مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳۰، شماره‌ی ۳، ص. ۱۲۵-۱۳۳، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی بتن حاوی پوزولان کاشی ضایعاتی به همراه میکروسیلیس

علی حیدری* **(استادیار)**
دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد
داود توکلی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، ابتدا به بررسی خواص پوزولانی کاشی‌های ضایعاتی پرداخته شده و پس از تأیید خواص پوزولانی، پودر کاشی با مقادیر مختلف در بتن استفاده و خواص بتن حاوی این پوزولان اندازه‌گیری شده است. در بخش دیگری از آزمایش، به بررسی خواص بتن حاوی پوزولان کاشی ضایعاتی به همراه میکروسیلیس پرداخته و اثر هم‌زمان این دو ماده بررسی شده است. نتایج نشان داده است که کاشی ضایعاتی دارای خواص پوزولانی مطلوبی است و تا ۲۰٪ استفاده در بتن، اثر سوء قابل توجهی در عملکرد بتن ندارد. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان میکروسیلیس به همراه پوزولان کاشی اثر دو چندان دارد و میکروسیلیس می‌تواند نقص احتمالی ناشی از مصرف پوزولان کاشی را به خوبی پوشش دهد. در پایان با توجه به ضایعاتی‌بودن ماده‌ی اولیه، اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از این پوزولان در بتن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

heidari@eng.sku.ac.ir
tavakoli.d@gmail.com

واژگان کلیدی: ضایعات کاشی، میکروسیلیس، پوزولان، محیط‌زیست، بتن.

۱. مقدمه

کاشی و سرامیک‌های ساختمانی از مواد بسیار پر مصرف در سازه‌ها هستند. تولید جهانی کاشی و سرامیک در دنیا ۸۵۰۰ میلیون مترمربع است و این میزان تولید، کاشی و سرامیک‌های ساختمانی را به‌عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مواد در جهان قرار می‌دهد. تولید کاشی و سرامیک در ایران در حدود ۴۰۰ میلیون مترمربع (رتبه‌ی پنجم تولید کاشی در جهان) و میزان تولید چینی بهداشتی در ایران حدود ۹۰ هزار تن است. معمولاً ضایعات مربوط به کاشی، سرامیک و چینی‌های بهداشتی به چندین صورت ایجاد می‌شوند: بخشی از ضایعات در کارخانه‌ها در حین و بعد از فرآیند تولید به علت خطای ساخت و یا اشتباهات انسانی و مواد اولیه‌ی نامناسب، بخشی دیگر درمسیرهای حمل و نقل و توزیع و بخش اعظم در اثر تخریب ساختمان‌ها و ضایعات باقی‌مانده از آن ایجاد می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود که حدود ۳-۷ درصد از تولید روزانه‌ی سرامیک در جهان به‌صورت ضایعات در می‌آید، همچنین میزان ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها نیز به این مورد اضافه می‌شود؛ که این میزان ضایعات به میلیون‌ها تن در سال می‌رسد. ماهیت این مواد به گونه‌یی است که نمی‌توان از آنها مجدداً در چرخه‌ی تولید استفاده کرد و عملاً بدون استفاده می‌مانند و همچنین به‌صورت یک زباله‌ی ساختمانی باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند و خسارت‌هایی به آن وارد می‌کنند.[۱]

ماده‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی همه‌ی سرامیک‌های ساختمانی خاک رس است. خاک رس دارای مقادیر بالای سیلیس است، ولی با توجه به ساختار کریستالی این ماده، استفاده از آن نمی‌تواند در بتن باعث چسبندگی شود. در فرآیند تولید کاشی، مواد اولیه تا درجه‌ی حرارتی بالاتر از ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند و همین امر باعث می‌شود که ساختار رس موجود در کاشی از حالت کریستالی به آمورف تغییرشکل دهد، از سوی دیگر فرآیند خنک‌سازی این ماده به گونه‌یی مناسب صورت می‌گیرد و این ماده جهت استفاده به‌عنوان یک ماده‌ی پوزولانی مناسب می‌شود.[۲]

به‌طورکلی بررسی‌های محدودی بر روی خواص پوزولانی کاشی‌ها و سرامیک‌های ساختمانی و استفاده از این ماده در بتن تاکنون انجام گرفته است.[۳-۱۱] در سال ۲۰۰۰، در پژوهشی به بررسی خواص پوزولانی کاشی ضایعاتی پرداخته شده است. در این برنامه‌ی آزمایشگاهی، ابتدا خواص شیمیایی کاشی ضایعاتی براساس استاندارد بررسی و سپس نمونه‌هایی به همراه این پوزولان ساخته و آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج نشان داده است که کاشی‌های ضایعاتی دارای خواص پوزولانی هستند و می‌توان از آنها در بتن استفاده کرد.[۷]

همچنین در پژوهش دیگری، با جایگزینی ۲۰٪ از چند نمونه‌ی مختلف از ضایعات سرامیکی به‌عنوان پوزولان، آزمایش‌هایی بر روی بتن انجام و نشان داده شد که با استفاده از این مواد می‌توان تا مقاومتی در حدود ۹۱٪ از مقاومت نمونه‌ی شاهد رسید، همچنین این ماده باعث کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش کارایی آن می‌شود که در نوع خود جالب توجه است.[۶]

در پژوهش دیگری نیز نشان داده شد که استفاده از ضایعات کاشی و چینی بهداشتی به میزان ۲۰٪ جایگزین سیمان، مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن را تا ۳۵٪ کاهش

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۰/۵، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۱۳.

می‌دهد.[۱۰] همچنین پژوهش‌های دیگری در زمینه‌ی استفاده از آجرهای سرامیکی در بتن،[۹،۱۱] و استفاده از مواد سرامیک در کلینکر سیمان و ملات‌های سیمانی به‌صورت محدودی انجام شده است.[۵،۸] از سوی دیگر، پژوهش‌های وسیع در سال‌های اخیر خواص مثبت میکروسیلیس را بر خواص بتن نشان داده است.[۱۲-۱۴] همچنین اثر مثبت میکروسیلیس به همراه سایر پوزولان‌ها نیز تأیید شده است.[۱۵] با وجود این، تاکنون مطالعه‌ی جامعی بر روی این ماده‌ی پوزولانی برای مقادیر گسترده‌ی جایگزینی انجام نشده است. همچنین اثر هم‌زمان این ماده با میکروسیلیس یا پوزولان‌های رایج دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است. برای این منظور، در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی ابتدا پوزولان کاشی با مقادیر ۱۰ تا ۴۰ درصد جایگزین سیمان و پس از بررسی خواص این بتن و تعیین درصد بهینه به بررسی اثر هم‌زمان میکروسیلیس با مقادیر ۵ تا ۱۵ درصد به همراه ۱۰ تا ۲۵ درصد پوزولان به‌عنوان جایگزین سیمان پرداخته شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها

۱.۲. مصالح و مواد مصرفی

مصالح مصرفی در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی شامل سیمان، آب، پودر کاشی، میکروسیلیس، سنگ‌دانه و فوق روان‌کننده است.

۱.۱.۲. پودر کاشی

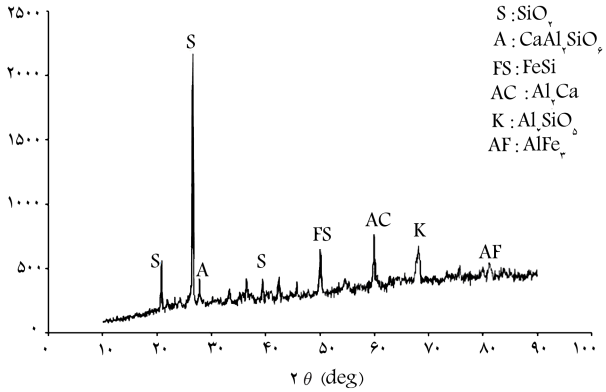
جهت انجام آزمایش‌ها، نمونه‌یی از کاشی کف کارخانه‌ی کاشی ارژنگ شهرکرد تهیه شده است. این نمونه ابتدا در آسیاب فکی بزرگ، پیش آسیاب و سپس توسط آسیاب فکی کوچک‌تر مجدد آسیاب و در نهایت در آسیاب پر قدرت ایر جت میل، تا حدی که کل دانه‌ها از ۷۵ میکرون کوچک‌تر شوند، آسیاب و آماده‌ی انجام آزمایش‌ها شده است (شکل ۱). نمونه‌ی تهیه‌شده جهت بررسی دقیق اکسیدهای تشکیل‌شده تحت آزمایش شیمی تر قرار گرفته و ترکیبات آن به‌صورت دقیق مشخص شده‌اند (جدول ۱). همچنین جهت بررسی ساختارکانی‌شناسی و فاز اصلی تشکیل‌دهنده‌ی پودر کاشی از آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)[۱] استفاده شده است. نتایج این آزمایش نشان داده است که فاز اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این ماده آمورف است. نمودار مربوط به آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین این آزمایش تأکید می‌کند که پودر کاشی یک ماده‌ی سیلیسی است.[۲] آزمایش‌های دیگری نظیر انبساط در اتوکلاو، جرم حجمی، دانه‌بندی، آزمایش تعیین سطح ویژه (BET) و اندازه‌گیری میزان رطوبت ماده بر روی ماده‌ی اولیه انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، این ماده شرایط مناسب را برای یک پوزولان ایده‌آل دارد. در جدول ۳، خواص پوزولانی ماده با توجه به استاندارد ASTM-C۶۱۸ بررسی شده است.[۱۶]

جدول ۳ نشان می‌دهد که کاشی ضایعاتی به خوبی ضوابط استاندارد را ارضاء می‌کند. با توجه به موارد مذکور می‌توان این نکات را برداشت کرد:

مجموع درصد اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم و اکسید آهن به میزان قابل توجهی بالاست، با توجه به بالابودن مقدار سیلیس انتظار می‌رود که در صورت استفاده از این ماده به‌عنوان پوزولان، خواص مقاومتی بالایی را از خود نشان دهد. همچنین مقدار سولفیت و سولفور بسیار کم است و خطر سولفاته‌شدن بتن وجود ندارد. از سوی دیگر میزان قلیایی‌کل در این ماده از میزان مجاز آن بیشتر است و باید در مواردی که شن و ماسه خاصیت واکنش‌زایی قلیایی دارند، با احتیاط و آزمایش

شکل ۱. فرآیند آسیاب کاشی ضایعاتی.



شکل ۲. آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی پودر کاشی.

ترکیب شیمیایی	مقدار (درصد)
SiO_2	۶۸٫۸۵
Al_2O_3	۱۸٫۵۳
Fe_2O_3	۴٫۸۱
CaO	۱٫۵۷
Na_2O	۲٫۰۱
K_2O	۱٫۶۳
MgO	۰٫۷۲
TiO_2	۰٫۷۳۷
MnO	۰٫۰۷۸
P_2O_5	۰٫۰۳۴
SO_3	۰٫۰۶
LOI	۰٫۴۸

جدول ۲. برخی از خواص فیزیکی پودر کاشی.

آزمایش	مقدار
میزان رطوبت (٪)	۰٫۲
انبساط در آزمایش اتوکلاو (٪)	۰٫۰۸
مانده روی الک مش ۳۲۵ به روش تر (٪)	۲۱
جرم حجمی (gr/cm^3)	۲٫۵۷
سطح ویژه به روش BET (m^2/gr)	۳۴٫۱

جدول ۳. خواص پوزولانی کاشی مطابق با استاندارد ASTM.

خواص	پودر کاشی (٪)	استاندارد ASTM (٪)
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	۹۲٫۲	کمینه ۷۰
SO_3	۰٫۰۶	بیشینه ۳
LOI (افت در اثر سرخ شدن)	۰٫۴۸	بیشینه ۱۰
رطوبت	۰٫۲	بیشینه ۳
انبساط در آزمایش اتوکلاو	۰٫۰۵	بیشینه ۰٫۰۸
باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون به روش تر	۲۱	بیشینه ۳۴
معادل قلیایی $Na_2O + 0.65K_2O$*	۳٫۰۷	بیشینه ۱٫۵

* کنترل این مقدار فقط در زمانی که شن و ماسه خاصیت واکنش‌زایی قلیایی داشته باشند، الزامی است.

از این ماده در بتن استفاده کرد. با توجه به ترکیب مواد تشکیل‌دهنده‌ی این ماده و درصد بالای سیلیس و آلومینا و درصد کم اکسید آهک آن نسبت به ترکیبات سیمان انتظار می‌رود که در صورت استفاده از این ماده، شاهد مقاومت اولیه‌ی کم (در ۴ هفته‌ی اول) و مقاومت زیاد در بلندمدت باشیم؛ همچنین به علت دیرگیری بتن در صورت استفاده از پوزولان انتظار می‌رود که حرارت هیدراتاسیون در بتن کاهش پیدا کند، کاهش حرارت هیدراتاسیون منجر به کاهش ترک‌های داخلی و در نتیجه کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. سایر مواد تشکیل‌دهنده در این ماده در حد ناچیز است و نمی‌تواند اثر زیادی در خواص بتن داشته باشد. همچنین با توجه به اینکه به فرآیند تولید کاشی انتظار می‌رفت که این ماده دارای درصد فاز آمورف بالایی باشد، که این نکته توسط آزمایش پراش اشعه‌ی ایکس تأیید شد.[۱۷]

پس با توجه به موارد ذکرشده، این ماده توانایی استفاده به‌عنوان پوزولان را دارد.

۲.۱.۲. میکروسیلیس

میکروسیلیس مصرفی در این آزمایش با نام تجاری ساشیمی، محصول شرکت ساختمان شیمی بوده است. مشخصات کلی میکروسیلیس مصرفی مطابق با مشخصات اعلامی توسط تولیدکننده، مطابق جدول ۴ و ترکیبات شیمیایی آن به‌صورت تقریبی مطابق جدول ۵ است.

۳.۱.۲. سیمان

سیمان استفاده‌شده در این آزمایش، سیمان پرتلند تیپ ۲ ازکارخانه‌ی سیمان شهرکرد است، مشخصات شیمیایی سیمان استفاده‌شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

۴.۱.۲. سنگدانه‌ها

ریزدانه‌ها از نوع شکسته با وزن مخصوص ظاهری ۲٫۶ و جذب آب ۲٪، دارای دانه‌بندی استاندارد بین ۰ تا ۴٫۷۵ میلی‌متر و مدول نرمی ۳٫۱ و مصالح درشت‌دانه نیز از نوع شکسته با وزن مخصوص ۲٫۵۵ و جذب آب ۰٫۲٪، دارای دانه‌بندی استاندارد در محدوده‌ی ۴٫۷۵ تا ۲۵ میلی‌متر هستند.

۵.۱.۲. آب مصرفی

آب مصرفی در این آزمایش آب شُرب شهرکرد بوده است (مشخصات مطابق جدول ۶ است).

۶.۱.۲. فوق روان‌کننده

در این آزمایش از فوق روان‌کننده با نام تجاری SuperPlasticizer۱۶۳ محصول شرکت نامیکاران، که یک دیسپرسیون پلیمری با چگالی ۱٫۱۸ کیلوگرم بر لیتر و رنگ قهوه‌یی است، استفاده شده است.

جدول ۴. مشخصات میکروسیلیس.

نام تجاری	ساشیمی ۹۵۰
استاندارد	ASTM C۱۲۴۰
رنگ	خاکستری
حالت فیزیکی	پودر
وزن مخصوص	۲٫۲ gr/cm^3
وزن مخصوص ظاهری	۲۵۰-۳۰۰ kg/cm^3
میزان خلوص	۹۰ <
درصد رطوبت	۳ >
سطح ویژه	۱۵-۳۰ m^2/gr
سایز ذرات	μm۱ <

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس و سیمان.

پارامتر (درصد)	میکروسیلیس	سیمان
SiO_2	۹۳٫۳	۲۱٫۵
Al_2O_3	۱٫۱	۵٫۰
Fe_2O_3	۰٫۸۵	۴٫۱
CaO	۱٫۲	۶۴٫۷
Na_2O	۰٫۳	–
K_2O	۰٫۷	–
MgO	۱٫۱	≤ ۱٫۷
SO_3	۰٫۷	≤ ۲
L.O.I	۲٫۵	≤ ۱٫۳

جدول ۶. مشخصات آب مصرفی.

PH	کلروها (mg/lit)	سولفات‌ها (mg/lit)	سختی کل (mg/lit)
۷٫۶	۴۰	۲۹	۲۰۵

۲.۲. طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها در این مرحله، ۲ فازکاری مختلف در نظرگرفته شده است: ۱. در فاز اول، برای بررسی بهتر خواص پوزولانی کاشی‌های ساختمانی، پودرکاشی تهیه‌شده در مرحله‌ی قبل به میزان ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد به‌عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است (جدول ۷)؛ ۲. در فاز دوم، جهت بررسی اثر متقابل میکروسیلیس با پوزولان کاشی، میکروسیلیس به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به‌عنوان جایگزین سیمان به همراه پوزولان کاشی به میزان ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد استفاده و اثر هم‌زمان پوزولان با میکروسیلیس بررسی شده است (جدول ۸). در نهایت، برخی از خواص مکانیکی همچون مقاومت فشاری طرح‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه و همچنین میزان جذب آب ۹۰ روزه اندازه‌گیری و نتیجه‌ی کل طرح‌ها مقایسه و نتیجه‌گیری کلی انجام شده است.

بدین ترتیب ۱۴ طرح اختلاط بر اساس آیین‌نامه‌ی ACI جهت ساخت نمونه‌ها تهیه و برای هر طرح اختلاط، ۱۵ نمونه‌ی ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متری جهت تعیین مقاومت فشاری ۷ روزه، ۲۸ روزه، ۵۶ روزه، ۹۱ روزه و آزمایش جذب آب ساخته شده است. برای ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه از هم‌زن با ظرفیت ۱۲۰ لیتر استفاده شده است. ابتدا سنگدانه‌ها به همراه مقداری از آب در هم‌زن مخلوط شدند و سپس

جدول ۷. طرح‌های اختلاط در فاز اول.

نام طرح	سیمان (kg/m³)	پوزولان (kg/m³)	پوزولان (٪)	آب (kg/m³)	شن (kg/m³)	ماسه (kg/m³)	فوق روان‌کننده (٪)
C	۳۲۰	-	-	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۱۰	۲۸۸	۳۲	۱۰	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۱۵	۲۷۲	۴۸	۱۵	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۲۰	۲۵۶	۶۴	۲۰	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۲۵	۲۴۰	۸۰	۲۵	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۳۰	۲۲۴	۹۶	۳۰	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵
CP۴۰	۱۹۲	۱۲۸	۴۰	۱۶۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۱۲۵

جدول ۸. طرح‌های اختلاط در فاز دوم.

نام طرح	سیمان (kg/m³)	پوزولان (kg/m³)	پوزولان (٪)	آب (kg/m³)	میکروسیلیس (kg/m³)	میکروسیلیس (٪)	شن (kg/m³)	ماسه (kg/m³)	فوق روان‌کننده (٪)
CP۱۰M۵	۲۷۲	۳۲	۱۰	۱۶۰	۱۶	۵	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۵
CP۱۰M۱۵	۲۴۰	۳۲	۱۰	۱۶۰	۴۸	۱۵	۱۰۴۰	۸۴۰	۱/۱
CP۱۵M۵	۲۵۶	۴۸	۱۵	۱۶۰	۱۶	۵	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۵
CP۱۵M۱۰	۲۴۰	۴۸	۱۵	۱۶۰	۳۲	۱۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۸
CP۲۰M۱۰	۲۲۴	۶۴	۲۰	۱۶۰	۳۲	۱۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۸
CP۲۰M۱۵	۲۰۸	۶۴	۲۰	۱۶۰	۴۸	۱۵	۱۰۴۰	۸۴۰	۱/۱
CP۲۵M۵	۲۲۴	۸۰	۲۵	۱۶۰	۱۶	۵	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۵
CP۲۵M۱۰	۲۰۸	۸۰	۲۵	۱۶۰	۳۲	۱۰	۱۰۴۰	۸۴۰	۰/۸

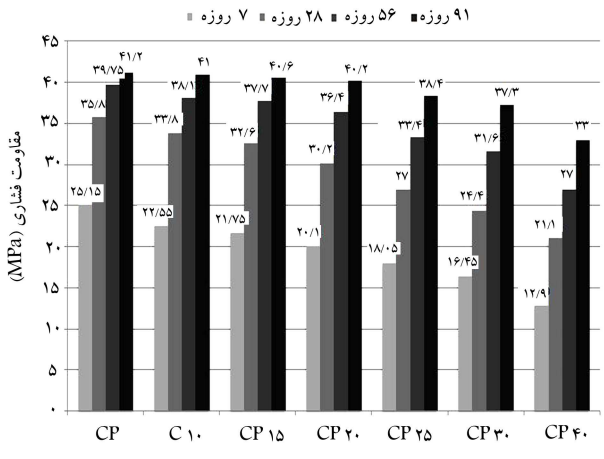
مخلوط سیمان و پوزولان موردنظر اضافه و بعد آب باقی‌مانده به همراه روان‌کننده به مخلوط اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۴ دقیقه مخلوط شد. در نهایت بتن ساخته‌شده در قالب‌های مکعبی ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متری ریخته و فرآیند تراکم و ویبره مطابق با استاندارد بر روی نمونه‌ها انجام شد. این تذکر لازم است که به علت سطح ویژه‌ی بالای میکروسیلیس قبل از اختلاط با مقداری از آب طرح جداگانه مخلوط و در نهایت، به صورت لجن به طرح اضافه شده است. بدین ترتیب نمونه‌ها جهت آزمایش ساخته و پس از انجام آزمایش اسلامپ، قالب‌گیری شده‌اند. بعد از یک روز، نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در محلول آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند.

پس از رسیدن زمان آزمایش، نمونه‌ها از آب بیرون آورده شدند و توسط جک استاندارد ۲۰۰۰ KN مطابق با استاندارد BS ۱۸۸۱:Part ۱۱۶ مورد آزمایش مقاومت فشاری قرارگرفتند. همچنین جذب آب بلندمدت مطابق با استاندارد ASTM C۶۴۲ انجام گرفته است.

۳. نتایج آزمایش‌ها

۱.۳. مقاومت فشاری

نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه و همچنین آزمایش اسلامپ مربوط به نمونه‌های فاز اول در جدول ۹ و برای نمونه‌های فاز دوم در جدول ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳. مقاومت فشاری در فاز اول.

همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌صورت نمودار ستونی برای نمونه‌های فاز اول در شکل ۳ و برای نمونه‌های فاز دوم در شکل ۴ نمایش داده شده است.

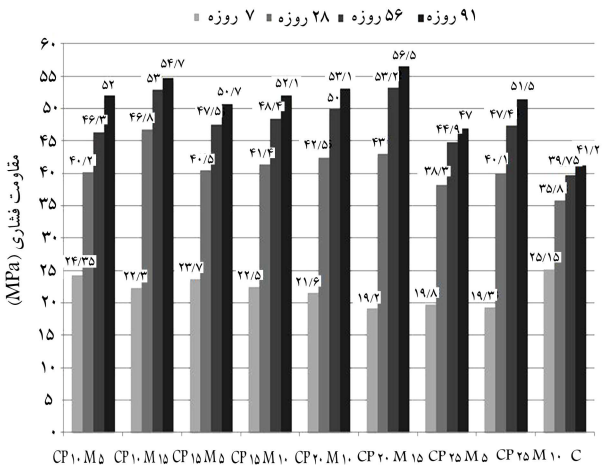
برای نمونه‌های فاز اول مطالعه، مطابق جدول ۹ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مقاومت نمونه‌ها با افزایش میزان پوزولان کاهش می‌یابد. این کاهش با افزایش سن نمونه‌ها کم‌تر شده است، که تأییدی بر خواص پوزولانی کاشی ضایعاتی است. با دقت در نمودار مشخص می‌شود که هر چقدر سن بالاتر می‌رود، رشد مقاومت در نمونه‌های حاوی درصد بالاتر پوزولان بیشتر می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد

جدول ۹. نتایج آزمون مقاومت فشاری و آزمون اسلامپ.

نام طرح	اسلامپ (mm)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۵۶ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۹۱ روزه (MPa)
C	۵۰	۲۵٫۱۵	۳۵٫۸	۳۹٫۷۵	۴۱٫۲
CP۱۰	۴۵	۲۲٫۵۵	۳۳٫۸	۳۸٫۱۵	۴۱٫۰
CP۱۵	۴۵	۲۱٫۷۵	۳۲٫۶	۳۷٫۷	۴۰٫۶
CP۲۰	۴۵	۲۰٫۱	۳۰٫۲	۳۶٫۴	۴۰٫۲
CP۲۵	۴۰	۱۸٫۰۵	۲۷٫۰	۳۳٫۴	۳۸٫۴
CP۳۰	۴۰	۱۶٫۴۵	۲۴٫۴	۳۱٫۶۵	۳۷٫۳
CP۴۰	۳۵	۱۲٫۹	۲۱٫۱	۲۷٫۰	۳۳٫۰

جدول ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌ها در فاز دوم.

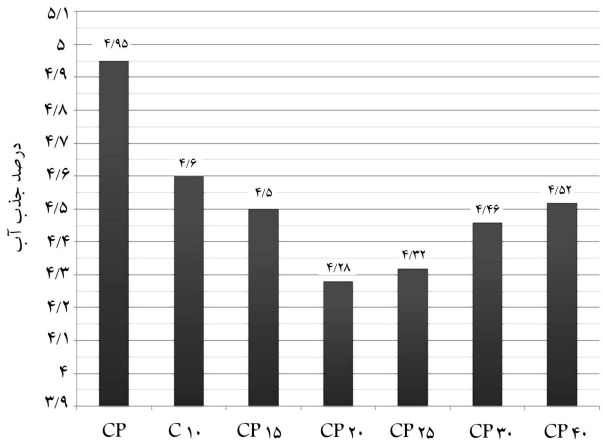
نام طرح	اسلامپ (mm)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۵۶ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۹۱ روزه (MPa)
$CP_{۱۰}M۵$	۵۵	۲۴٫۳۵	۴۰٫۲	۴۶٫۳	۵۲٫۰
CP۱۰M۱۵	۵۰	۲۲٫۳	۴۶٫۸	۵۳٫۰	۵۴٫۷
CP۱۵M۵	۵۵	۲۳٫۷	۴۰٫۵	۴۷٫۵	۵۰٫۷
CP۱۵M۱۰	۵۵	۲۲٫۵	۴۱٫۴	۴۸٫۴	۵۲٫۱
CP۲۰M۱۰	۵۰	۲۱٫۶	۴۲٫۵	۵۰٫۰	۵۳٫۱
CP۲۰M۱۵	۴۵	۱۹٫۲	۴۳٫۰	۵۳٫۲	۵۶٫۵
CP۲۵M۵	۵۰	۱۹٫۸	۳۸٫۳	۴۴٫۹	۴۷٫۰
CP۲۵M۱۰	۴۵	۱۹٫۳	۴۰٫۱	۴۷٫۴	۵۱٫۵



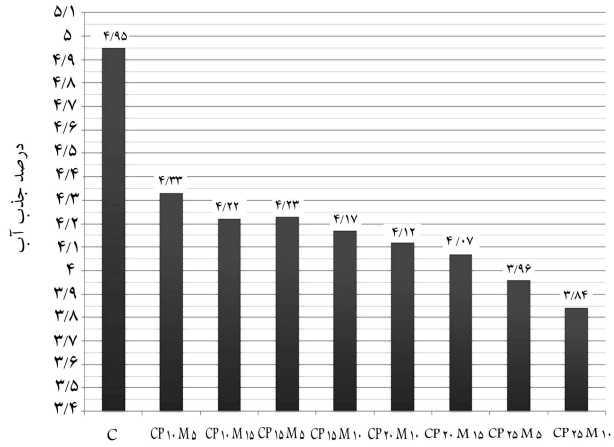
شکل ۴. مقاومت فشاری در فاز دوم.

مناسب پوزولان در سنین بالاست. اختلاف نمونه‌ها در سن ۷ روزه، به علت عدم آغاز فعالیت پوزولانی بسیار زیاد بوده است که با رشد سن بتن، در سن ۹۱ روزه اختلاف بسیار کم‌تر نسبت به قبل است. می‌توان گفت در سن ۷ روزه، پوزولان تنها نقش ریز پرکننده را دارد و هیچ‌گونه فعالیت پوزولانی وجود ندارد. هر چقدر که در نمونه‌های پوزولانی، سن نمونه‌ها افزایش یابد، اختلاف مقاومت با نمونه‌ی شاهد کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۳ مشخص است که مقدار رشد از سن ۲۸ روز تا ۵۶ روز به‌صورت چشم‌گیری بوده است و این نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که فعالیت پوزولانی از هفته‌ی چهارم به بعد به نحو مطلوبی آغاز شده است. در نهایت در سن ۹۱ روزه‌ی نمونه‌ها مقاومت مطلوبی را کسب کرده‌اند، به طوری که میزان کاهش مقاومت برای نمونه‌های: CP۱۰ برابر با ۰٫۴۸٪، CP۱۵ برابر با ۱٫۴۵٪، CP۲۰ برابر با ۲٫۴٪، CP۲۵ برابر با ۶٫۷۹٪، CP۳۰ برابر با ۹٫۴۶٪ است؛ که می‌توان گفت کاهش مقاومت به نسبت نمونه‌ی شاهد تا ۲۰٪ استفاده از پوزولان ناچیز و قابل اغماض است. همچنین میزان کاهش برای ۳۰٪ استفاده از پوزولان می‌تواند قابل قبول باشد. این مقدارکاهش برای نمونه‌ی CP۴۰ حدود ۲۰٪ است، که نشان می‌دهد استفاده‌ی بیش از ۳۰٪ از این پوزولان در بتن مطلوب نیست. در زمینه‌ی کارایی و اسلامپ بتن نیز این پوزولان مقداری کارایی را کاهش می‌دهد، که این مقدار ناچیز است و نهایتاً از بتن پوزولانی کاشی می‌توان مشابه با بتن معمولی استفاده کرد.

برای نمونه‌های فاز دوم مطالعات، مطابق جدول ۱۰ و شکل ۴ مشاهده می‌شود که به طورکلی میکروسیلیس در همه‌ی درصدها استفاده و در همه‌ی طرح‌ها باعث افزایش مقاومت به شکل چشم‌گیری شده است. به‌طوری که کلیه‌ی طرح‌ها با استفاده از میکروسیلیس مقاومت بالاتری از مقاومت بتن شاهد کسب کرده‌اند. بالاترین مقاومت مربوط به استفاده از ۲۰٪ پوزولان و ۱۵٪ میکروسیلیس بوده است. همچنین پایین‌ترین مقاومت مربوط به استفاده از ۲۵٪ پوزولان و ۵٪ میکروسیلیس است. نکته‌ی قابل توجه در نمودار این است که مقاومت فشاری کلیه‌ی طرح‌ها در ۷ روزه، از مقاومت شاهد کم‌تر است و در ۲۸ روزه رشد زیادتری مشاهده می‌شود، به‌طوری که مقاومت طرح‌ها از مقاومت نمونه‌ی شاهد پیشی می‌گیرد، این رشد در نمودارکاملاً واضح است. با توجه به اینکه فعالیت اصلی پوزولان کاشی از سن ۲۸ روز به بعد بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در سنین بین ۷ تا ۲۸ روز به خوبی خود را نشان داده و نقص ناشی از کاهش مقاومت پوزولان کاشی در سنین پایین را به خوبی بر طرف کرده است. استفاده از میکروسیلیس



شکل ۵. جذب آب نمونه‌ها در فاز اول.



شکل ۶. جذب آب نمونه‌ها در فاز دوم.

با درصدهای بالاتر در سن ۷ روزه اثر منفی داشته است و باعث کاهش مقامت بیشتری نسبت به درصدهای پایین‌تر شده است، که این فرآیند در سنین بالا برعکس می‌شود. این نکته نیز تأکیدی بر این موضوع دارد که تا سن ۷ روزه، میکروسیلیس فقط نقش ریز پرکننده داشته و اکثر فعالیت خود را در بین سن ۷ تا ۲۸ روز انجام داده است. پوزولان کاشی در مجاورت میکروسیلیس اثری دو چندان پیدا کرده و با بالارفتن مقدار پوزولان اثر میکروسیلیس نیز بهتر مشخص شده است. البته این شدت افزایش در همه‌ی مقادیر نمی‌تواند صادق باشد و بهترین حالت، استفاده از ۲۰٪ پوزولان به همراه ۱۵٪ میکروسیلیس بوده است. به طورکلی با افزایش میزان پوزولان اثرگذاری میکروسیلیس افزایش می‌یابد و در اصل اثر هم‌زمان این دو پوزولان بیشتر از اثر هرکدام به تنهایی بوده است، که می‌تواند ناشی از پرکردن کامل خلل و فرج به علت تفاوت سایز دانه‌بندی هرکدام و یا واکنش شیمیایی بهتر در حالت ترکیبی در مهار ژل سیلیکات باشد.

۲.۳. جذب آب

جذب آب پارامتر دیگری است که در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است. جذب آب به‌صورت مناسبی وضعیت خلل و فرج داخلی بتن را به ما نشان می‌دهد. بر روی نمونه‌ها آزمایش جذب آب بلندمدت (۷۲ ساعت) انجام شده است، در حین آزمایش وزن ۲۴ ساعته و ۴۸ ساعته نیز اندازه‌گیری شده است تا روند رسیدن به حالت اشباع در بتن بررسی شود. در نتایج درصد جذب آب ۷۲ ساعته به‌عنوان پارامتر جذب آب بلندمدت در نظرگرفته شده است.

نتایج مربوط به جذب آب نمونه‌ها در فاز اول در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. درصد جذب آب نمونه‌ها در همه‌ی طرح‌ها کاهش داشته و فقط با استفاده از ۱۰٪ پوزولان شاهد افت پله‌یی در درصد جذب آب بوده‌ایم و این به دلیل فعالیت خوب پوزولان و انجام واکنش‌های شیمیایی در بتن و پرکردن خلل و فرج داخلی بتن بوده است. درصد بهینه‌ی استفاده از پوزولان برای بهترین درصد جذب آب، نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ پوزولان بوده است. در روند تغییرات درصد جذب آب مشاهده می‌کنیم که در نمونه‌های حاوی ۱۰ تا ۲۰ درصد پوزولان، روند کاهشی درصد جذب آب وجود دارد، در نمونه‌ی حاوی ۲۵٪ پوزولان جذب آب تقریباً برابر با نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ پوزولان بوده و اندکی نیز افزایش داشته است و روند افزایشی از اینجا آغاز شده است تا در نهایت به درصد جذب ۴/۵۲ درصد برای نمونه‌ی حاوی ۴۰٪ پوزولان رسیده است. به طورکلی استفاده از پوزولان در بتن اثر مثبت در جذب آب داشته است، ولی نتایج نشان می‌دهد با اضافه‌شدن میزان پوزولان جذب آب رو به افزایش می‌گذارد.

نتایج مربوط به فاز دوم در شکل ۶ نشان داده شده است. از نتایج مشخص است که میکروسیلیس در همه‌ی مقادیر استفاده‌شده، باعث کاهش هر چه بیشتر درصد جذب آب می‌شود. این درصد کاهش برای درصد پوزولان ۲۵ دارای یک پله کاهش شدیدتر نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است، که می‌توان این مورد را به اثرگذاری هم‌زمان مناسب پوزولان و میکروسیلیس نسبت داد. سایر نمونه‌ها با درصدهای مختلف تقریباً در یک محدوده قرار دارند. در همه‌ی نمونه‌ها همچنین مشاهده می‌شود که درصد بالاتر استفاده از میکروسیلیس اثر مثبت در جذب آب داشته و باعث کاهش جذب آب نمونه‌ها شده است، که البته این مقادیر کاهش در همه‌ی حالات برابر نیستند. کم‌ترین جذب آب متعلق به نمونه‌ی CP۲۵M۱۰ و بیشترین جذب آب مربوط به نمونه‌ی CP۱۰M۵ است.

۴. بررسی زیست‌محیطی و اقتصادی

مزایای زیست‌محیطی استفاده از کاشی‌های ضایعاتی به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن به دو صورت است: ۱. ناشی از حذف بخشی از سیمان از بتن، ۲. ناشی از استفاده از یک ماده‌ی ضایعاتی و غیر قابل بازیافت و بی‌کاربرد در بتن است.

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، میزان تولید کاشی در جهان در حدود ۸۵۰۰ میلیون مترمربع و در ایران حدود ۴۰۰ میلیون مترمربع است. این مقدار، تولید کاشی و سرامیک‌های ساختمانی را در بین محصولات پر تولید و پر مصرف در جهان قرار می‌دهد. همچنین تولید چینی بهداشتی در ایران حدود ۹۰۰۰۰ تن در سال و نیز تولید چینی مظروف در حدود ۳۰۰۰۰ میلیون تن در سال است. ساختار فیزیکی این محصولات به‌گونه‌یی است که درصد بالایی از این محصول در طول مسیر تولید تا توزیع به ضایعات تبدیل می‌شود. میانگین درصد ضایعات در ایران به‌صورت دقیقی اعلام نمی‌شود، ولی در اروپا ۳ تا ۷ درصد از کاشی و سرامیک‌های ساختمانی در مرحله‌ی تولید و قبل از رسیدن به دست مصرف‌کننده به ضایعات تبدیل می‌شود. در صورتی که مقدار ضایعات به‌صورت حدودی در ایران محاسبه شود، ابتدا باید میزان تولید را بر حسب تن تبدیل کنیم. یادآوری می‌شود که به علت نبود اطلاعات

دقیق در ایران در مورد درصد ضایعات و همچنین تنوع تولید محصول و... اطلاعات به‌صورت تقریبی محاسبه می‌شوند.

تولید کاشی و سرامیک ساختمانی در ایران حدود ۴۰۰ میلیون مترمربع است. با توجه به میانگین ضخامت کاشی‌های دیوار و کف در محصولات مختلف که معمولاً در حدود ۴ تا ۱۲ میلی‌متر هستند، به‌صورت فرضی ضخامت میانگین کاشی در حدود ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین وزن مخصوص کاشی و سرامیک‌های کف و دیوار در فاصله‌ی ۱۷۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد، که به‌صورت میانگین حدود ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. با این فرضیات اولیه می‌توان محاسبه کرد که مقدار تولید سالانه‌ی این محصول در حدود ۵،۳۲۰،۰۰۰ تن است. در صورتی که ضایعات تولیدشده در ایران به‌صورت کاملاً ایده‌آل و خوش‌بینانه در حد میزان ضایعات اروپا، حدود ۷٪ تولید در نظر گرفته شود، میزان ضایعات سالانه‌ی ناشی از تولید محصول عددی در حدود ۳۷۲،۴۰۰ تن است. این مقدار ضایعات فقط ناشی از تولید و توزیع کاشی و سرامیک ساختمانی است. لازم به یادآوری است که ضایعات مربوط به مصرف‌کننده از جمله ضایعات ایجادشده در حین کار و یا بخش عمده‌یی از ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها در اینجا در نظر گرفته نشده است. همچنین ضایعات مربوط به چینی‌های بهداشتی و چینی‌های مظروف در محاسبات لحاظ نشده است. پس تقریباً می‌توان گفت سالانه در کشور حدود ۴۰۰ هزار تن ضایعات سرامیکی تولید می‌شود. از سویی ارقام ذکرشده مربوط به تولید کاشی و سرامیک در یک سال است. باید توجه داشت که صنعت کاشی ایران از سال ۱۳۳۹ فعالیت خود را آغاز کرده است و در سال ۱۳۷۳ وارد مرحله‌ی جدیدی شده است و اکنون در حدود ۱۰ سال است که ایران جزء ۲۰ تولیدکننده‌ی کاشی جهان بوده است و در سال‌های اخیر جزء اولین‌های تولید کاشی و سرامیک در جهان بوده است. همچنین در این سال‌ها هیچ‌گاه از ضایعات کاشی در هیچ زمینه‌یی استفاده نشده است و ضایعات در جای جای محیط‌زیست انباشته شده‌اند. بنابراین با درنظرگرفتن ضایعات در چند سال اخیر، کشور ما دارای منبعی عظیم از ضایعات کاشی جهت استفاده‌ی بهینه است.

ضایعات سرامیکی قابلیت بازیافت ندارند و معمولاً به‌صورت یک نخاله‌ی ساختمانی در حاشیه‌ی شهرها و روستاها انباشته می‌شوند و در هیچ فرآیند تولیدی و مصرفی، مصرف نمی‌شوند. انباشته‌شدن این ضایعات با این حجم وسیع به‌صورت سالانه باعث لطمه به محیط زیست اطراف شهرها و روستاها می‌شود. این لطمه به خصوص در قطب صنعت کاشی کشور، استان یزد شدیدتر است. با توجه به حجم مصرف سیمان در کشور می‌توان کل این ضایعات را به راحتی در بتن استفاده کرد و شاهد این نمونه ضایعات در هیچ کجای کشور نبود.

در زمینه‌ی کاهش سیمان از نظر زیست‌محیطی مزایای بسیاری در رابطه با استفاده از پوزولان‌ها وجود دارد، از جمله کاهش گازهای گلخانه‌یی که مهم‌ترین آن‌ها دی اکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن است.

جدی‌ترین مسئله‌ی صنعت بتن این است که از انتشاردهندگان عمده‌ی CO_2 است که باعث افزایش دمای کره‌ی زمین می‌شود. به ازاء هر تن سیمان تولیدی تقریباً یک تن دی اکسیدکربن تولید می‌شود. مجموعاً مخلوط‌های بتنی معمولی حدود ۴۸۰ کیلوگرم CO_2 به ازاء هر مترمکعب بتن یا ۲۰ کیلوگرم به ازاء هر ۱۰۰ کیلوگرم بتن تولیدی ایجاد می‌کنند. این مقدار حدود ۷٪ کل دی اکسیدکربن تولیدشده در جهان است. همچنین، اکسیدهای نیتروژن از سوختن گازوئیل، زغال سنگ و سایر سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شوند. با ترکیب این اکسیدها و ترکیبات آلی فرار در آفتاب، ازن تشکیل می‌شود. ترکیبات آلی فرار از منابع مختلفی از جمله: حلال‌های صنعتی و رزین‌های فرار در درختان ناشی می‌شوند. ازن در نزدیکی زمین می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در رابطه با سلامتی انسان از جمله: آسم و تنگی نفس، گلودرد، سرفه و... شود. به‌علاوه اکسید نیتروژن، دی اکسیدکربن و متان مهم‌ترین گازهای گلخانه‌یی هستند. با فرض تولید حدود ۲٫۳ کیلوگرم NOx به ازاء هر تن سیمان، مقدارکل NOx انتشار یافته‌ی ناشی از ۳ میلیارد و ۱۰۰ میلیون تن سیمان تولیدشده در جهان در سال ۲۰۱۰ برابر با ۷٫۱ تن بوده است. این مقدار، بخش وسیعی از کل NOx آزادشده در کل جهان است.[۱۸]

پس با این آمار با استفاده از فقط ۱۰٪ پوزولان به‌عنوان جایگزین سیمان می‌توان در سال مقدار CO_2 را به میزان ۳۱۰ میلیون تن و NOx را به میزان ۷۱۰ میلیون تن کاهش داد، که این مقدارکاهش تولید گازهای گلخانه‌یی می‌تواند در آینده نجات‌بخش بشریت باشد. مشکلات دیگری از جمله آلودگی‌های صوتی، آلودگی آب و... نیز در رابطه با تولید سیمان وجود دارد که با کاهش مصرف سیمان این مشکلات نیزکاهش می‌یابند.

با توجه به مصرف ۶۰ میلیون تن سیمان در سال در کشور در صورتی که در ۵٪ از پروژه‌های بتنی کشور از ۱۰ تا ۱۵ درصد پوزولان کاشی استفاده شود، کل کاشی ضایعاتی تولیدشده در یک سال در ایران مصرف خواهد شد؛ همچنین در صورت ادامه‌ی روند مصرف و گسترش آن به ۱۰٪ از پروژه‌های کشور، کل ضایعات باقی‌مانده در سال‌های گذشته را نیز می‌توان ظرف چند سال کاملاً در بتن مصرف کرد و از مصرف بیشتر منابع کشور جلوگیری کرد و از سوی دیگر باعث کاهش آلودگی محیط‌زیست ناشی از نخاله‌های ساختمانی شد. همچنین با مصرف کاشی‌های ضایعاتی یک سال در صنعت بتن باکاهش مصرف سیمان می‌توان حدود ۴۰۰،۰۰۰ تن تولید گاز دی اکسیدکربن و۹۲۰،۰۰۰ تن اکسیدهای نیتروژن را درکشورکاهش داد.

با توجه به میزان بهینه‌ی استفاده از پوزولان کاشی‌های ضایعاتی در بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و نداشتن هیچ اثر سوئی بر بتن و بهبود مشخصات بتن، استفاده از این پوزولان در جهت کمک به کاهش مصرف سیمان و محیط‌زیستی پاک‌تر و همچنین حفظ منابع کشور توصیه می‌شود.

استفاده از ضایعات کاشی علاوه بر مزایای زیست‌محیطی دارای مزایای اقتصادی نیز است. هزینه‌ی تولید این ضایعات به مراتب پایین‌تر از تولید سیمان در کشور است. جهت مقایسه‌ی این مورد به‌صورت حدودی هزینه‌ی تمام‌شده هرکدام در بازار محاسبه شده است.

در حال حاضر در سال ۱۳۹۱ هجری شمسی هزینه‌ی هر تن سیمان درکشور در حدود ۸۰۰۰۰ تومان است، که البته هزینه‌ی حمل و نقل به هزینه‌ی فوق اضافه می‌شود. حال باید هزینه‌ی تولید ۱ کیلوگرم پوزولان کاشی محاسبه شود. محاسبه‌ی هزینه‌ها در جدول ۱۱ ارائه و به‌صورت میدانی و از بازار روز تهیه شده است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، تفاوت هر تن سیمان پرتلند با پوزولان کاشی عدد قابل ملاحظه‌یی است، در صورتی که هزینه‌های مربوط به تولید کاشی ضایعاتی به

جدول ۱۱. محاسبه‌ی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پوزولان کاشی و سیمان.

مورد	هزینه (تومان)
قیمت اولیه‌ی هر تن کاشی درجه‌ی ۶	۸۰
هزینه‌ی آسیاب هر تن	۱۲۰۰۰
هزینه‌ی حدودی حمل و بارگیری	۱۵۰۰۰
مجموع هزینه‌ی تولید ۱ تن	۲۷۰۸۰
هزینه‌ی تولید و حمل ۱ تن سیمان پرتلند	۸۴۰۰۰
تفاوت هر تن سیمان با پوزولان	۵۶۹۲۰

علت عدم تولید انبوه بسیار بالاتر از مقدار واقعی هستند. در صورت تولید انبوه این پوزولان، هزینه‌ی آسیاب به نصف و هزینه‌ی حمل هم به یک سوم کاهش می‌یابد و هزینه‌ی هر تن حدوداً به عدد ۱۲۰۰۰ تومان می‌رسد. با این اوصاف و حتی با لحاظ‌کردن عدد دست بالا جهت تولید پوزولان و تفاوت حدودی ۵۷ هزار تومانی در هر تن می‌توان در پروژه‌های بزرگ کشور بر روی استفاده از این پوزولان سرمایه‌گذاری کرد.

برای مثال در صورتی که برای بتن‌ریزی یک سد با توجه به ویژگی‌های مطلوب پوزولان در ۲۰٪ استفاده در کاهش جذب آب و همچنین کاهش حداقلی مقاومت فشاری، از این پوزولان در حد ۲۰٪ جایگزین سیمان استفاده شود، داریم:

با فرض بتن‌ریزی ۱ میلیون مترمکعبی سد حدوداً سیمان مورد استفاده با عیار حدودی ۴۰۰، نیاز به ۴۰۰ هزار تن سیمان است. در صورت استفاده از ۲۰٪ پوزولان جایگزین سیمان مصرفی در حدود ۸۰ هزار تن پوزولان نیاز است که با لحاظ‌کردن تفاوت هزینه‌ها حتی در حالت بالادست قسمت پوزولان (در حالت تولید پر هزینه) شاهد کاهشی در حدود ۴ میلیارد و ۵۶۰ میلیون تومان هستیم. نکته‌ی مورد توجه در اینجا این است که با صرفه‌جویی هزینه‌ها، نه فقط چیزی از دست داده نشده است، بلکه ویژگی‌های مطلوب‌تری در بتن کسب شده است.

بنابراین، استفاده از ضایعات کاشی در بتن به‌عنوان پوزولان کاملاً دارای توجیه اقتصادی است و در صورت تولید انبوه این پوزولان، با هزینه‌یی به مراتب کم‌تر، باعث کاهش هزینه‌ی پروژه‌های بزرگ می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، در ابتدا به بررسی اجمالی خواص پوزولانی کاشی‌های ضایعاتی پرداخته و سپس در فاز اول از آزمایش‌های نمونه‌های بتنی با درصدهای مختلف جایگزینی با این پوزولان ساخته شده و مقاومت فشاری و جذب آب در زمان‌های عمل‌آوری مختلف اندازه‌گیری شده است. همچنین در فاز دوم آزمایشگاهی، اثر این ماده‌ی پوزولانی به همراه میکروسیلیس مورد بررسی قرار گرفته است. براساس آزمایش‌های انجام‌شده، این نتایج حاصل شده است:

۱. مطالعات بر روی ماده‌ی اولیه نشان داد که فاز اصلی تشکیل‌دهنده‌ی کاشی یک فاز آمورف است، که این فاز برای فعالیت پوزولانی در مواد لازم است. همچنین مجموع سه اکسید اصلی: اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم، و اکسید آهن در این ماده برابر با ۹۲٫۲٪ است، که این میزان برای یک ماده‌ی پوزولانی بسیار مطلوب است. از طرفی میزان اکسید سیلیسیم به تنهایی برابر با ۶۸٫۸۵٪ است. همچنین پودر کاشی سایر شرایط فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز خواص پوزولانی را ارضاء می‌کرد. بنابراین استفاده از کاشی ضایعاتی از هر لحاظ به‌عنوان یک پوزولان مطلوب به نظر می‌رسد.

۲. با توجه به مقاومت مناسب نمونه‌های حاوی پوزولان تا ۲۰٪، که در سن ۹۱ روزه مقاومتی تقریباً برابر با مقاومت نمونه‌ی شاهد کسب کرده‌اند، استفاده از این ماده در این درصدها به‌عنوان جایگزین سیمان کاملاً مناسب است. استفاده از ۳۰٪ پوزولان فقط کاهش مقاومتی حدود ۱۰٪ در بتن ایجاد کرده است، که در برابر حذف ۳۰٪ از سیمان بسیار ناچیز است. همچنین به نظر نمی‌رسد که استفاده از این ماده به مقدار بالاتر از ۴۰٪، در نهایت مقاومت مناسبی را به ما بدهد.

۳. درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از پوزولان کاشی کاهش داشته است. این کاهش برای نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ پوزولان بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است، که حدود ۱۳٫۵٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش درصد جذب آب را داشته است. همچنین با افزایش مقدار پوزولان روند کاهشی جذب آب متوقف می‌شود و درصد جذب آب رو به افزایش می‌گذارد. بنابراین توجه به کاهش مقاومت ۲٫۵٪ نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ پوزولان و همچنین کاهش چشم‌گیر جذب آب بتن، استفاده از پوزولان کاشی در ۲۰٪ استفاده کاملاً مناسب به نظر می‌رسد.

۴. استفاده از میکروسیلیس به همراه پوزولان اثر دو چندانی در افزایش مقاومت بتن و کاهش جذب آب داشته است، به طوری‌که با افزایش پوزولان، تأثیر افزایشی میکروسیلیس بیشتر نشان داده شده و در نمونه‌ها با درصد پایین پوزولان، میکروسیلیس تأثیر کم‌تری در رشد مقاومت داشته است. همچنین بهترین حالت استفاده از پوزولان و میکروسیلیس در نمونه‌ی CP۲۰M۱۰ بوده است، که تقریباً با مصرف کم‌تر میکروسیلیس رشد مطلوبی در مقاومت مشاهده شده است.

۵. با توجه به ضایعاتی‌بودن کاشی، فقط هزینه‌ی تولید این پوزولان، هزینه‌ی جمع‌آوری و آسیاب است، که در صورت تولید انبوه، هزینه‌ی تولید به مراتب کم‌تر از هزینه‌ی تولید سیمان می‌شود. در نتیجه این ماده از نظر اقتصادی جهت کاربرد در بتن بسیار مطلوب به نظر می‌رسد. بنابراین استفاده از کاشی‌های ضایعاتی در بتن با توجه به کاهش هزینه‌های اقتصادی، حفظ محیط‌زیست و مدیریت پسماند و کمک به مقاومت سازه‌ها در شرایط مختلف اقدامی در جهت توسعه‌ی پایدار است.

پانوشت

1. X-ray diffraction

منابع (References)

1. Meyer, C. "The greening of the concrete industry", *Cement and Concrete Composition*, **31**(8), pp. 601-605 (2009).
2. Tavakoli, D., Heidari, A. and Karimian, M. "Investigation on pozoolanic properties of waste ceramic tile", *the 4th National Conference on Retrofitting & Preservation of Historical Monuments & Buildings*, Arak, Iran (2011).
3. Khaloo, A.R. "Crushed tile coarse aggregate concrete", *Cement and Concrete Aggregate*, **17**(2), pp. 119-125 (1995).
4. Lopez, V., Llamas, B., Juan, A., Moran, J. and Guerra, I. "Ecoefficient concretes: Impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete", *Biosystem Engineering*, **96**(4), pp. 559-564 (2007).

5. Guerra, I., Vivar, I., Llamas, B., Juan, A. and Moran, J. "Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete", *Waste Management,* **29**(2), pp. 643-646 (2009).

6. Torgal, F. and Jalali, S. "Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete", *Construction and Building Materials*, **24**, pp. 832-838 (2010).

7. Ay, N. and Ünal, M. "The use of waste ground ceramic in cement production", *Cement and Concrete Research,* **30**(3), pp. 497-499 (2000).

8. Lavat, A., Trezza, M. and Poggi, M. "Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture", *Waste Management,* **29**, pp. 1666-1674 (2009).

9. Toledo, F.RD and Gonçalves, J. "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil", *Cement and Concrete Research,* **37**, pp. 1357-65 (2007).

10. Naceri, A. and Hamina, M. "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar", *Waste Management,* **29**(8), pp. 2378-2384 (2009).

11. Alizadeh Kharaazi, M. and Ganjian, E. "Use of Iranian industrial waste for cement replacement in low strength concrete and CLSM", *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies,* Universita Politecnica Delle Marche, Ancona, Italy (2010).

12. Tajik, N. "The impact of silica fume on high strength concrete properties", *International Seminar on the Use of Silica Fume on Concrete, Building and House Research Center,* Tehran, Iran (1997).

13. Mazloom, M., Ramezanianpour, A.A. and Brooks, J.J. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement & Concrete Composites,* **26**(4), pp. 347-357 (2004).

14. Bhanja, S. and Sengupta, B. "Investigations on the compressive strength of silica fume concrete using statistical methods", *Cement & Concrete Research,* **32**(9), pp. 1391-1394 (2002).

15. Shang, M.J. "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", *Cement & Concrete Composites,* **22**(6), pp. 399-406 (2000).

16. ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use a Mineral Admixture in Concrete (2003).

17. Tavakoli, D., Heidari, A. and Etemadi, M. "The use of ceramic tile as pozzolan in concrete", *the 3th National Conference on Concrete,* Tehran, Iran (2011).

18. Pidayesh, M., "Concrete and its interaction with the environment", *the 2th International Conference on Concrete & Development,* Tehran, Iran (2005).