات حاوی درصد‌های مختلف پوزولان را می‌توان مازاد بودن مساحت سطح مخصوص آن که موجب تماس بیشتر با آب و در نهایت نیاز زیاد به آب می‌باشد، بیان کرد [۱۵ و ۲۷]. موجودیت مواد پوزولانی به عنوان جایگزین سیمان باعث کاهش روانی و کارایی ملات می‌شود [۲۸]. به هر میزان

پوزولان طبیعی با سیمان در ملات مقاومت فشاری ملات را بعد از ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب ۰/۸ و ۲/۴ درصد و ۰/۷ و ۲/۲۳ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داده است. جایگزینی ۲۰ درصد پوزولان به عنوان سیمان در ملات بعد از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری به ترتیب ۱۶/۹ و ۱۷ درصد کاهش مقاومت داشته‌اند.

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۶، ۱۳ و ۲۰ درصد پوزولان طبیعی جایگزین شده به عنوان بخشی از سیمان در ملات با ماسه معمولی رد شده از الک شماره ۴ با بزرگترین اندازه سنگدانه ۴/۷۵ میلیمتر انجام شده است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه ملات در جدول ۹ نشان می‌دهد که ۶ و ۱۳ درصد جایگزینی

جدول ۹- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه مکعبی ۱۰۰ میلیمتری ملات با بزرگترین اندازه سنگدانه ۴/۷۵ میلیمتر با درصدهای مختلف پوزولان طبیعی

عمل آوری (روز)	مقاومت فشاری (MPa)				جایگزینی (%)	کد طرح	ردیف
	میانگین	۳	۲	۱			
۲۸	۱۲/۴	۱۲/۲	۱۱/۷	۱۳/۴	۰	S4.7C0-5.5	۱
	۱۲/۵	۱۲/۶	۱۲/۱	۱۲/۹	۶	S4.7C6-5.5	۲
	۱۲/۷	۱۲/۶	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۳	S4.7C13-5.5	۳
	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۱	۱۰/۴	۲۰	S4.7C20-5.5	۴
۵۶	۱۳/۴	۱۳/۵	۱۳	۱۳/۸	۰	S4.7C0-5.5	۵
	۱۳/۵	۱۳/۲	۱۳/۶	۱۳/۷	۶	S4.7C6-5.5	۶
	۱۳/۷	۱۳/۸۵	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳	S4.7C13-5.5	۷
	۱۱/۱	۱۰/۹	۱۱	۱۱/۵	۲۰	S4.7C20-5.5	۸

و [۳۳]. این امر باعث افزایش مقاومت فشاری و عملکرد بهتری نسبت به نمونه مرجع می‌گردد [۳۴]. استفاده از ماسه ریزدانه با حداکثر اندازه ۲ میلیمتر، مقاومت فشاری کمتری نسبت به طرح اختلاط‌های دیگر نشان داده است که علل آن مدول نرمی کمتر یا نبود سنگدانه درشت در ملات، ناشسته بودن ماسه، سطح مخصوص بیشتر و نسبت آب به سیمان زیاد ( $W/C=1$ ) جهت حفظ روانی عنوان شده است [۳۵ و ۳۶]. با توجه به نتایج به‌دست آمده طبق استاندارد ASTM C270، ملات تولید شده از این طرح‌های اختلاط با ماسه درشت و ریز به ترتیب از نوع قوی و متوسط با رده بندی S و N می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت ۱۳ درصد جایگزینی پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا درصد بهینه نسبت به بقیه طرح اختلاط‌ها می‌باشد. چنین درصدی در پژوهش مشابه استفاده از پوزولان طبیعی به

استفاده از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری ملات گردد [۳۰]. به دلیل اینکه واکنش شیمیایی پوزولان‌های طبیعی نسبت به واکنش هیدراسیون سیمان کندتر است، مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز افزایش می‌یابد [۱۵-۳۱]. جایگزینی ۲۰ درصد نسبت به جایگزینی ۶ و ۱۳ درصد باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع شده است، علت آن کاهش مقدار سیمان برای تشکیل هیدراسیون می‌باشد [۲۲ و ۲۴]. جایگزینی ۶ و ۱۳ درصد پوزولان طبیعی به عنوان سیمان در ملات با گذشت زمان فعالیت پوزولانی بیشتر از خود نشان داده و سبب تشکیل فازهای مقاومت‌دهنده کلسیم آلومینات هیدرات (C-A-H)، کلسیم آلومینات سیلیکات هیدرات (C-A-S-H) و در نهایت، سبب شکل‌گیری ساختار کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) می‌شود [۳۲]

منافذ بزرگ، نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. ریزساختار خمیر سیمان حاوی پوزولان‌های طبیعی مانند خمیر سیمان پرتلند ساده به نظر می‌رسد. محصول هیدراتاسیون در مراحل اولیه هیدرات‌سیلیکات کلسیم است که به صورت پوسته نازکی در اطراف ذرات کلینکر تشکیل می‌شوند. سپس در مراحل بعدی سوزن‌های نازک اترینگیت، صفحات نازک پرتلندیت و مونوسولفات را تشکیل می‌دهد. این محصول مسیر کانال‌ها (منفدها) را قطع نموده و نفوذپذیری را کاهش می‌دهد [۳۷]. استفاده از پوزولان باعث کاهش خلل و فرج در ملات شده و باعث کاهش نفوذپذیری ملات می‌گردد [۳۸].

#### ۵- تحلیل شاخص‌های توسعه پایدار

تأثیرات محیط‌زیستی یک محصول، در چهار فاز ارزیابی می‌گردد که عبارتند از:

- فاز اول، تعریف اهداف ارزیابی (واحد ارزیابی همان یک تن سیمان و سیستم مرزی همان بسته‌بندی تا دروازه است).

- فاز دوم، تحلیل فهرست موجودی‌ها (در این تحقیق، آمار و ارقام مربوطه از منابع معتبر مانند [۶، ۷، ۳۹، ۴۰ و ۴۱] گرفته شده است).

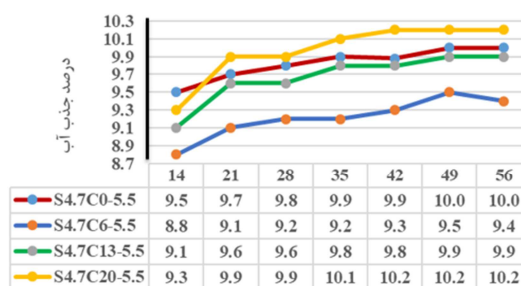
- فاز سوم ارزیابی تأثیرات محیطی (در این فاز، ارزیابی شاخص‌های تأثیرگذار و مخرب محیطی مانند گازهای گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> و صرفه‌جویی یا پایداری منابع طبیعی مثل انرژی، آب و غیره از طریق نرمال‌سازی و محاسبه پارامترها به دست می‌آید).

- فاز چهارم، مرحله تفسیر یافته‌ها می‌باشد (در این فاز، عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار شناسایی شده و اطلاعاتی که از فازهای قبلی به دست آمده، تفسیر و تحلیل می‌گردد). فاز چهارم نشان می‌دهد که محصول در محدوده مرز مطالعه شده چه نوع تأثیری بر محیط‌زیست داشته و آیا این تأثیرات، سازنده یا مخرب برای محیط زیست بوده است.

عنوان جایگزینی بخشی از سیمان در ملات نیز درصد بهینه انتخاب شده است [۲۶].

#### ۴-۳- جذب آب نمونه‌ها

طبق شکل ۵، جذب آب نمونه‌های ساخته شده با ماسه با ۶ و ۱۳ درصد جایگزینی سیمان به ترتیب ۶/۲۵ و ۱/۶ درصد، جذب آب کمتر نسبت به نمونه مرجع دارد؛ همچنین جایگزینی ۲۰ درصد در روزهای اول، جذب آب کمتر را نشان می‌دهد، اما با گذشت زمان این مقدار نسبت به نمونه مرجع ۱/۴۵ درصد افزایش می‌یابد. در نهایت، با توجه به نتایج جایگزینی ۶ و ۱۳ درصد پوزولان طبیعی باعث کاهش جذب آب ملات گردیده و دوام ملات را در فصل زمستان در مقابل چرخه‌های یخ زدن و آب شدن کمک می‌کند.



شکل ۵- جذب آب نمونه‌ها حاوی درصدهای مختلف پوزولان طبیعی

کیفیت ملات به عواملی مانند نسبت آب بر سیمان، ترکیب مخلوط، متراکم‌سازی و عمل‌آوری وابسته است. هنگامی که پوزولان طبیعی به سیمان اضافه می‌شود، طی فرآیند هیدراتاسیون، هیدروکسید کلسیم آزاد با سیلیس موجود در پوزولان واکنش داده و هیدرات‌سیلیکات کلسیم ثانوی (C-S-H) را تشکیل می‌دهد. این واکنش، اندازه منافذ و تخلخل ماتریس ملات را تغییر داده و در نتیجه جذب آب کمتر و مقاومت فشاری را همزمان افزایش می‌دهد. از این رو، جذب آب کمتر ملات متضمن دوام بیشتر آن می‌گردد. محصولات واکنش ثانویه پوزولان با خمیر سیمان ممکن است منافذ بزرگ ایجاد شده در مراحل اولیه واکنش را پر نکند، اما با قطع کانال‌های بین

تولیدی نشان می‌دهد. تولید یک تن پوزولان طبیعی حاوی سلیکات و آلومینات بالا تنها نیاز به آسیاب کردن دارند، که با مصرف ۴ کیلووات برق بر ساعت معادل ۷۸ مگاژول انرژی را به مصرف می‌رساند. این انرژی مصرف شده به اندازه ۵ کیلوگرم معادل CO<sub>2</sub> را به هوا بخش می‌کند.

قابل ذکر است این مقدار مصرف برق برای آسیاب نمودن پوزولان معادل مصرف برقی است که برای آسیاب نمودن سنگ‌ذغال به مصرف می‌رسد [۴۰]. پس با ۱۳ درصد جایگزینی مقدار ۱۶۹۰ مگاژول انرژی که در واقع ۱۲/۳۴ درصد کاهش مصرف انرژی است در تولید یک تن سیمان جلوگیری شده و در توسعه پایدار سهم قابل ملاحظه را ایفا می‌کند. کاهش مصرف انرژی با جایگزینی بخشی از سیمان در ملات در پژوهش [۴۳] نیز ثابت شده است.

ارزیابی چرخه حیات در محدوده گهواره تا بسته‌بندی در کارخانه فرآیند تولید سیمان نشان می‌دهد که تأثیرات محیط‌زیستی سیمان نسبت به تولید پوزولان به مراتب زیاد می‌باشد. استفاده از ۱۳ درصد به عنوان جایگزین سیمان طبق جدول ۱۲ کاهش قابل ملاحظه تأثیرات محیط‌زیستی را در بر دارد. با توجه به نتایج جدول ۱۲ دیده می‌شود کاهش میزان پتانسیل گرمایش زمین در یک تن سیمان، ۱۲۰ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن حاصل شده است. این میزان از نظر تأثیرات محیط‌زیستی قابل ملاحظه بوده و در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، که مبین سهم‌گیری در راستای کمک به تغییرات اقلیمی جهانی نیز می‌باشد [۴۳]. نمودار شکل ۶، کاهش تولید گاز CO<sub>2</sub> با افزایش درصد جایگزینی پوزولان با سیمان را نشان می‌دهد.

از جمله آلاینده‌های محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرآیند تولید سیمان، دی‌اکسید کربن می‌باشد. در صنعت تولید سیمان، CO<sub>2</sub> بین ۹۸ الی ۱۰۰ درصد گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد. در ارزیابی تأثیرات محیط‌زیستی و توسعه پایدار تولید سیمان به عنوان شاخص عمده در چرخه حیات و محدوده گهواره تا دروازه کارخانه<sup>۹</sup> از میزان انتشار و پتانسیل گرمایش زمین و شاخص‌های دیگر استفاده می‌شود [۶]. پتانسیل گرمایش هر گاز از حاصل ضرب حجم گاز در پتانسیل گرمایش جهانی معادل دی‌اکسید کربن آن که قبلاً توسط مراجع معتبر بین المللی محاسبه شده به دست می‌آید (رابطه ۱) [۴۲].

$$GWP = 1 \times CO_2 + 25 \times CH_4 + 265 \times N_2O + 10200 \times CFC \quad (1)$$

رقم بزرگتر پتانسیل گرمایش زمین، باعث چالش‌هایی مانند اسیدی شدن آب دریاها، کاهش پتانسیل منابع زیرزمینی، پتانسیل رشد جلبک‌ها و انواع مضرات آن و نازک شدن قشر ازن توسط گازهای گلخانه‌ای مثل کرومین و برومین می‌گردد. از جمله موارد فوق بر دو مورد آن بیشتر در ارزیابی چرخه حیات مواد و تأثیرات محیط‌زیستی آنها بر توسعه پایدار توسط مقالات علمی دنیا تأکید صورت گرفته است که عبارتند از: میزان مصرف انرژی و پتانسیل گرم شدن زمین. در این تحقیق نیز از همین شاخص‌های عمده برای ارزیابی توسعه پایدار پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات و تأثیرات آن بر محیط‌زیست استفاده شده است. جدول ۱۰ یک مطالعه موردی تأثیرات محیط‌زیستی تولید سیمان در کارخانه غوری افغانستان را براساس ارزیابی چرخه حیات آنها نشان می‌دهد. جدول ۱۱ نیز میزان مصرف انرژی برای تولید یک تن سیمان به روش تر و خشک و تولید یک تن پوزولان طبیعی را در کارخانه‌های

<sup>9</sup> Gradle to gate

جدول ۱۰- تأثیرات محیط‌زیستی تولید یک تن سیمان براساس ارزیابی چرخه حیات آن

سیمان افغانستان	واحد	رده‌های تأثیرگذار
۹۲۶	Kg-CO <sub>2</sub> e	گرمایش جهانی
۱/۱۵۵	Kg-SO <sub>2</sub> e	اسید سازی
۰/۰۰۴	Kg-ethylene eq	اکساینده فتوشیمیایی
۰/۰۰۰۹	Kg-benzene air eq	سمیت انسانی (سرطان‌زایی)
۰/۶۳۷	Kg-SO <sub>2</sub> e	آلودگی شهری

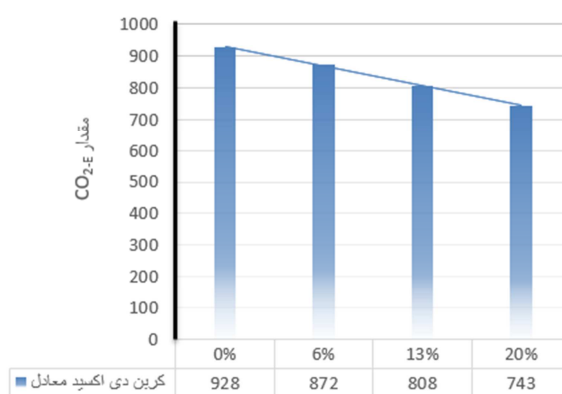
جدول ۱۱- میزان مصرف انرژی تولید یک تن سیمان و یک تن پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا

شماره	نوع سیمان و فناوری تولید آن	انرژی به مگاژول	مقدار سوخت (kg)	منبع انرژی
۱	سیمان تولید شده به روش خشک با فناوری جدید	۳۷۳۰	۱۰۰	ذغال سنگ
۲	سیمان تولید شده به روش تر با فناوری قدیمی	۱۳۰۵۵	۳۵۰	ذغال سنگ
۳	تولید پوزولان طبیعی (فرآیند پودری‌سازی)	۷۸	kwh4	برق

جدول ۱۲- تأثیرات محیط‌زیستی تولید یک تن سیمان و کاهش آن با درصد بهینه جایگزین با پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا

شماره	تأثیرات محیط‌زیستی	سیمان تنها	سیمان با ۱۳ درصد جایگزین	اختلاف
۱	پتانسیل گرمایش جهانی (kg-CO <sub>2</sub> e) GWP	۹۲۸	۸۰۸	۱۲۰
۲	اسیدی شدن آب‌ها (kg-SO <sub>2</sub> e)	۲/۷	۲/۳	۰/۴
۳	نازک شدن قشر ازن (kg-CFC11 eq.)	۵/۳۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۴/۶۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۰/۷×۱۰ <sup>-۷</sup>
۴	پتانسیل رشد جلبک‌ها (kg-PO <sub>4</sub> eq.)	۹/۰۵×۱۰ <sup>-۵</sup>	۷/۸۸×۱۰ <sup>-۵</sup>	۱/۱۷×۱۰ <sup>-۵</sup>
۵	آلاینده‌های ثانوی مضر برای انسان (ازن) (kg-ethylene eq.)	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳۴۸	۰/۰۰۰۵۲

مقدار GWP تولید شده



درصد جایگزینی با سیمان (%)

شکل ۶- تولید دی اکسید کربن در یک تن سیمان با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی حاوی آلومینات و سیلیکات بالا با

سیمان

## ۶- نتیجه‌گیری

آلومینات بالا در ملات پایه سیمانی بوده که در اجرای بسیاری از پروژه‌های زیربنایی کاربرد دارد و تحلیل شاخص‌های توسعه پایدار برای بهینه‌ترین ملات به‌دست

این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی اثرات جایگزینی پوزولان طبیعی دارای سیلیکات و

۲- روانی و کارایی ملات با افزایش درصد جایگزینی کاهش می‌یابد.

۳- استفاده از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان با درصد بهینه باعث کاهش تأثیرات محیط‌زیستی و میزان پتانسیل گرمایش زمین در تولید یک تن سیمان برابر ۱۲۰ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن شده است.

۴- صرفه‌جویی انرژی در تولید یک تن سیمان با جایگزینی درصد بهینه برابر ۱۶۹۰ مگاژول می‌باشد.

۵- استفاده از پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا به دانه‌بندی ماسه و نسبت آب به سیمان حساس بوده و نتایج را مستقیماً متأثر می‌سازد؛ یعنی با ماسه ریزتر واکنش بهتر صورت می‌گیرد، اما مقاومت‌های حاصل شده کمتر از ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد.

آمده با پوزولان طبیعی بررسی شده است. با بررسی موضوع نتایج زیر به دست آمده است:

۱- جایگزینی ۱۳ درصد پوزولان طبیعی حاوی سیلیکات و آلومینات بالا با ماسه درشت و ریز از لحاظ مکانیکی و محیط‌زیستی به عنوان طرح اختلاط بهینه بوده و مقاومت فشاری ۵۶ روزه ملات را به ترتیب ۳۴ و ۱۱/۵ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهد. به همین ترتیب جایگزینی ۶ درصد پوزولان طبیعی مقاومت فشاری ملات را با ماسه درشت و ریز به ترتیب ۴۱/۹ و ۱۲/۹ درصد نسبت به نمونه مرجع نیز افزایش داده است، البته این درصد از لحاظ مکانیکی بهینه بوده، مگر از لحاظ محیط‌زیستی بهینه‌تر نیست، در نهایت جایگزینی ۲۰ درصد این پوزولان با ماسه ریزدانه مقاومت فشاری یکسان با نمونه مرجع داشته اما با ماسه درشت‌دانه مقاومت فشاری ملات را ۱۷ درصد کاهش داده است.

## مراجع

- [1] Setoda, A., & Bedokhti, H. (2015). Sustainability in Construction Industry, *Professional Engineering, Construction Management & Projects first Conference*, Semnan, Iran. [In Persian]
- [2] Rezai, A., & Najafi, A. (2017). The study of sustainable development in the construction industry with the approach of theories, goals and dimensions, *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Modern Urban Management*. [In Persian]
- [3] Kweku, D. W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K. A., Danso, K. B., Oti-Mensah, E. A., ... & Adormaa, B. B. (2018). Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming, *Journal of Scientific research and reports*, 17(6), 1-9. doi: 10.9734/JSRR/2017/39630
- [4] USEPA. (2019). Sources of Greenhouse Gas Emissions. *United States Environmental Protection Agency*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.
- [5] Dehghan, M., & Rahimi, M. (2016). Sustainability in Construcin and Green Buildings, *The 4th National Applied Research Conference in Civil Engineering, Architecture and urban Planning*, Tehran, Iran. [In Persian]
- [6] Assadi, N. (2020). Environmental Impacts of Cement Production with LCA: A Case Study on Ghorri Cement Plant in Afghanistan, *Master Thesis, Graduate School of International Resource Sciences*, University of Akita, Japan.
- [7] Show, K. Y., Tay, J. H., & Lee, D. J. (2018). *Sustainable Sludge Management: Resource Recovery for Construction Applications*. World Scientific.
- [8] WMO. (2020). *State of the global climate: provisional report*. World Meteorological Organisation.
- [9] Jahanbakhsh, H., & Begi, K., (2017). *Green buildings illustration. 1*, Kasra publication, Mashhad. [In Persian]
- [10] Lehne, J., & Preston, F. (2018). Making concrete change. *Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*.
- [11] Green building education services. (2009). *Green associate exam preparation study guide*. LEED v4 edition.
- [12] Zari Jafarabad, A., & Yaqoti, F. (2013). Sustainable urban development Indicators, *The first national*

- conference on architecture and sustainable urban spaces*, Mashhad, Iran. [In Persian]
- [13] Shamaghdari, M., Sharbatdar, M. K., & Rezaifar, O. (2022). Prediction of the Amount of Energy Consumed in Existing Educational Buildings Using Artificial Neural Networks and Its Effects on Reducing Carbon Dioxide (Case Study of Mashhad Schools), *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), 169-183. doi: 10.22091/cer.2021.7445.1310 [In Persian]
- [14] Akramai, G., & Alipour, L. (2015). The role of local materials in sustainable architecture from an environmental point of view, *Housing and rural environment journal* (jhre.ir), 156, Tehran, Iran. [In Persian]
- [15] Khosravi, S., Rezaifar, O., Gholhaki, M., & Qiyami Taklymi, S. M. (2021). Investigation Experimental Of the Concrete Properties Containing Bentonite and Zeolite as Natural Pozzolan, *Civil Infrastructure Researches*, 6(2), 79-93. doi: 10.22091/cer.2021.6931.1248 [In Persian]
- [16] Sobolev, K., Kozhukhova, M., Sideris, K., Menéndez, E., & Santhanam, M. (2018). *Alternative supplementary cementitious materials*. Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4, 233-282.
- [17] Iran Standard and Industrial Research Institute. (1994). *Characteristics of natural pozzolans*, No, 3433. [In Persian]
- [18] ASTM C311. (2003) *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use*. 04, 1-9.
- [19] Obaid, M. K., Nasr, M. S., Ali, I. M., Shubbar, A. A. F., & Hashim, K. S. (2021). Performance of green mortar made from locally available waste tiles and silica fume, *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(1), 136-151.
- [20] Modi, F., & Ramzaianpour, A. (1998). Evaluation of pozzolanic mortars based on microsilica against acidic and chloride corrosive environments, *concrete research 12<sup>th</sup> year*, 3(3), 5-15. [In Persian]
- [21] Lv, X., Dong, Y., Wang, R., Lu, C., & Wang, X. (2020). Resistance improvement of cement mortar containing silica fume to external sulfate attacks at normal temperature, *Construction and Building Materials*, 258, 119630. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119630
- [22] Alqahtani, F. K., Rashid, K., Zafar, I., Khan, M. I., & Ababtain, A. A. (2021). Production of sustainable green mortar by ultrahigh utilization of fly ash: Technical, economic and environmental assessment, *Construction and Building Materials*, 281, 122617. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122617
- [23] Hsu, S., Chi, M., & Huang, R. (2018). Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar, *Construction and Building Materials*, 176, 250-258. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.060
- [24] Kabay, N., Miyan, N., & Özkan, H. (2021). Utilization of pumice powder and glass microspheres in cement mortar using paste replacement methodology, *Construction and Building Materials*, 282, 122691. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122691
- [25] Sharbatdar, M. K., & Ahmadi, P. (2019). Investigating the effect of compressive strength of repair mortars containing slag in compatibility test with bed concrete, *11<sup>th</sup> National Concrete Conference, Road, Housing and Urban Development Research Center*, Tehran, Iran. [In Persian]
- [26] Iqbali boqrbad, N., & Rahmani, H. (2014). Investigating the effect of zeolite on the mechanical properties of cement-sand mortars, *The 15<sup>th</sup> conference of civil engineering students across the country*, Urmai, Iran. [In Persian]
- [27] Sam, A. R. M., Usman, J., & Sumadi, S. R. (2017). Properties of binary and ternary blended cement mortars containing palm oil fuel ash and metakaolin, *Journal of the Chinese institute of engineers*, 40(2), 170-178. doi: 10.1080/02533839.2017.1287594
- [28] Seifan, M., Mendoza, S., & Berenjian, A. (2020). Mechanical properties and durability performance of fly ash based mortar containing nano-and micro-silica additives, *Construction and Building Materials*, 252, 119121. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119121
- [29] Nasr, D., Behforouz, B., Borujeni, P. R., Borujeni, S. A., & Zehtab, B. (2019). Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling, *Construction and Building Materials*, 229, 116888. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116888
- [30] Liu, Y., Lei, S., Lin, M., Xia, Z., Pei, Z., & Li, B. (2018). Influence of calcined coal-series kaolin fineness on properties of cement paste and mortar, *Construction and Building Materials*, 171, 558-565. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.117
- [31] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- [32] Subaşı, A., & Emiroğlu, M. (2015). Effect of metakaolin substitution on physical, mechanical and hydration process of White Portland cement, *Construction and Building Materials*, 95, 257-268. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.125

- [33] Lei, S. M., Lin, M., Xia, Z. J., Pei, Z. Y., & Li, B. (2018). Influence of calcined coal-series kaolin fineness on properties of cement paste and mortar [J], *Construction and Building Materials*, 171, 558-565. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.03.117**
- [34] Teixeira, E. R., Mateus, R., Camões, A., & Branco, F. G. (2019). Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 197, 195-207. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173**
- [35] Haque, M. B., Tuhin, I. A., & Farid, M. S. S. (2012). Effect of aggregate size distribution on concrete compressive strength, *SUST journal of science and technology*, 19(5), 35-39.
- [36] Singh, S. B., Munjal, P., & Thammishetti, N. (2015). Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar, *Journal of Building Engineering*, 4, 94-100. doi: **10.1016/j.jobbe.2015.09.003**
- [37] Ramezani pour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials, Properties, Durability, Sustainability*, Springer Berlin, Heidelberg.
- [38] Mohit, M., Ranjbar, A., & Sharifi, Y. (2021). Mechanical and microstructural properties of mortars incorporating ceramic waste powder exposed to the hydrochloric acid solution, *Construction and Building Materials*, 271, 121565. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.121565**
- [39] Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations, *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431-442. doi: **10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004**
- [40] Gettu, R., Patel, A., Rath, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Palaniappan, S., & Maity, S. (2019). Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context, *Materials and Structures*, 52, 1-11. doi: **10.1617/s11527-019-1321-5**
- [41] American's Cement Manufacturer. (2016). *Environmental Product Declaration*. ASTM Certified, 1-11.
- [42] Celik, K., Meral, C., Gursel, A. P., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder, *Cement and Concrete Composites*, 56, 59-72. doi: **10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003**
- [43] Yu, J., Mishra, D. K., Hu, C., Leung, C. K., & Shah, S. P. (2021). Mechanical, environmental and economic performance of sustainable Grade 45 concrete with ultrahigh-volume Limestone-Calcined Clay (LCC), *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105846. doi: **10.1016/j.resconrec.2021.105846**