Iranian Concrete Society

The Use of High Volume of Glass Powder as a Substitute for Cement in Self-Compacting Concrete

Saeed Khalooee
MSc Graduate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Babak Ahmadi*
Faculty member, Road, Housing & Urban Development Research Centre, Department of Concrete Technology, Tehran, Iran
b.ahmadi@bhrc.ac.ir

Research paper

Abstract
The use of waste glass aggregates as a substitute for fine natural aggregate and glass powder as a substitute for cement can have economic and environmental benefits. In this study, the behavior of self-compacting concretes containing waste glass aggregate (up to 600 kg / m^3) and glass powder (up to 180 kg / m^3) has been investigated. For this purpose, flowability, stability, and viscosity of self-compacting concrete in fresh state and compressive strength, electrical resistance, resistance to chloride ion penetration and scanning electron microscopy images in hardened state were examined. The results of experiments show that the use of waste glass can have a significant effect on the properties of fresh self-compacting concrete and can increase the superplastisizer demand and potential of bleeding and segregation. Also, by replacing cement with glass powder up to 40%, the results of compressive strength, electrical resistance and chloride ion penetration resistance tests were significantly improved. In this study, it was shown that with the simultaneous use of glass powder and glass aggregates up to one third of the concrete volume, desirable results can be achieved.
Keywords*: Self-Compacting Concrete, Glass Powder, Glass Aggregate, Waste Glass*

**Corresponding Auther: Babak Ahmadi*
Ahmadi, B., Khalooee, S. The Use of high Volume of Glass Powder as a Substitute for Cement in Self-Compacting Concrete. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(1): 1-20.
http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.350039.1283
2538-5828/ *© 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society*
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

دریافت مقاله: ۱۱-۰۴-۱۴۰۱
پذیرش مقاله: ۳۱-۰۶-۱۴۰۱

استفاده از حجم زیاد پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان در بتن خودتراکم

سعید خالوئی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

بابک احمدی*
عضو هیات علمی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش فناوری بتن
b.ahmadi@bhrc.ac.ir
(نویسنده مسئول)

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

استفاده از پودر شیشه با حجم زیاد به عنوان جایگزین سیمان می‌تواند مزایای اقتصادی و محیط زیستی زیادی داشته باشد. در این تحقیق رفتار بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه (تا ۱۸۰ کیلوگرم در مترمکعب) و خرده شیشه‌های ضایعاتی (تا ۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از آزمایش‌های روانی، پایداری و لزجت برای بتن خودتراکم تازه و از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، نفوذ تسریع‌شده یون کلرید و عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی بتن در حالت سخت شده استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با جایگزینی وزنی سیمان با پودر شیشه تا ۴۰ درصد، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند. همچنین، خرده شیشه‌های ضایعاتی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات بتن تازه خودتراکم داشته باشد و سبب افزایش مصرف فوق روان‌کننده، آب انداختگی، جداشدگی و لزجت بتن شود. در این تحقیق نشان داده شد که با استفاده‌ی همزمان از پودر شیشه و خرده شیشه‌های ضایعاتی تا یک سوم حجم بتن می‌توان به بتن با خواص تازه، مکانیکی و دوام مطلوبی دست یافت.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، پودر شیشه، خرده شیشه، شیشه ضایعاتی

۱. مقدمه

با افزایش روزافزون ساخت و ساز و توسعه‌ی صنعت، استفاده از مصالح ساختمانی از جمله بتن در همه‌ی جوامع بشری رو به افزایش است. بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده‌ی ساخته شده به دست بشر همواره یکی از مباحث مورد مطالعه محققان حوزه ساخت و ساز بوده است. به طور کلی، مطالعاتی که در حوزه تکنولوژی بتن صورت می‌گیرد به بررسی خصوصیات بتن تازه، مکانیکی، دوام، ریزساختار و اثرات زیست محیطی این ماده مربوط می‌شود. بتن به عنوان ماده‌ای شناخته می‌شود که با در برگرفتن منابع طبیعی همچون سنگدانه‌ها و آلوده کردن جو به وسیله فرایند آلاینده‌ی تولید سیمان، می‌تواند به محیط زیست آسیب وارد کند، از این رو در سال‌های اخیر، یکی از مباحثی که نظر بسیاری از محققان و دست اندرکاران صنعت بتن را به منظور کاهش اثرات مخرب این ماده‌ی آلاینده بر محیط زیست به خود جلب کرده است استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین اجزاء بتن می‌باشد[۱-۵]. استفاده از مواد ضایعاتی در بتن علاوه برآنکه می‌تواند به کاهش انباشت آن در طبیعت منجر شود، می‌تواند در کاهش استفاده از سیمان و سنگدانه هم تاثیر گذار باشد، از این رو بتن به دست آمده را بتن سبز می‌نامند[۲].

یکی از مواد ضایعاتی که جذابیت زیادی برای استفاده در بتن دارد شیشه است. این جذابیت به این دلیل است که بخش عمده این ضایعات بازیافت نمی‌شود و شیشه‌ی ضایعاتی در صورتی که به صورت پودر درآید می‌تواند همچون یک ماده‌ی جایگزین سیمان استفاده شود و درصورتی که به صورت خرده شیشه در دسترس باشد می‌تواند به صورت جایگزین سنگدانه مورد استفاده قرار بگیرد[۳ و۴].

صنعت شیشه مقدار زیادی از منابع طبیعی زمین را به عنوان مواد خام استفاده می‌کند. برآورد شده است که هر یک کیلوگرم از سطح شیشه ۱/۷۳ کیلوگرم مواد خام و ۰/۱۵ متر مکعب آب مصرف می‌کند و همچنین تولید هرتن محتوی شیشه ۱/۲ تن از مواد خام گران را مصرف می‌کند [۵]. بدین منظور بازیافت و استفاده مجدد از آن مزیت‌های محیط زیستی و اقتصادی دارد. میزان بازیافت ضایعات شیشه درتمام جهان نسبتا کم و عمدتاً متمرکز بر بخش ظروف و بسته‌بندی است. در ایالات متحده ۱۱/۵ میلیون تن از ضایعات شیشه درسال ۲۰۱۰ تنها با نرخ بازیافت ۲۷٪ تولید شده است [۶]. درحالیکه کل ضایعات شیشه در کشورهای عضو اتحادیه اروپا درسال ۲۰۰۸ تنها با نرخ بازیافت ۶۰٪ حدود ۴/۱ میلیون تن تخمین زده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، در ایران هیچ گونه سیستم یکپارچه‌ای برای به دست آوردن مقدار تولید و بازیافت شیشه وجود ندارد و آمار مدونی در این خصوص در دسترس نیست. با توجه به ارزان بودن نیروی کار و انرژی، خلاهای قانونی، عدم تفکیک زباله و نبود عزمی جدی برای حفظ و نگهداری محیط زیست می‌توان حدس زد که مقدار بازیافت شیشه در ایران بسیار اندک باشد. همچنین مقایسه‌ی آمارهای جوامع پیشرفته در خصوص مقدار کم بازیافت شیشه و شرایط موجود ذکر شده در ایران احتمال وجود این امر را افزایش می‌دهد [۷].

علاوه بر اینکه شیشه‌های ضایعاتی پتانسیل استفاده در بتن را دارند، محصولات فرعی کارخانه‌های تولید دانه‌های شیشه‌ای (گلس‌بید[1]) می‌توانند در ساخت بتن مورد استفاده قرار بگیرند. گلس‌بید در صنایع مختلف برای شستشوی دستگاه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تولید گلس‌بید با استفاده از شیشه‌های آهکی - سیلیسی، پودر شیشه یکی از محصولاتی است که به صورت فرعی در فرآیند تولید آن حاصل می‌شود. بررسی های صورت گرفته نشان می‌دهد که اکثر کارخانه‌های تولید گلس‌بید در ایران هیچ بازاری برای فروش پودرشیشه حاصل از فرایند تولید خود ندارند و حاضر هستند به صورت شرایطی و قیمتی ارزان، آنها را در اختیار خریداران قرار دهند. این در حالی است که استفاده از شیشه‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین سیمان در اروپا و آمریکای شمالی به صورت

1 Glass bead

گسترده‌ای رو به افزایش است [۸-۱۰] استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان در ایران به صورت ناشناخته باقی مانده است و کمتر کسی در حوزه صنعت بتن به آن به عنوان یک ماده قابل اتکا در بتن نگاه می‌کند.
استفاده از شیشه‌های ضایعاتی در بتن می‌تواند یک راهکار بسیار ارزشمند در جهت کاهش انباشت ضایعات شیشه باشد. از آنجا که پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان می‌تواند به بهبود مقاومت و دوام بتن و کاهش استفاده از سیمان منجر شود، بررسی خصوصیات همه جانبه این ماده در ساخت بتن توجیه پذیر است[۱۱]. پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان یکی از موادی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. جالب توجه است که پودر شیشه با اندازه‌ی ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون تمایل به ایجاد واکنش پوزولانی دارد و هرچقدر که ذرات آن ریزتر باشند این واکنش شدت بیشتری به خود می‌گیرد[۱۲].
پودر شیشه به عنوان ماده‌ای که جذب آب سطحی نزدیک به صفر دارد و ذرات آن همچون سیمان بسیار تیزگوشه هستند، می‌تواند برخصوصیات بتن تازه تاثیرگذار باشد. لو[1] و همکارانش مشاهده کردند که با جایگزین کردن سیمان با پودر شیشه با حداکثر اندازه ذرات ۲۰۰ میکرون، روانی بتن به دلیل تیزگوشگی و شکل هندسی ذرات شیشه به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرد[۱۲]. سوارز[2] و همکارانش با استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان که ۶۰٪ از ذرات آن کوچکتر از ۸۸ میکرون بود، گزارش کردند که روانی بتن به دلیل جذب آب سطحی بسیار کم پودر شیشه افزایش پیدا کرد [۱۳]. طاها[3] و همکارش گزارش دادند که با استفاده از پودر شیشه با اندازه ذرات ۴۵ میکرون در بتن، روانی بتن تغییر چندانی نکرده است [۱۴]. شایان[4] و همکارش کاهش روانی بتن را با استفاده از پودر شیشه با اندازه‌ی ذرات حدود ۱۰ میکرون مشاهده کردند [۱۵]. طارق[5] و همکارانش با بررسی تاثیر پودر شیشه در بتن خودتراکم مشاهده کردند که هرچه پودر شیشه ذرات درشت تری داشته باشد، مصرف فوق روان کننده برای رسیدن به روانی مورد نظر در بتن خودتراکم کاهش پیدا می‌کند [۱۷]. به طور کلی می‌توان جمع‌بندی نمود که عوامل تیزگوشگی، سطح مخصوص زیاد و جذب آب سطحی بسیار کم پودر شیشه به گونه‌های مختلف می‌تواند در روانی بتن تاثیر داشته باشند. همچنین نوع سنگدانه‌ها، حجم خمیر بتن و مدول نرمی ریزدانه‌ها و همچنین نرمی سیمانی که بخشی از آن با پودر شیشه جایگزین شده است همگی از جمله عواملی هستند که می‌تواند نتایج مطالعات را تحت تاثیر قرار دهد.
پودر شیشه به عنوان یک ماده‌ی جایگزین سیمان با واکنش پوزولانی که از خود نشان می‌دهد می‌تواند سبب متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن شود. هرآنچه ریزساختار بتن دارای تراکم بیشتر و نفوذپذیری کمتری باشد خصوصیات سخت شده‌ی آن نظیر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت الکتریکی، خزش، سایش و جمع شدگی ناشی از خشک شدن بهبود پیدا می‌کند[۱۴]. کمالی[6] و همکارانش نشان دادند که استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان سبب بهبود قابل توجه مقاومت فشاری و خمشی بتن در دراز مدت می‌شود و همچنین در مقایسه با دوده سیلیسی این ماده می‌تواند عملکرد مشابه و یا کمی بهتر را از خود نشان دهد [۱۷]. عمران[7] و همکارانش در بررسی درازمدت عملکرد پودر شیشه در بتن دریافتند که تراکم بیشتر ریزساختار بتن مخصوصاً با گذر زمان که نتیجه‌ی آن بهبود خواص مکانیکی بتن (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته) بود از بارزترین مزایای استفاده از پودر شیشه در بتن می‌باشد [۱۸]. میرزاحسینی[8] و همکارش در

1 Lu
2 Schwarz
3 Taha
4 Shayan
5 Tariq
6 Kamali
7 Omran
8 Mirzahosseini

خصوص تاثیر دمای عمل آوری بر واکنش پوزولانی پودر شیشه و درنتیجه خصوصیات سخت شده بتن مطالعاتی را انجام دادند [۱۹]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که در دمای کمتر از ۱۰ درجه سلیسیوس پودر شیشه در بتن تا سن ۹۰ روز واکنش پوزولانی محسوسی از خود نشان نداده و جایگزینی سیمان با پودر شیشه سبب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. از طرفی دیگر، در دماهای بالا پودر شیشه واکنش پوزولانی قابل توجهی از خود نشان داده است و سبب بهبود خواص مکانیکی بتن شده است. آنها نتیجه گرفتند که واکنش پوزولانی پودر شیشه بسیار وابسته به دمای عمل آوری می‌باشد و هرچه اندازه‌ی آن ریزتر و دمای عمل آوری بالاتر باشد نتایج مطلوب‌تری به دست می‌آید. کمالی[1] و همکارانش مطالعاتی در خصوص اصلاح هیدراسیون و ریزساختار خمیر سیمان با استفاده از پودر شیشه انجام دادند [۲۰]. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که پودر شیشه علاوه بر واکنش پوزولانی سبب افزایش مقدار آب غیر قابل تبخیر در ساختار سیمان می‌شود که در نتیجه هیدراسیون سیمان بهبود پیدا می‌کند. بهبود اصلاح ناحیه انتقال خرده شیشه‌های ضایعاتی و سیمان با استفاده از پودر شیشه یکی از مطالعاتی بوده است که به منظور بررسی تاثیر مثبت استفاده همزمان پودر شیشه و خرده شیشه در بتن انجام شده است [۲]. پودر شیشه سبب اصلاح ناحیه انتقال خرده شیشه و سیمان می‌شود و این موضوع باعث بهبود خصوصیات مکانیکی بتن می‌شود.

دوام بتن حاوی پودر شیشه یکی از مباحثی بوده است که به صورت گسترده در بیشتر مطالعات قبلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از آنجا که پتانسیل ایجاد واکنش قلیایی – سیلیسی با استفاده از خرده شیشه‌های ضایعاتی و درنتیجه به مخاطره انداختن دوام بتن همواره نگرانی‌هایی را برای استفاده از این ماده در بتن ایجاد کرده است، بسیاری از مطالعات در راستای بررسی شکل‌گیری این واکنش در حضور پودر شیشه شکل گرفته است [۲۱]. با رجوع به مطالعات قبلی به نظر می‌رسد علاوه برآنکه پودر شیشه خطری را بابت واکنش قلیایی – سیلیسی به بتن تحمیل نمی‌کند، بلکه می‌تواند با شکل دادن واکنش پوزولانی، کاهش قلیایی‌های بتن، کاهش ضریب انتشار یون‌ها و ایجاد تغییر در ساختار شیمیایی ژل واکنش قلیایی - سیلیسی در کاهش این خطر تاثیر مثبت داشته باشد [۲۲]. از طرفی دیگر با توجه به آنکه در ساختار شیمیایی پودر شیشه حدود ۱۰ درصد سدیم (Na) وجود دارد، تعدادی از پژوهشگران در خصوص خطر این قلیایی در ایجاد واکنش با سنگدانه‌های سیلیسی در بتن مطالعه کردند [۲۳]. شفاعتیان و همکارانش دریافتند که هرچند سدیم موجود در پودر شیشه می‌تواند در محیط بتن آزاد شود، اما به دلیل آنکه به صورت یونی(Na^+) نمی‌باشد بر ایجاد و یا تشدید واکنش قلیایی – سیلیسی تاثیری ندارد. همچنین آنها این ماده را به عنوان یک پوزولان در جهت کاهش پتانسیل واکنش قلیایی – سیلیسی معرفی کردند [۲۳].

مطالعاتی که در خصوص بتن حاوی پودر شیشه انجام گرفته است تاثیر مثبت این ماده را بر دوام نشان می‌دهد [۲۴و۲۵]. بهبود دوام بتن با استفاده از پودر شیشه در صورتی محقق می‌شود که این ماده توانایی واکنش پوزولانی را با ریز کردن ذرات آن به دست آورده باشد.

یکی از انواع بتن‌هایی که می‌تواند با استفاده از ضایعات شیشه ساخته شود، بتن خودتراکم است[۲۷]. بتن خودتراکم به بتنی اطلاق می‌شود که بدون نیاز به لرزاندن، قابلیت پرکنندگی و عبور از میان میلگردها را داشته باشد، به شرطی که در آن جداشدگی رخ ندهد[۲۶]. به این منظور، بتن خودتراکم حداکثر اندازه‌ی سنگدانه‌ی کوچکتری نسب به بتن معمولی دارد و قابلیت روانی و پرکنندگی بیشتر خود را با استفاده از حجم خمیر بیشتر به دست می‌آورد. همچنین به منظور جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها در بتن خودتراکم، از نسبت ماسه به شن بیشتری نسبت به بتن معمولی استفاده می‌شود.

1 Kamali

استفاده از ضایعات شیشه در بتن خودتراکم به صورت خرده شیشه (جایگزین ماسه) می‌تواند در خصوصیات تازه آن نقش پررنگی داشته باشد. از انجا که جذب آب سطحی شیشه نزدیک به صفر است و سطحی صیقلی دارد، این ماده نمی‌تواند مولکول‌های آب بتن را در سطح خود همچون سنگدانه های طبیعی نگه‌دارد و از این رو باعث افزایش پتانسیل آب انداختگی در بتن تازه می‌شود. اگر آب انداختگی زیادی در بتن خودتراکم رخ دهد، خود می‌تواند منجر به جداشدگی در سنگدانه ها و مشکلات اجرایی شود[۲۷].

مشکل اساسی دیگری که می‌تواند با استفاده از خرده شیشه در بتن خودتراکم ایجاد شود در خصوص واکنش قلیای- سیلیسی ناشی از وجود سیلیس آمورف موجود در این ماده می‌باشد که در درازمدت پدیدار می‌شود[۲۸]. سیلیس آمورف موجود در خرده شیشه می‌تواند با قلیایی‌های سیمان واکنش دهد و در شرایطی که رطوبت نیز وجود داشته باشد منجر به افزایش حجم و ترک خوردگی بتن شود. هرچه که اندازه‌ی این خرده شیشه ها بزرگتر باشد، واکنش قلیایی- سیلیسی با شدت بیشتری رخ خواهد داد. این موضوع به دلیل آن است که ژل ناشی از واکنش قلیایی- سیلیسی در ریزترک‌های سطح داخلی شیشه شکل می‌گرد، از این رو خرده شیشه‌های بزرگتر که در فرایند خردایش ترک‌های بزرگتری را در خود جای داده‌اند باعث تشدید این واکنش می‌شوند[۲۸].

به منظور رفع مشکلات قلیایی – سیلیسی بتن حاوی خرده شیشه‌های ضایعاتی و استفاده بهتر از آن، محققان دریافتند که استفاده از ضایعات شیشه در بتن خودتراکم به صورت پودر شیشه (جایگزین سیمان) می‌تواند مشکلات این ماده در بتن را کاهش دهد زیرا پودر شیشه در صورتی که به اندازه کافی ریز باشد می‌تواند همچون یک ماده پوزولانی عمل کند و به جای آنکه سیلیس فعال این ماده در واکنش مخربِ قلیایی-سیلیسی شرکت کند، خیلی زودتر در واکنش پوزولانی مصرف شود . همچنین، از آنجا که پودر شیشه به دلیل تیزگوشگی زیاد سطح مخصوص بیشتری نسبت به سیمان دارد، با جایگزین کردن این ماده با سیمان مشکل آب انداختگی و جداشدگی وجود نخواهد داشت.[۲۹-۳۱].

هدف اصلی و نوآوری این تحقیق بررسی خصوصیات بتن خودتراکم حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به می‌باشد، همچنین امکان‌سنجی استفاده از حجم زیادی از این ضایعات در بتن مورد بحث قرار گرفته است. به این منظور، برای اولین بار شیشه‌های ضایعاتی به صورت خرد شده جایگزین ماسه (تا ۷۰ درصد جایگزین حجمی) و به صورت پودر شده جایگزین بخشی از سیمان (تا ۴۰ درصد جایگزین وزنی) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی تاثیر همزمان پودر شیشه و خرده شیشه در بتن خودتراکم نیز طرح مخلوط‌هایی با استفاده از این دو ماده طراحی شده است.

۲. مواد و روش‌های آزمایش

۱.۲. مواد سیمانی

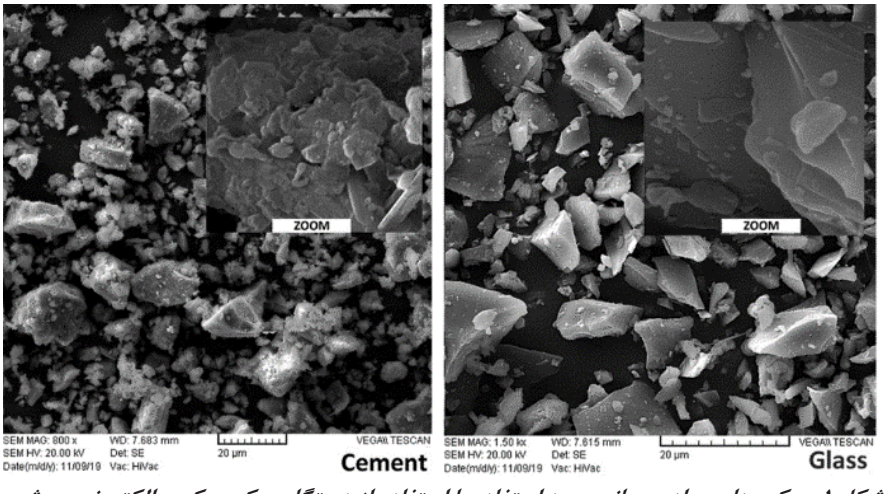
سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند نوع ۲ تولید شده در کارخانه سیمان تهران بود که وزن مخصوصی برابر با ۳/۱۲ دارد. همچنین پودر شیشه مورد استفاده در این تحقیق که بر گرفته از شیشه‌های آهکی- سیلیسی می‌باشد وزن مخصوصی برابر با ۲/۵۲ دارد. به منظور بررسی و مقایسه ساختار شیمیایی و اکسیدهای تشکیل دهنده مواد سیمانی مورد استفاده در این تحقیق جدول ۱ ارائه شده است که برگرفته از نتایج آزمایش فلوئورانس اشعه ایکس می‌باشد.

با توجه به آنکه شیشه‌های ضایعاتی دارای انواع مختلفی هستند و بررسی آنکه تا چه میزان ساختاری آمورف و یا کریستالی دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در این تحقیق با استفاده از آزمایش پراش اشعه ایکس این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه آن در جدول ۱ ذکر شده است.

شکل ظاهری مواد سیمانی می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خصوصیات بتن ساخته شده با آن داشته باشد لذا به منظور بررسی این موضوع از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است و تصاویر آن در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش آنالیز شیمیایی مواد سیمانی

ترکیب شیمیایی	سیمان (٪)	پودر شیشه (٪)
SiO2	۲۱/۱۸	۶۹/۲۴
Al2O3	۴/۶۲	۶/۰۶
Fe2O3	۴/۲۵	۰/۱۷
CaO	۶۲/۵۵	۷/۹۳
Na2O	۰/۱۴	۱۰/۹۶
K2O	۰/۶۹	۰/۲۶
MgO	۱/۶۸	۲/۹۶
SO3	۲/۸۵	۰/۲۳
L.O.I	۰/۶۷	۲/۱۹
C3S	۴۸/۴۳	-
C2S	۲۴/۱۹	-
C3A	۵/۰۵	-
C4AF	۱۲/۹۴	-
مقدار کریستالی بودن (درصد)	-	۵/۳
سطح مخصوص (نتایج آزمایش BET)	۱/۲۱ متر مربع در هر گرم	۱/۹۲ متر مربع در هر گرم



شکل ۱- عکس‌های مواد سیمانی مورد استفاده با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

۲.۲. سنگدانه‌ها

برای ساخت بتن‌های خودتراکم از ماسه طبیعی دارای وزن مخصوص ۲/۶۱ و جذب آب ۲/۶۱ درصد استفاده شد. همچنین میزان عبوری از الک ۲۰۰ میکرون برای ماسه طبیعی ۳/۶ درصد بود. درشت‌دانه‌ها محصول معدنی در شهریار و به صورت گردگوشه با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر بودند. وزن مخصوص درشت دانه ها برابر با ۲/۵۴ و جذب آب آن ۲/۲ درصد می‌باشد.

۳.۲. خرده شیشه‌های ضایعاتی

خرده شیشه‌های ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق وزن مخصوصی برابر با ۲/۵۲ داشتند که شکستگی بسیار بیشتری (تقریباً صد درصد) نسبت به ماسه طبیعی داشتند. این خرده شیشه‌ها که فرایند خردایش آنها با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای صورت گرفته بود با استفاده از الک در محدوده‌های دانه‌بندی مشخصی قرار داشتند: ۲۰۰-۱۰۰، ۳۰۰-۲۰۰، ۶۰۰-۳۰۰، ۱۲۰۰-۶۰۰ و ۲۳۰۰-۱۲۰۰ میکرون. این محدوده‌های دانه‌بندی باهم ترکیب شدند تا خرده شیشه‌هایی با دانه‌بندی منطبق بر دانبه بندی ماسه کوچکتر از ۲/۳۶ میلیمتر تولید شود (شکل ۲).

شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه طبیعی کوچکتر از ۲/۳۶ میلیمتر و خرده شیشه‌های ساخته شده

۴.۲. طرح‌های مخلوط

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، پودر شیشه به مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین وزنی سیمان شده است تا اثر این ماده به عنوان یک پوزولان مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین به منظور بررسی تاثیر همزمان خرده شیشه‌های ضایعاتی و پودر شیشه در بتن، طرح مخلوط‌هایی با ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی پودر شیشه جایگزین سیمان و ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد حجمی خرده شیشه جایگزین ماسه کوچکتر از ۲/۳۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. عیار مواد سیمانی به صورت ثابت به مقدار ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد و یک طرح کنترل در نظر گرفته شد. نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح مخلوط‌ها برابر با ۰/۴ و از ۷۰ درصد حجمی ریزدانه و ۳۰ درصد حجمی شن به عنوان سنگدانه استفاده شده است. جریان اسلامپ هدف برابر با ۵۰± ۷۰۰ میلی‌متر می‌باشد که برای دستیابی به آن به مقدار لازم فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شده است.

جدول ۲- طرح مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پودر شیشه

کد طرح مخلوط	مواد سیمانی (Kg/m³)		آب (Kg/m³)	SP[1] (٪)	شن (Kg/m³)	سنگدانه‌ها	
	سیمان	پودر شیشه				ریزدانه ها	
						۴/۷۵ – ۲/۳۶ (mm)	کوچکتر از ۲/۳۶ (mm)
						ماسه طبیعی (Kg/m³)	ماسه طبیعی (Kg/m³) - ٪	خرده شیشه (Kg/m³) -٪
Control	۴۵۰	۰	۱۸۰	۰/۶۳	۴۹۵	۳۳۱	۸۵۷ – ۱۰۰	۰ - ۰
GP10	۴۰۵	۴۵	۱۸۰	۰/۷۴	۴۹۳	۳۲۹	۸۵۳ – ۱۰۰	۰ - ۰
GP20	۳۶۰	۹۰	۱۸۰	۰/۷۴	۴۹۰	۳۲۷	۸۴۳ – ۱۰۰	۰ - ۰
GP30	۳۱۵	۱۳۵	۱۸۰	۰/۷۵	۴۸۸	۳۲۶	۸۴۴ – ۱۰۰	۰ - ۰
GP40	۲۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۰/۷۵	۴۸۵	۳۲۴	۸۳۹ – ۱۰۰	۰ - ۰
GP20 GA30	۳۶۰	۹۰	۱۸۰	۰/۸۴	۴۹۰	۳۲۷	۶۰۱ – ۷۰	۲۳۷ – ۳۰
GP20 GA50	۳۶۰	۹۰	۱۸۰	۰/۸۲	۴۹۰	۳۲۷	۴۳۶ – ۵۰	۳۹۷ – ۵۰
GP20 GA70	۳۶۰	۹۰	۱۸۰	۰/۸۵	۴۹۰	۳۲۷	۲۷۵ – ۳۰	۵۵۲ – ۷۰
GP40 GA30	۲۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۰/۶۷	۴۸۵	۳۲۴	۵۹۴ – ۷۰	۲۳۵ – ۳۰
GP40 GA50	۲۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۰/۷۰	۴۸۵	۳۲۴	۴۳۲ – ۵۰	۳۹۳ – ۵۰
GP40 GA70	۲۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۰/۷۷	۴۸۵	۳۲۴	۲۷۲ - ۳۰	۵۴۷ – ۷۰

۱= فوق روان کننده

۵.۲. ساخت و آماده سازی نمونه‌ها

برای هر طرح مخلوط در ابتدا به منظور جلوگیری از افت روانی بتن به دلیل جذب آب سنگدانه‌ها، ابتدا آب و سنگدانه‌ها باهم مخلوط شدند و بعد از دقایقی، مواد سیمانی به طرح مخلوط اضافه شد. بعد از ۲ دقیقه اختلاط بتن توسط میکسر، به آرامی فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شد تا روانی مورد نظر (جریان اسلامپ ۵۰±۷۰۰ میلیمتر) به صورت تجربی و چشمی احساس شود. سپس در صورت تایید روانی هدف توسط آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم، ادامه آزمایش‌های بتن تازه انجام شدند. در نهایت نه عدد آزمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر و ۲ عدد آزمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در ۳۰۰ میلی‌متر به منظور بررسی آزمایش‌های بتن سخت شده ساخته و بعد از ۲۴ ساعت عمل آوری در محیط آزمایشگاه به حوضچه آب-آهک با دمای ۲±۲۰ درجه انتقال داده شد.

برای ساخت آزمونه‌های آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی، ابتدا با استفاده از اره الماس یک آزمونه‌ی مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری از به دو قسمت تقسیم شد و سپس یک سطح از آن با استفاده از صفحه‌های الماس پولیش داده شد. صفحه‌های الماس از گریت ۲۰۰ شروع و به ۳۰۰۰ ختم می‌شدند که مرحله به مرحله فرایند پولیش‌کاری برای رسیدن به یک سطح براق انجام شد. در ادامه با استفاده از اره الماس یک مکعب ۱ سانتی‌متری از آزمونه استخراج شد تا بعد از ایجاد یک لایه نازک طلا روی آن، مورد آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار بگیرد.

۶.۲. آزمایش های بتن تازه

برای بررسی قابلیت جریان بتن خودتراکم و همچنین شدت آب انداختگی آن از آزمایش جریان اسلامپ و شاخص پایداری چشمی طبق استاندارد ASTM C1611 استفاده شد. همچنین از آزمایش‌های قیف V طبق روش استاندارد BS EN 12350-9-2010 به منظور بررسی لزجت بتن و پایداری شبکه الک طبق روش استاندارد BS EN 12350-11-2010 به منظور بررسی میزان جداشدگی بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گرفت.

۷.۲. آزمایش‌های بتن سخت شده

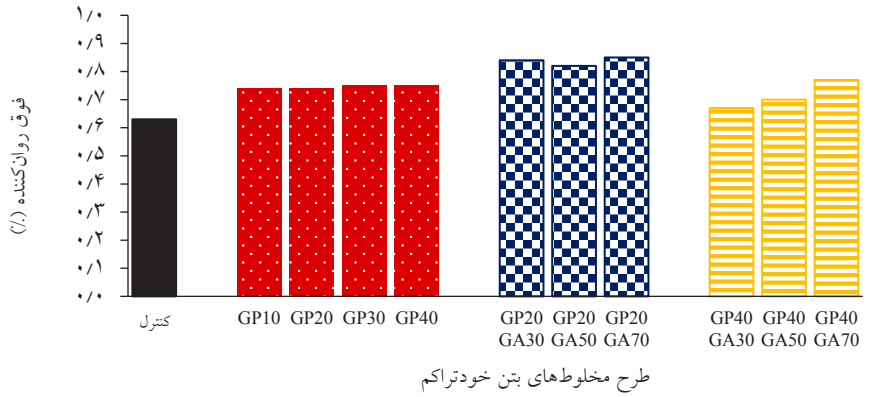
مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین در این مطالعه با توجه به روش ارائه شده دراستاندارد ASHTO TP358، از دستگاه مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای روی آزمونه‌های بتنی با اندازه‌ی ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر به عنوان معیاری برای ارزیابی دوام بتن‌های خودتراکم در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز استفاده شد.

از آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید به منظور نفوذپذیری بتن استفاده شد. طبق روش استاندارد ASTM C1202 یک استوانه‌ی بتنی به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۵۰ میلیمتر پس از عایق سازی دور آن و اشباع شدن توسط ایجاد خلا در دستگاه دسیکاتور، در در داخل سلول‌های دستگاه که حاوی محلول ۳٪ نمک و سدیم هیدروکسید ۰/۳ مولار است قرار داده و یک جریان ولتاژ به میزان ۶۰ ولت به آزمونه اعمال می‌شود. با اندازه گیری شار عبوری توسط دستگاه، مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید به دست می‌آید. در این مطالعه از آزمایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید برای بتن‌های خودتراکم در سن ۳۶۵ روز استفاده شد.

عکسبرداری از ریزساختار بتن توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با روبش پرتو الکترونیکی روی سطحی از آزمونه که قبلا پولیش داده شده بود انجام شد. با برش قطعات مکعبی به ابعاد ۱۰ میلی‌متر از درون آزمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری مخلوط‌های حاوی خرده‌شیشه‌های ضایعاتی آزمونه‌ها به دست آمدند و با استفاده از پد الماسه طی چند مرحله صیقل داده شدند. سپس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی از نقاط مختلفی از آن عکس‌هایی با بزرگنمایی‌های مشخصی گرفته شد.

۳. نتایج آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم حاوی پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان

شکل ۳ مقدار فوق روان‌کننده‌ی مصرف شده به منظور دستیابی به جریان اسلامپ هدف در بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش جایگزینی سیمان با پودر شیشه از ۱۰ تا ۴۰ درصد (GP10، GP20، GP30 و GP40) بر مقدار استفاده از مصرف فوق روان‌کننده اثر قابل توجهی نداشته است(کمتر از ۱ درصد وزنی مواد سیمانی) و تمامی بتن‌های خودتراکم با استفاده از ۰/۷۵ درصد فوق روان‌کننده به نسبت وزن مواد سیمانی به روانی مورد نظر رسیده‌اند، هرچند کمی افزایش مصرف فوق روان‌کننده نسبت به طرح شاهد دیده می‌شود. با توجه به آنکه سطح مخصوص پودر شیشه کمی بیشتر و ذرات آن کمی ریزتر از سیمان است، انتظار می‌رفت که با افزایش جایگزینی سیمان با پودرشیشه، مقدار فوق روان‌کننده افزایش پیدا کند. اما با توجه به آنکه پودر شیشه در ابتدای مخلوط کردن بتن و در خلال آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم، آب کمتری را در سطح خود جذب می‌کند (یعنی جذب آب سطحی کمتر دارد)، سبب افزایش روانی خودتراکم می‌شود. این موضوع می‌تواند از تاثیر سطح مخصوص بیشتر پودر شیشه نسبت به سیمان بکاهد و درنتیجه، تغییر چندانی در مصرف فوق روان‌کننده مشاهده نشود. همچنین از آنجا که وزن مخصوص پودر شیشه کمتر از سیمان است، با جایگزینی وزنی، حجم خمیر مواد سیمانی افزایش پیدا می‌کند که انتظار می‌رود با کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها مصرف فوق روان‌کننده کاهش پیدا کند. به نظر می‌رسد این موضوع هم در جهت بی اثر کردن تاثیر سطح مخصوص بیشتر پودر شیشه نسبت به سیمان عمل کرده باشد.

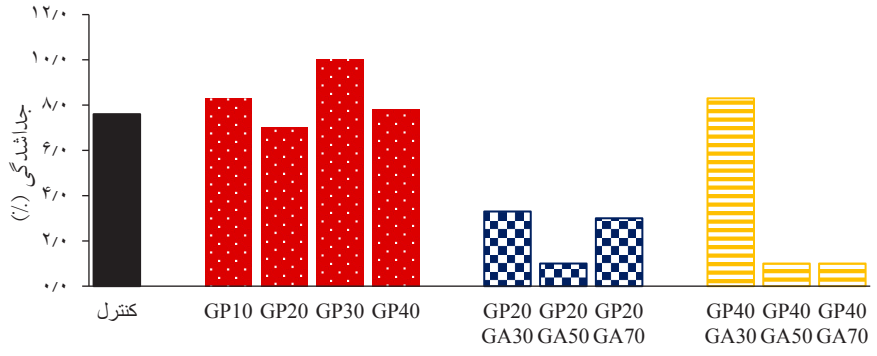


شکل ۳- مصرف فوق روان‌کننده در بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه

نتایج بررسی پایداری چشمی بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با استفاده از پودر شیشه از ۱۰ تا ۴۰ درصد به عنوان جایگزین سیمان در بتن‌های خودتراکم هیچ‌گونه مشکلی در خصوص آب انداختگی و جداشدگی به وجود نیامده است و تمامی بتن‌ها شاخص پایداری چشمی برابر با ۰ (کاملاً پایدار) داشتند. این موضوع برخلاف رفتاری است که در خصوص استفاده از خرده شیشه‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه در بتن مشاهده می‌شود [۲۳]. پایداری بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه مربوط به سطح مخصوص بیشتر پودر شیشه نسبت به سیمان است که علی رغم جذب آب کم این ماده سبب افزایش لزجت و کاهش جداشدگی و آب انداختگی در بتن می‌شود. همچنین از آنجا که وزن مخصوص پودر شیشه کمتر از سیمان است با جایگزینی وزنی آن حجم خمیر بتن افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند سبب پایداری کلی بتن خودتراکم شود.

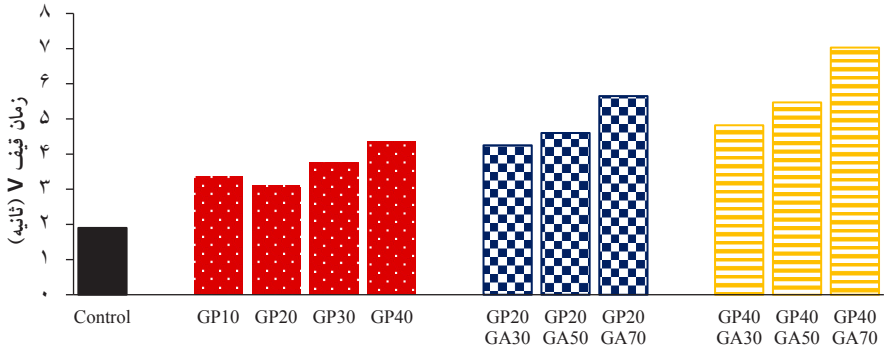
شکل ۴- بررسی چشمی پایداری جریان (VSI) در بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه

نتایج آزمایش پایداری شبکه الک در خصوص بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار جداشدگی مخلوط کنترل ۷/۶ به دست آمد و با جایگزینی ۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی از سیمان با پودر شیشه، اعداد به دست آمده از الک جداشدگی ۷/۰ تا ۱۰/۰ درصد به دست آمد نسبت به نتیجه مخلوط کنترل تفاوت زیادی ندارد. از طرفی مشاهده می‌شود که با افزایش جایگزینی خرده شیشه‌های ضایعاتی از ۳۰ به ۷۰ درصد در بتن‌های خودتراکم حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد پودر شیشه، اعداد به دست آمده از آزمایش الک جداشدگی کاهش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش لزجت بتن با توجه به تیزگوشگی بیشتر خرده شیشه‌های ضایعاتی نسبت به ماسه طبیعی باشد.



شکل ۵- نتایج آزمایش الک جداشدگی برای مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پودر شیشه

نتایج به دست آمده در خصوص آزمایش قیف V در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش استفاده از پودر شیشه، لزجت و یا اعدادی که از آزمایش قیف V به دست آمده است به شدت بیشتر شده است، به گونه‌ای که جایگزینی ۴۰ درصد از سیمان با پودر شیشه زمان قیف V را بیش از دو برابر کرده است. این موضوع به دلیل سطح مخصوص بیشتر پودر شیشه نسبت به سیمان و همچنین افزایش حجم خمیر بتن خودتراکم به دلیل وزن مخصوص کمتر پودر شیشه است. مشاهده می‌شود که با افزایش جایگزینی خرده شیشه‌ی ضایعاتی در بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه نیز، زمان قیف V به شدت افزایش پیدا کرده است به گونه‌ای که با مقایسه طرح کنترل و مخلوط جایگزینی ۴۰ درصد از سیمان با پودر شیشه و ۷۰ درصد از ماسه با خرده شیشه (GP40 GA70) زمان قیف V بیش از سه برابر شده است. این موضوع به دلیل تاثیر تیزگوشگی خرده شیشه‌ها و سطح مخصوص زیاد پودر شیشه است که به صورت همزمان سبب افزایش زمان قیف V و یا لزجت بتن شده‌اند.



شکل ۶- نتایج آزمایش قیف V برای مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پودر شیشه

به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که پودر شیشه می‌تواند به نوعی به عنوان یک ماده جایگزین سیمان سبب بهبود خصوصیات بتن تازه خودتراکم حاوی خرده شیشه‌های ضایعاتی شود و استفاده همزمان از این دوماده در بتن نتایج مطلوب تری را به همراه داشته است. با جایگزینی همزمان ۴۰ درصد یا ۱۸۰ کیلوگرم در مترکعب از سیمان با پودر شیشه و ۷۰ درصد یا ۵۴۰ کیلوگرم در مترکعب از ماسه طبیعی با خرده شیشه‌های ضایعاتی حدود یک سوم از بتن با شیشه جایگزین شده است که این موضوع می‌تواند از دیدگاه محیط زیستی بسیار حائز اهمیت باشد.

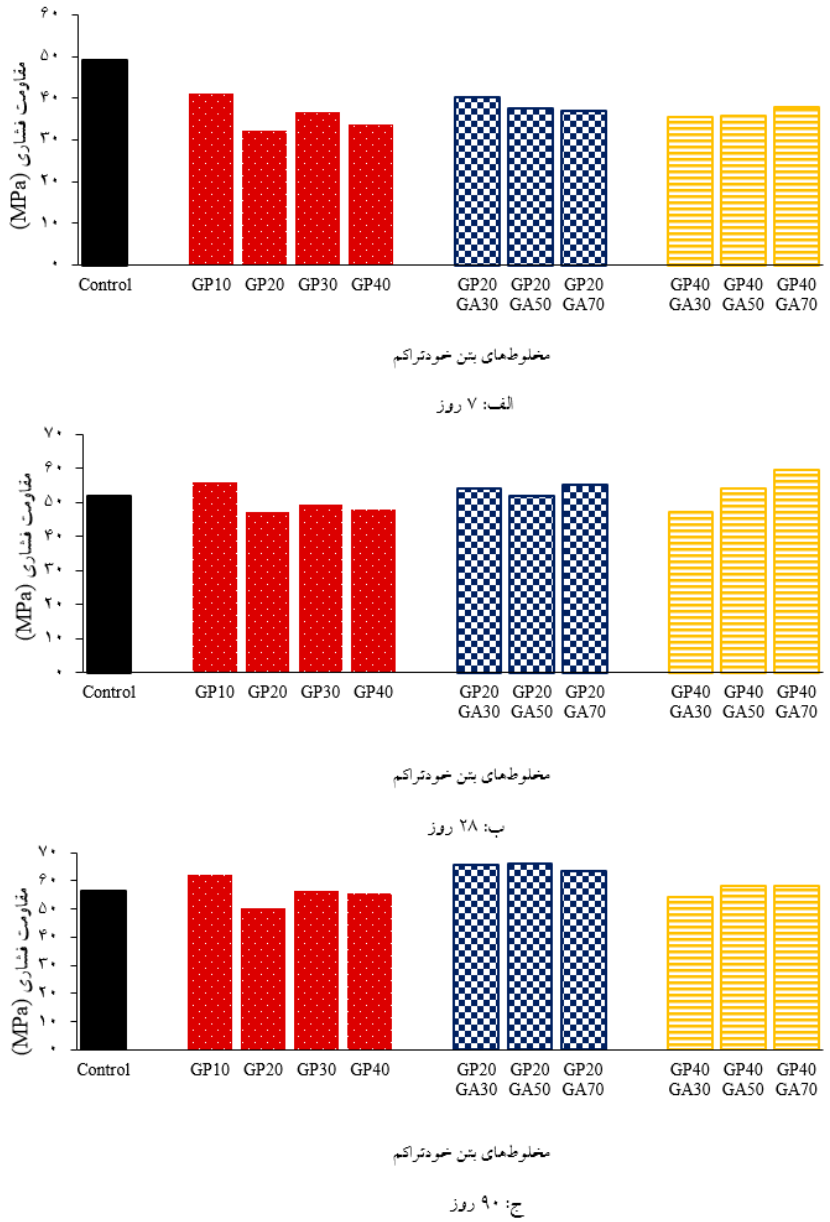
۴. نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در سن ۷ روز، با افزایش جایگزینی سیمان با پودر شیشه، مقاومت فشاری بتن به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است به گونه‌ای که جایگزینی ۴۰ درصد از سیمان با پودر شیشه مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی بتن را حدود ۴۵ درصد کاهش داده است. این موضوع به دلیل آن است که پودر شیشه به عنوان یک ماده‌ی جایگزین سیمان تا سن ۷ روز هنوز واکنش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نداده است و به دلیل کاهش سیمان در بتن، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است. این موضوع در خصوص بتن‌های خودتراکمی که به صورت همزمان حاوی پودر شیشه و خرده شیشه‌های ضایعتی بودند نیز دیده می‌شود.

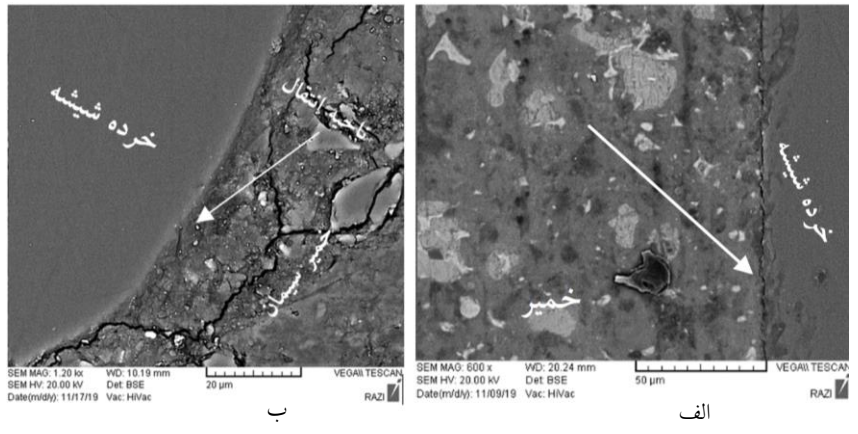
همانطور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، در سن ۲۸ روز، کاهش مقاومت فشاری بتن به دلیل جایگزینی سیمان با پودر شیشه جبران شده است و حتی جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان با پودر شیشه سبب اندکی افزایش در مقاومت فشاری بتن شده است. این موضوع به دلیل گسترش واکنش پوزولانی پودر شیشه می‌باشد که با بهبود و تراکم بیشتر ریزساختار بتن همراه است.

ملاحظه می‌شود که بعد از سن ۹۰ روز، بیشترین افزایش مقاومت فشاری بتن با جایگزنی ۲۰ درصد از سیمان و استفاده از خرده شیشه‌های ضایعاتی به عنوان جایگزن ماسه از ۳۰ تا ۷۰درصد (مخلوط‌های GP20 GA30، GP20 GA50 و GP20 GA70) دیده می‌شود. خرده شیشه‌ها دارای تیزگوشگی بیشتری نسبت به ماسه طبیعی می‌باشند اما ناحیه انتقال ضعیف‌تری دارند و در کل این موضوع می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری بتن شود. اما با توجه به آنکه در این طرح مخلوط‌ها از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده بود، شکل گیری واکنش پوزولانی پودر شیشه می‌تواند ضعف در ناحیه انتقال خرده شیشه راکاهش دهد و در نتیجه سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شود.

به منظور اثبات این موضوع نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی در خصوص بررسی ناحیه انتقال خرده شیشه و سیمان با وجود پودر شیشه در بتن در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸-الف نشان داده شد، ناحیه انتقال خرده شیشه و سیمان کمی ضعیف است اما با توجه به شکل ۸-ب که ناحیه انتقال خرده شیشه و سیمان در حضور پودر شیشه را نشان می‌دهد، این ناحیه دارای تراکمی بیشتری است و مشخص است که واکنش پوزولانی پودر شیشه سبب بهبود ناحیه انتقال و چسبندگی سیمان به خرده شیشه‌ها شده است.

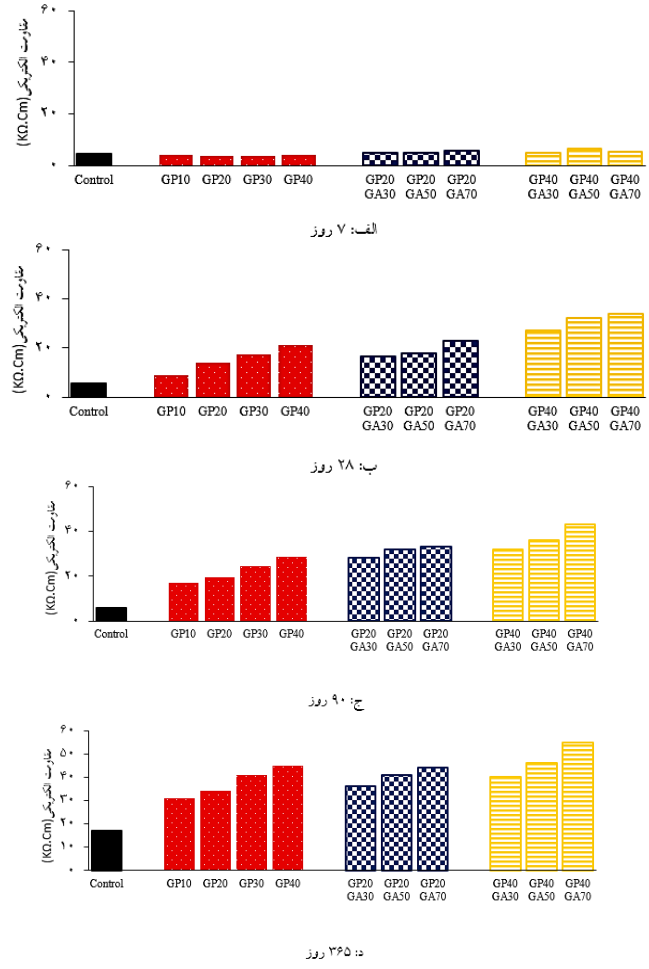


شکل ۷- نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه در سنین ۷، ۲۸ و۹۰ روز



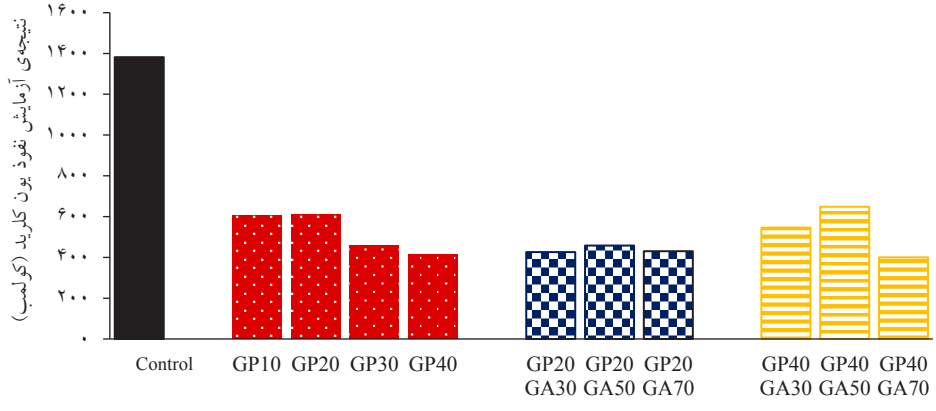
شکل ۸- عکس ناحیه انتقال خرده شیشه و خمیر سیمان. الف- بدون پودر شیشه، ب- با وجود پودر شیشه

نتـایج آزمـایش مقاومـت الکتریکـی بتن‌هـای حـاوی پـودر شیشـه در سـنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز در شـکل ۹ نشـان داده شـده اسـت. ملاحظـه می‌شـود کـه در سـن ۷ روز، بـا افـزایش پـودر شیشـه در بـتن، تغییـر چنـدانی در خصـوص مقاومـت الکتریکی در مقایسـه بـا طـرح کنتـرل دیـده نمی‌شـود. همچنـین اسـتفاده همزمـان از پـودر شیشـه و خـرده شیشـه در بـتن نیـز تفـاوتی چنـدانی در مقاومـت الکتریکـی بـتن نداشـته اسـت (کمتـر از ۲ کیلـو اهـم سـانتی‌متر) . طبـق شـکل ۹-ب، در سـن ۲۸ روز، بـا افـزایش جـایگزینی سـیمان بـا پـودر شیشـه از ۱۰ تـا ۴۰ درصـد (GP10، GP20، GP30 و GP40)، مقاومت الکتریکی نسبت بـه طـرح کنتـرل افـزایش پیـدا کـرده اسـت. ایـن موضـوع بـه دلیـل شـکل‌گیـری واکـنش پـوزولانی پودر شیشه در بـتن می‌باشـد کـه بـا افـزایش تـراکم و کـاهش یون‌هـای بـتن، مقاومـت الکتریکـی افـزایش پیـدا کـرده اسـت. همچنـین مشـاهده می‌شـود کـه بـا اسـتفاده همزمـان از ۲۰ و ۴۰ درصـد پـودر شیشـه و ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصـد خـرده شیشـه، مقاومـت الکتریکـی بـتن افـزایش بیشـتری داشـته اسـت. همـانطور کـه در خصـوص افـزایش مقاومـت فشـاری بتن‌هـای خـودتراکم حـاوی خـرده شیشـه و پـودر شیشـه در سـن ۲۸ روز مشـاهده شـد، افـزایش مقاومـت الکتریکـی ایـن بتن‌ها در این سن می‌تواند به دلیل بهبود ناحیـه انتقـال خـرده شیشـه و سـیمان توسـط پـودر شیشـه بـه دسـت آمـده باشـد (شکل ۸). این رونـد بـا شـدت بیشـتری در بتن‌هـای حـاوی پـودر شیشـه بعـد از سـن ۲۸ روز و تـا سـن ۳۶۵ روز نیـز دیـده می‌شود که نشان از فعالیت پوزولانی شیشه و در نتیجه بهبود ریزساختار بتن می‌باشد.



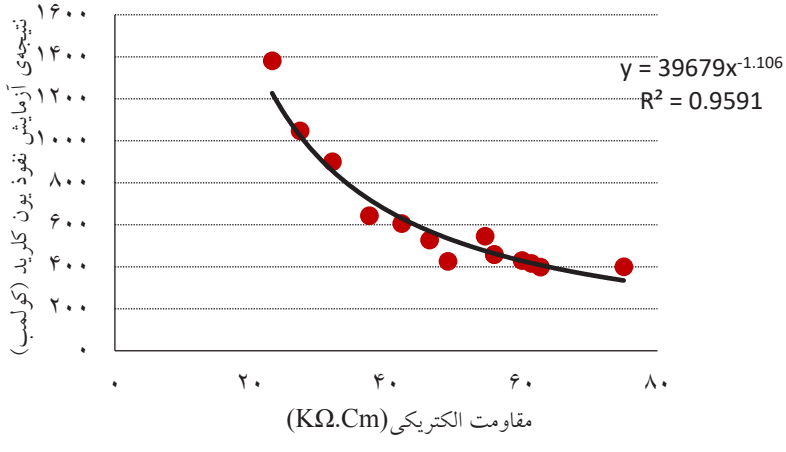
شکل ۹- مقاومت الکتریکی بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه

شکل ۱۰ نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید را در سن ۳۶۵ روز نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، با جایگزینی ۱۰ تا ۴۰ درصد از وزن سیمان با پودر شیشه، مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید به شدت افزایش و شار عبوری کاهش پیدا کرده است. این موضوع به دلیل واکنش پوزولانی پودر شیشه می‌باشد که با تراکم بیشتر بتن سبب افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید شده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که با جایگزینی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد خرده شیشه‌ی ضایعاتی در بتن‌های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد پودر شیشه تغییر چندانی در مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید ایجاد نشده‌است و میزان شار عبوری در حدود زمانی است که ۲۰ و ۴۰ درصد پودر شیشه به صورت تنها و بدون استفاده از خرده شیشه در بتن استفاده شده بود (مخلوط‌های GP20 و GP40). این موضوع می‌تواند به دلیل آن باشد که نفوذ یون کلرید در بتن بستگی به ناحیه خمیر بتن (مواد سیمانی سخت شده) دارد و جایگزینی و یا ایجاد تغییر در سنگدانه‌های بتن نمی‌تواند تاثیری در خصوص نفوذ یون کلرید داشته باشد. به عنوان مثال، نفوذ یون کلرید در بتن حاوی ۴۰ درصد پودر شیشه (GP40) و ۴۰ درصد پودر شیشه و ۷۰ درصد خرده شیشه (GP40 GA70) تقریبا برابر است زیرا مقدار و ساختار خمیر آن دو تفاوتی ندارد و فقط ۷۰ درصد حجمی از ماسه طبیعی کوچکتر از ۲/۳۶ میلیمتر در آن با خرده شیشه‌های ضایعاتی جایگزین شده است.



شکل ۱۰- نتایج آزمایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید در سن ۳۶۵

شکل ۱۱رابطه‌ی بین نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و آزمایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در سن ۳۶۵ روز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب R^2 برای این رابطه برابر با ۰/۹۳ می‌باشد که نشان از همبستگی بالای این دو آزمایش است. مشاهده می‌شود که هرچه مقاومت الکتریکی افزایش پیدا می‌کند، به دلیل تراکم بیشتر بتن‌های حاوی پودر شیشه شار عبوری در آزمایش نفوذ یون کلرید کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۱- رابطه‌ی بین نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و آزمایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید

۵. نتیجه‌گیری

۱. با جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد از سیمان بتن‌های خودتراکم با پودر شیشه مشاهده شد که هیچ گونه مشکلی در خصوص آب انداختگی و جداشدگی در بتن‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه وجود ندارد. همچنین با جایگزینی بخشی از سیمان با پودر شیشه، مصرف فوق روان‌کننده برای رسیدن به روانی هدف تقریبا ثابت باقی ماند.

۲. از آنجا که سطح مخصوص ذرات پودر شیشه بیشتر از سیمان است، با جایگزینی بخشی از سیمان با پودر شیشه لزجت بتن‌های خودتراکم افزایش پیدا کرد. همچنین وزن مخصوص کمتر پودر شیشه نسبت به سیمان می‌تواند یکی از عوامل افزایش لزجت باشد که به دلیل جایگزینی وزنی سبب افزایش حجم خمیر بتن خودتراکم شده است.

۳. با جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد از سیمان طرح مخلوط با پودر شیشه مشاهده شد که درسنین ۲۸ روز و بالاتر، تغییر چندانی در مقاومت فشاری بتن دیده نمی‌شود و حتی در ۹۰ روز با جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان با پودر شیشه کمی افزایش مقاومت مشاهده شد. این موضوع به دلیل واکنش پوزولانی پودر شیشه است که با بهبود ریزساختار بتن سبب عملکرد بهتر بتن در فرایند آزمایش مقاومت فشاری می‌شود.

۴. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بتن حاوی پودر شیشه تا سن ۳۶۵ روز نشان می‌دهد که به دلیل شکل گیری واکنش پوزولانی این ماده در بلندمدت، اعداد به دست آمده از این آزمایش بعد از سن ۲۸ روز به شدت بیشتر از طرح مخلوط کنترل می‌باشد. این موضوع به دلیل کاهش یون‌ها و متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن با شکل گیری واکنش پوزولانی پودر شیشه است. افزایش مقاومت الکتریکی می‌تواند به بهبود خصوصیات دوام بتن کمک کند.

۵. مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در بتن‌های حاوی پودر شیشه به مراتب بیشتر از طرح مخلوط کنترل است. این موضوع به دلیل متراکم‌تر بودن ریزساختار بتن‌های حاوی پودر شیشه است که با شکل‌گیری واکنش پوزولانی پودر شیشه به دست آمده است. همچنین رابطه‌ی به دست آمده در خصوص نتایج آزمایش نفوذ یون کلرید و مقاومت الکتریکی نشان از یک همبستگی خوب بین این نتایج دو آزمایش است.

۶. مشاهده شد که استفاده همزمان از پودر شیشه و خرده شیشه در بتن افزایش بیش از اندازه‌ی فوق روان‌کننده را به دلیل تیزگوشگی خرده شیشه‌ها کاهش داد و همچنین این بتن‌ها دارای پایداری قابل قبولی بودند. همچنین نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که ناحیه انتقال خرده شیشه و سیمان زمانی که از پودر شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است به مراتب تراکم و پیوستگی بیشتری دارد و این موضوع سبب افزایش مقاومت فشاری و الکتریکی شده است.

۷. در این تحقیق با استفاده‌ی همزمان از پودر شیشه و خرده شیشه‌های ضایعاتی در بتن‌های خودتراکم، بخش قابل توجهی از اجزاء بتن با مواد دورریز جایگزین شد. با جایگزینی همزمان ۴۰ درصد یا ۱۸۰ کیلوگرم در مترمکعب از سیمان با پودر شیشه و ۷۰ درصد یا ۵۴۰ کیلوگرم در مترمکعب از ماسه طبیعی با اندازه کوچکتر از ۲/۳۶ میلی‌متر با خرده شیشه‌های ضایعاتی، در مجموع حدود یک سوم از حجم بتن با مواد ضایعاتی جایگزین شده است بدون آنکه مشکلی در خصوصیات بتن تازه و بتن سخت شده ایجاد شده باشد. لذا استفاده همزمان از پودر شیشه و خرده شیشه می‌تواند توجیه اقتصادی و محیط زیستی داشته باشد.

۷. تشکر و قدردانی

تمامی آزمایش‌ها در این پژوهش در آزمایشگاه بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شده است، لذا نویسندگان این مقاله کمال قدردانی و تشکر را نسبت به حمایت‌های مادی و معنوی این مرکز دارند.

۸. مراجع

[1] Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T.H., Kurmus, H., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review, Construction and Building Materials., 156, 443–467.

[2] Afshinnia, K., and Rangaraju, P.R. (2016). "Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete." Construction and Building Materials., 117, 263–272.

[3] Maraghechi, H., Shafaatian, S. M. H., Fischer, G., Rajabipour, F. (2012). "The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates." Cement and Concrete Research., 34, (1) 41–47.

[4] Khalooee, S., Ahmadi, B., Askarinejad, A., Nekooei, M. (2021). Tackling the issues of self-compacting concrete containing high volume of waste glass aggregate by zeolite. Structural Concrete., 22(S1), E207-E227.

[5] Ruth, M., Dell'Anno, P. (1997). An industrial ecology of the US glass industry, Resources Policy, vol. 23(3), 109–124.

[6] United State Environmental Protection Agency report, 2012.

[۷] بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از ضایعات شیشه در بتن. گزارش تحقیقاتی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهر سازی، گ-۹۸۴، ۱۴۰۰.

[8] Guo, S., Dai, Q., Sun, X., Xiao, X., Si, R., Wang, J. (2018). "Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials." Journal of Cleaner Production., 172, 3621–3633.

[9] Du, H., Tan, K.H. Use of waste glass as sand in mortar. (2013). "Part II. Alkali–silica reaction and mitigation methods." Cement and Concrete Composites., 35, 118–126.

[10] Lee, G., Ling, T.C., Wong, Y.L., Poon, C.S. (2011). "Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks." Construction and Building Materials., 25, 2611–2618.

[11] Kamali, M. Ghahremaninezhad, A. (2016). "An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders." Construction and Building Materials 112 915–924.

[12] Lu, J.X. Hua, D.Z. Poon, C.S. (2017). "Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet." Constr. Build. Mater. 131 793–799.

[13] Schwarz, N. Cam, H. Neithalath, N. (2008). "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash." Cement & Concrete Composites 30 486–496

[14] Taha, B. Nounu, G. (2008) "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement." Construction and Building Materials 22 713–720.

[15] Shayan,A. Xu, A. (2006). "Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs." Cement and Concrete Research 36 457–468

[16] Tariq, S.A. Scott, A.N. and Mackechnie, J.R. (2016). "Controlling Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Waste Glass Powder and its Influence on Strength and Permeability" Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.

[17] Kamali, M. Ghahremaninezhad, A. (2015). "Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials." Construction and Building Materials 98 407–416

[18] Omran, A.F. Morin, Et.D. Harbec, D. Tagnit-Hamou, A. (2017). "Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications" Construction and Building Materials 135 43–58.

[19] Mirzahosseini, M. Riding, K.A. (2014). "Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder." Cement and Concrete Research 58 103–111.

[20] Kamali, M. Ghahremaninezhad, A. (2016). "An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders." Construction and Building Materials 112 915–924.

[21] Zheng, K. (2016). "Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkaliesilica reaction." Cement and Concrete Composites 67 30e38.

[22] Matos, A.M. Sousa-Coutinho, J. (2012). "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement." Construction and Building Materials 36 205–215.

[23] Maraghechi, H. Salwocki, S. Rajabipour, F. (2017). "Utilisation of alkali activated glass powder in binary mixtures with Portland cement, slag, fly ash and hydrated lime." Materials and Structures 50:16.

[24] Kamali, M. Ghahremaninezhad, A. (2017). "An investigation into the influence of superabsorbent polymers on the properties of glass powder modified cement pastes." Construction and Building Materials 149 236–247.

[25] Bazhuni, M.F. Kamali, M. Ghahremaninezhad, A. (2018). "An investigation into the properties of ternary and binary cement pastes containing glass powder." Front. Struct. Civ. Eng. https://doi.org/10.1007/s11709-018-0511-5

[26] Liu, M. (2011). "Incorporating ground glass in self-compacting concrete." Construction and Building Materials., 25, 919–925.

[27] Ling, T.C., Poon, C.S., Kou, S.C. (2012). "Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures." Cement and Concrete Composites., 34, 265–272.

[28] Rajabipour, F., Maraghechi, H., Fischer, G. (2010). "investigating the alkali silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials." J. Mater. Civ. Eng., 22 (12), 1201–8.

[29] Mirzahosseini, M. Riding, K.A. (2014). "Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder." Cement and Concrete Research 58 103–111.

[30] Singh, H., Siddique.R (2022). "Utilization of crushed recycled glass and metakaolin for development of self-compacting concrete." Construction and Building Materials., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128659

[31] Liua, Z., Shi, C., Shi, Q., Xiao, T., Meng, W (2022). "Recycling waste glass aggregate in concrete: Mitigation of alkali-silica reaction (ASR) by carbonation curing." Journal of Cleaner Production., https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133545