

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دمای زیاد بر سرعت عبور امواج اولتراسونیک (UPV) در بتن سرباره قلیافعال مصرفی در روسازی

محمدحسین منصورقناعتی، دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد

اسلامی، واحد چالوس

مرتضی بیک لریان*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

علیرضا مردوخ پور، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان

Email: M.biklaryan@iauc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، سرعت عبور امواج اولتراسونیک (UPV) در بتن سرباره قلیافعال سرباره‌ای مصرفی در روسازی، تحت حرارت زیاد در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه بررسی شده است. در ادامه، با انجام آزمون تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در بتن، به آنالیز و بررسی هم‌پوشانی نتایج پرداخته شد. در این راستا، یک طرح اختلاط از بتن کنترل و سه طرح اختلاط از بتن سرباره قلیافعال سرباره‌ای حاوی صفر، ۴ و ۸ درصد نانوسیلیس ساخته شد. سپس، طرح بهینه حاصل از نتایج آزمون‌ها، از بین سه طرح بتن سرباره قلیافعال انتخاب گردید و به میزان ۱ و ۲ درصد الیاف پلی‌الفین به آن اضافه گردید و دو طرح دیگر از بتن سرباره قلیافعال ساخته شد. نمونه‌های جدید تحت دمای اتاق و حرارت زیاد مورد آزمون UPV و SEM و آنالیز قرار گرفتند. نتایج حاصله حاکی از بهبود ۱۱ درصدی (طرح ۳ نسبت به طرح ۲) سرعت عبور امواج اولتراسونیک با افزودن نانوسیلیس به بتن سرباره قلیافعال در دمای اتاق بود. اما حضور الیاف پلی‌الفین موجب افت UPV به میزان ۱۲ درصد (طرح ۶ نسبت به طرح ۳) گردید. اعمال حرارت زیاد در بتن، اثرات مضر در نتایج آزمون UPV و SEM به همراه داشت، به طوری که کمترین و بیشترین میزان افت (۳۷ و ۴۶ درصد) در سرعت عبور امواج اولتراسونیک در نمونه‌های بتنی به ترتیب متعلق به طرح ۱ (حاوی بتن معمولی) و طرح ۲ (بتن سرباره قلیافعال فاقد نانوسیلیس) بود. بررسی‌های ریزساختاری از SEM، نشان از هماهنگی و هم‌پوشانی نتایج حاصل از این پژوهش داشت.

واژه‌های کلیدی: بتن سرباره قلیافعال، نانوسیلیس، UPV، SEM، دمای زیاد

۱. مقدمه

بتن سرباره قلیافعال در راستای کاهش مضرات ناشی از بتن معمولی در ابتدا توسط محقق فرانسوی بنام ژوزف داویدویتس^۱ مطرح شد (داویدویتس، ۲۰۰۸). میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرایند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرایند تولید سیمان است (نوپن و همکاران، ۲۰۱۸). تولید بتن سرباره قلیافعال توسط روش‌های متداول تکنولوژی بتن انجام می‌گیرد (وُرا و آرمیل، ۲۰۱۳). در فرایند تولید بتن سرباره قلیافعال سیمان مصرف نمی‌گردد و بجای آن از مواد قلیایی بر پایه عناصر آلومینوسیلیکاتی و محلول‌های قلیایی (به منظور واکنش‌پذیری) استفاده می‌گردد. از مواد قلیایی می‌توان به سرباره کوره آهن-گدازی و نانوسیلیس و از محلول قلیایی می‌توان به هیدرواکسید سدیم و سیلیکات سدیم اشاره کرد.

در سال‌های اخیر، کاربرد نانوذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم‌انداز گسترده‌ای در برابر علم تکنولوژی بتن ایجاد کرده است (اسکریونر و جیمز، ۲۰۰۸). نانوذرات، به علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه زیاد آنها، خصوصیات ویژه‌ای را در طرح اختلاط بتن از خود نشان داده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۰۴). نانوذرات سیلیس، ضمن تسریع در فرایند ژئوپلیمریزاسیون (ژئوسپارش)، مشارکت بیشتری (نسبت به سایر پوزولان‌ها) در فرایند واکنش شیمیایی دارند که منتج به تولید حجم زیادی از ژل‌های هیدراته شده می‌گردد. این ژل‌ها با پر کردن حفرات، منافذ و تقویت پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در حد فاصل سنگدانه‌ها (و الیاف) نقش مهمی در افزایش استحکام بتن ایفا می‌نمایند. از طرفی، حضور نانوسیلیس با نقش چسبندگی و پُرکنندگی موجب تقویت استحکام در فضاهای مویینه بین‌لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته شده می‌گردد.

به‌کارگیری الیاف در ترکیب بتن سرباره قلیافعال نقش مهمی در کاهش ترک‌خوردگی بتن در مواجهه با نیرو

ساخت، نگهداری و ترمیم روسازی‌ها، اعتبار مالی هنگفتی را به خود اختصاص داده و معمولاً هزینه‌های نگهداری ثانویه به مراتب بیشتر می‌باشد (چوبدار و همکاران، ۲۰۲۱). لذا بهبود کیفیت روسازی راه‌ها به منظور افزایش طول عمر مفید آنها بسیار مهم است. از طرفی، با توجه به اینکه ترانزیت یکی از پرسودترین تجارت‌ها به شمار می‌رود و کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی بسیار مناسب، مزایای ترانزیتی قابل توجهی را به ارمغان می‌آورد (بازدار اردبیلی و همکاران، ۲۰۲۱) توسعه راه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توسعه بخش‌های پیش رو یکی از عوامل تأثیرگذار بر اقتصاد کشور است (پرور و همکاران، ۲۰۲۱).

عملکرد بتن سیمانی در روسازی راه‌ها با توجه به شرایط محیطی و عوامل شیمیایی خورنده بسیار نامطلوب است. از طرفی، تولید بتن حاوی سیمان پرتلند، به دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گاز سمی دی اکسید کربن (CO_2) در جو همواره با دغدغه‌های فراوان همراه بوده است. تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانجات تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی اکسید کربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸). از طرفی، مصرف فراوان سوخت‌های فسیلی در فرایند تولید سیمان از چالش‌های دیگر در ساخت و مصرف بتن‌های سیمانی می‌باشد. از این رو، محققین به فکر تولید ماده جایگزین سیمان در بتن افتادند. ژئوپلیمرها حاوی مواد قلیافعال فراوان از نوع آلومینوسیلیکاتی هستند که در مجاورت و ترکیب شیمیایی با محلول‌های قلیایی تشکیل ژل‌های هیدراته داده و نقش اصلی را در استحکام، چسبندگی و پیوند در اجزای تشکیل‌دهنده بتن ایفا می‌نمایند.

^۱- Joseph Davidovits

سلسبوس در بتن می‌تواند موجب تغییرات کریستالی، تخریب ریزساختار ژل‌های هیدراته و تشکیل کانی‌های کربناتی در ماتریس بتن گردد (امیری و آریانپور، ۲۰۱۹؛ بریندلی، ۱۹۷۵؛ پروویس و ون دوتتر، ۲۰۰۹). این تغییرات می‌تواند عملکرد بتن را در برابر بارهای وارده به مخاطره بیاندازد. از طرفی، گرما موجب تبخیر آب و خروج برخی عناصر از ترکیب بتن می‌گردد و این موضوع می‌تواند ضمن بروز ترک و ریزترک فراوان در بتن، نقش مهمی را در کاهش سرعت عبور امواج اولتراسونیک ایفا نماید.

در این تحقیق آزمایشگاهی، تولید بتن سرباره قلیافعال جهت مصارف روسازی در حمل و نقل، به واسطه کاهش گاز CO_2 و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، به‌عنوان شاخصه‌های حافظ محیط‌زیست شناخته می‌شود. از طرفی، با توجه به استحکام زیاد این نوع بتن در مجاورت حرارت زیاد، در مقایسه با بتن معمولی، این مزیت به‌عنوان طرحی نوآورانه در این پژوهش معرفی می‌گردد. همچنین، حضور الیاف در بتن روسازی راه‌ها می‌تواند با بهبود مقاومت در برابر بارهای سنگین، به افزایش طول عمر مفید روسازی کمک کند.

۲. ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهن‌گدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته ۱/۲ پاسکال، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت. از نانوسیلیس تولید شرکت اوونیک اینداستریز^۱ آلمان، با خلوص ۹۹/۸ درصد، وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ذرات ۷ الی ۱۴ نانومتر استفاده گردید. الیاف پلی‌الفین به‌صورت

ایجاد می‌کند. در این راستا، الیاف پلی‌الفین می‌تواند از طریق پیوند مناسب با خمیر سیمان هیدراته شده و اتصال صفحات ترک‌خورده، به بهبود استحکام بتن سرباره قلیافعال کمک نماید. تحقیقات نشان داده که اضافه نمودن الیاف پلی‌الفین به تیر بتنی، با افزایش مدول الاستیسیته، کمک شایانی به بهبود مقاومت بعد از ترک-خوردن می‌کند (چلاپاندیان و همکاران، ۲۰۲۰). آزمایش اولتراسونیک یا آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک، یکی از انواع آزمایش‌های غیرمخرب برای سنجش میزان همگنی و مقاومت بتن می‌باشد. این آزمایش نشان می‌دهد که آیا ناپیوستگی‌هایی مانند ترک در بتن وجود دارد یا خیر. در صورت وجود ناپیوستگی و ترک در بتن، به وسیله‌ی این آزمایش می‌توان عمق ترک‌های موجود را تخمین زد. افزودن نانوسیلیس به بتن می‌تواند به افزایش سرعت عبور امواج اولتراسونیک کمک نماید. بررسی‌های سایر محققین نشان از بهبود سرعت امواج اولتراسونیک با استفاده از نانوسیلیس در بتن سرباره قلیافعال دارد (اکینسی و همکاران، ۲۰۱۹). اما تأثیر کم الیاف بر سرعت عبور امواج در مطالعه سهاماران و همکاران (۲۰۰۵) گزارش شده است. آن‌ها تغییرات ناچیز در سرعت امواج را به عنوان نشانه‌ای از یکنواختی ماتریس بتن در تمامی مخلوط‌ها دانستند.

هنگامی که بتن در برابر آتش یا حرارت زیاد قرار می‌گیرد، ممکن است به دلیل کاهش مقاومت و سختی، ظرفیت باربری پس از آتش‌سوزی در بتن کاهش قابل توجهی یابد (کائتانو و همکاران، ۲۰۱۹). میزان خسارت ناشی از آتش ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده دارد (بختیاری و همکاران، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر، ژئوپلیمرها به دلیل پایداری شیمیایی، مقاومت زیاد در برابر حرارت و انقباض کم نسبت به سیمان پرتلند، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند (امیری و آریانپور، ۲۰۱۹). تحقیقات نشان داده که دمای بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه

^۱ - Evonik Industries

98-211.1-ACI، برای ساخت بتن سرباره قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. در این راستا، طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در این پژوهش براساس جدول ۱ تهیه و تنظیم گردید.

به منظور ساخت نمونه‌های بتنی، در ابتدا مصالح خشک به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شدند و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید، سپس، آب و محلول قلیایی به فراخور نیاز هر طرح به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح ۳ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن‌کاری شده در دو مرحله ریخته شد و در هر مرحله، بتن با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن‌ریزی در محیط خشک و دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند. نمونه‌های بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) تا زمان انجام آزمون در داخل آب شرب در دمای اتاق نگهداری گردید. اما نمونه‌های بتن سرباره قلیافعال پس از جداسازی از قالب، به منظور بهبود خواص استحکامی به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. گزارش شده است که مقاومت بتن سرباره قلیافعال با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد (احسانی و همکاران، ۲۰۱۷). در پایان زمان عمل‌آوری حرارتی بتن سرباره قلیافعال، نمونه‌های بتن تا هنگام آزمون در دمای اتاق در محیط خشک نگهداری و عمل‌آوری گردیدند.

قبل از انجام آزمون‌های حرارت زیاد (500°C) در سن ۹۰ روزه، براساس استاندارد ISO834 نمونه‌های بتنی به مدت یک ساعت در کوره تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس، نمونه‌ها به مدت یک ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تأثیر شوک دمایی قرار نگیرند، پس از خروج نمونه‌ها از کوره،

مواج تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M، محصول شرکت ایتالیایی دوروچم خاورمیانه^۱، دارای وزن مخصوص ۹۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با نسبت طول به عرض ۳۷/۵ میلی‌متر، مقاومت کششی ۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع و دمای ذوب ۴۵۰ درجه سلسیوس (در داخل بتن)، مورد مصرف قرار گرفت.

سیمان مصرفی از نوع پرتلند نوع II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 می‌باشد. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانجات شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده که در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار دارند. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن سرباره قلیافعال، ترکیبی از هیدرواکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نسبت سیلیکات به هیدرواکسید ۲/۵، غلظت مولاریته ۱۲ و وزن مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. ابرروان‌کننده مصرفی از نوع پلی‌کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 و وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C494 مورد استفاده قرار گرفت. آب مصرف شده به منظور ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیایی) از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد. این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۲-۲. طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزا برای طرح اختلاط بتن سرباره قلیافعال موجود نمی‌باشد. لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن سرباره قلیافعال (دب و همکاران، ۲۰۱۵)، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند.

جدول ۱. مشخصات نسبت‌های مخلوط

شرایط عمل‌آوری پس از قالب برداری	kg/m ³								نوع بتن	طرح	
	ابر روان کننده	ماسه	شن	الی اف	نانو سیلیسیس	سرباره	مخلو ن قلیایی	آب			سیمان
آب	۶۷۵	۷۶۱/۱۳	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۰/۵	۴۵۰	پرتلند	۱
								۲			
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۸ ساعته)	۶۷۵	۸۱۶/۱۰	۱۰۰	۰	۰	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	قلیافعال	۲
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۸ ساعته)	۷/۸	۷۶۷/۴۲	۱۰۰	۰	۱۸	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	قلیافعال	۳
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۸ ساعته)	۸/۳	۷۱۸/۷۵	۱۰۰	۰	۳۶	۴۱۴	۲۰۲/۵	۰	۰	قلیافعال	۴
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۸ ساعته)	۸/۶	۶۷۲/۷۸	۱۰۰	۹/۲	۳۶	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	قلیافعال	۵
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۸ ساعته)	۹	۶۴۶/۲۸	۱۰۰	۱۸/۴	۳۶	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	قلیافعال	۶

۲-۳. روش‌های آزمایش و استانداردها

آزمون سرعت عبور امواج اولتراسونیک تحت استاندارد ASTM C597 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر در دمای اتاق و تحت حرارت زیاد (۵۰۰°C) با دستگاه از نوع داندیت^۱ با فرکانس لرزشی ۵۵ kHz و دقت زمان فاصله حرکت امواج ۰/۱ درصد و ±۲٪، اندازه‌گیری شد. در این راستا، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، در نمونه‌ها ابعاد سطحی که در تماس با کف قالب قرار داشتند توسط کولیس اندازه‌گیری شد. سپس، اتصال آکوستیک^۲ مناسب بین سطح بتن (سطوح صاف

که در تماس با وجوه قالب بودند) و سطح مبدل برای حذف بسته‌های هوا از طریق وازلین در سطح نمونه‌ها حاصل گردید. پس از تعیین زمان عبور امواج از نمونه بتنی، با استفاده از روابط موجود در استاندارد ذکر شده، سرعت امواج اولتراسونیک بر حسب متر بر ثانیه به دست آمد.

آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت زیاد (۵۰۰°C)، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیک روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام پذیرفت، در این راستا، نمونه بتنی

^۲- Acoustic

^۱- DUNDIT MODEL PC1012

حرارت نسبت به نمونه‌های بتنی ۹۰ روزه دمای اتاق، متعلق به طرح ۲ و طرح ۱ است.

میزان تأثیرات خواص مواد پایه از قبیل نانوسیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و الیاف پلی‌الفین تشکیل‌دهنده بتن سرباره قلیافعال بر میزان سرعت کسب شده عبور امواج اولتراسونیک در نمونه‌های بتن سرباره قلیافعال تحت حرارت در شکل ۱ مشهود است. برای هر طرح بتن سرباره قلیافعال، سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن با افزایش میزان نانوسیلیس زیاد می‌شود.

در شکل ۲، تغییرات سرعت عبور امواج اولتراسونیک بر اساس استاندارد IS 13311-1 (۱۹۹۲) ارائه گردیده است. بر اساس نمودار این شکل، مشهود است که طرح ۱ با سرعت ۳۷۲۰ متر بر ثانیه، زیادترین میزان سرعت را پس از اعمال حرارت زیاد به خود اختصاص داده است و در محدوده سطح سرعت عالی^۱ با سرعت بیش از ۴۵۰۰ متر بر ثانیه قرار دارد. تحقیقات نشان داده است تا زمانی که مقدار سرعت امواج اولتراسونیک در دسته عالی قرار بگیرد به این معنی است که بتن مورد نظر دارای ترک‌ها و یا حفره‌های بزرگی که بر تمامیت ساختار نمونه تأثیرگذار باشد نیست (کوان و همکاران، ۲۰۱۲). طرح‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ پس از اعمال حرارت زیاد، در محدوده‌های نامناسب^۲، با سرعت کمتر از ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و طرح ۴ در مرز محدوده متوسط^۳ و نامناسب با سرعت بین ۳۰۰۰ متر بر ثانیه، قرار گرفته‌اند. در هر دو شکل ۱ و ۲، مقادیر سرعت عبور امواج اولتراسونیک برای بتن کنترل در طرح ۱ در دمای اتاق و پس از حرارت زیاد، فراتر از نتایج به‌دست آمده از طرح‌های بتن سرباره قلیافعال می‌باشد. این امر می‌تواند به دلایل متعدد از قبیل پیوند نامناسب الیاف با ملات سیمان و جنس پلاستیکی الیاف و ضعف آن در عبور دادن جریان امواج اولتراسونیک باشد. البته عمل‌آوری حرارتی (۶۰°C) در

خرد شده در دستگاه قرار گرفت و تصاویر با بزرگ‌نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

۳. نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱. نتایج آزمون سرعت عبور امواج

اولتراسونیک در بتن

نتایج حاصل از آزمون سرعت امواج اولتراسونیک در شکل ۱ به نمایش در آمده است. بر اساس این شکل، حداقل و حداکثر نتایج کسب شده به ترتیب متعلق به طرح ۲ و طرح ۱ به مقدار ۲۶۶۰ و ۳۷۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد. کاهش میزان سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن تحت حرارت برای طرح‌های ۱ الی ۶ به ترتیب ۳۷، ۴۶، ۴۳، ۴۴، ۴۱ و ۴۰ درصد می‌باشد. در این راستا، کمترین تغییرات (به‌عنوان بهترین طرح) متعلق به طرح ۱ حاوی بتن کنترل می‌باشد. این برتری، بیشتر به دلیل وجود ریزترک‌های ایجاد شده تحت عمل‌آوری حرارتی (۶۰ درجه سلسیوس) در نمونه‌های بتن سرباره قلیافعال می‌باشد. البته زیاد بودن عیار سیمان پرتلند در بتن کنترل نیز کمک شایانی در بهبود تراکم ساختار بتن نموده است. افزودن الیاف پلی‌الفین در طرح‌های اختلاط ۵ و ۶ در مقایسه با طرح ۴ (بتن سرباره قلیافعال فاقد الیاف)، موجب کاهش و افت در میزان سرعت عبور امواج اولتراسونیک نمونه در معرض حرارت زیاد (۵۰۰°C) گردیده است. حداکثر افزایش میزان سرعت عبور امواج اولتراسونیک (۱۴ درصد) در بتن‌های قلیافعال متعلق به طرح ۴ شامل ۸ درصد نانوسیلیس، نسبت به طرح ۲ بتن سرباره قلیافعال (بدون نانوسیلیس) است. حداکثر و حداقل میزان افت سرعت امواج اولتراسونیک (به ترتیب ۴۶ درصد و ۳۷ درصد) در نمونه بتن ۹۰ روزه پس از

³- Moderate

¹- Excellent

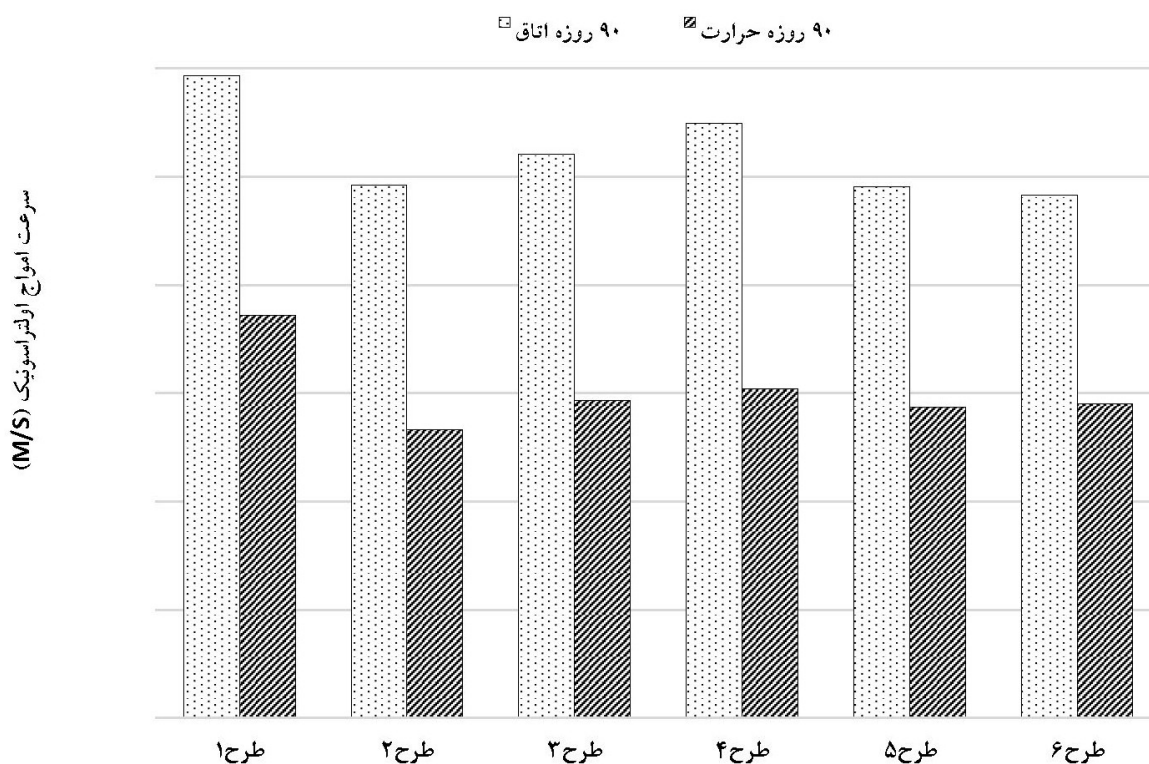
²- Doubtful

می‌گردد تا اندکی از سرعت‌های به دست آمده از مقادیر قابل پیش‌بینی کمتر باشد. البته در برخی از پوزولان‌ها، به دلیل پرکنندگی خوب منافذ، مقدار افت سرعت کمتر دیده می‌شود. وجود این ترک‌های بسیار ریز تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تأثیر می‌گذارد و تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نخواهد گذاشت (کوان و همکاران، ۲۰۱۲). شکل ۳، دستگاه و نمونه‌های بتنی در حال انجام آزمون UPV را نشان می‌دهد.

بتن سرباره قلیافعال موجب بروز ریزترک‌های متعدد در بتن می‌گردد که این موضوع می‌تواند در کاهش سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن مؤثر باشد.

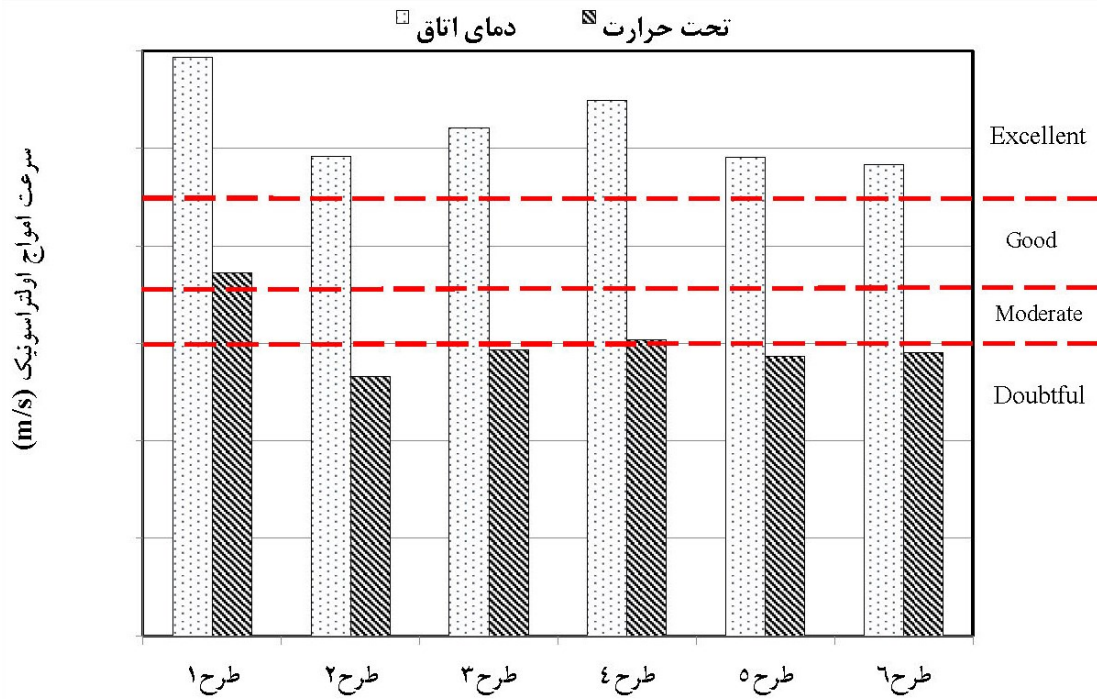
تحقیقات نشان داده که در بتن سرباره قلیافعال، به دلیل عمل‌آوری در محیط خشک آن، یک سری ترک‌های ریز در بتن تشکیل می‌شود که باعث می‌گردد بتن از یکپارچگی کامل که باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت زیادتر می‌باشد خارج شود و این امر موجب

۷



شکل ۱. نمودار نتایج آزمایش اولتراسونیک بتن در دمای اتاق و تحت حرارت زیاد

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دمای زیاد بر سرعت عبور امواج اولتراسونیک (UPV) در بتن سرباره قلیافعال مصرفی در روسازی



شکل ۲. نمودار تغییرات سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن تحت حرارت زیاد



شکل ۳. دستگاه UPV و نمونه‌های بتنی

۲-۳. نتایج آزمون SEM در بتن

نتایج حاصل از آزمون SEM در مقیاس ۲۰ میکرومتر با بزرگ‌نمایی ۴۰۰۰ برابر در دمای اتاق در شکل ۴ و تحت حرارت زیاد (۵۰۰°C) در شکل ۵ به نمایش درآمده است.

در تصاویر حاصل از دمای اتاق، مشاهده می‌گردد که طرح‌های ۲ الی ۶ شامل بتن سرباره قلیافعال با توجه به حضور سرباره و نانوسیلیس، در مقایسه با طرح ۱ شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، از تراکم و انسجام

۲- اثر پرکنندگی^۱ ذرات نانوسیلیس (بیگی و همکاران، ۲۰۱۳؛ دب و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از عمدترین دلایل کسب مقاومت فشاری بتن با حضور نانوسیلیس، نقش پرکنندگی ذرات نانو در بین منافذ خمیر سیمان است. در این حالت، ذرات نانوسیلیس تولید ژل هیدراته C-S-H می‌کنند. این ژل که حداکثر دارای قطر ۱۰ نانومتر است با پر کردن خلل و فرج موجود، باعث چسبندگی و یکپارچگی ماتریس خمیر سیمان می‌گردد و این امر موجب یکپارچگی و افزایش دوام بتن می‌شود.

۳- نقش یک هسته را ایفا می‌کند^۲ (بهادری و حسینی، ۲۰۱۲؛ بوسیلجکوف، ۲۰۰۳). در فرایند انحلال شیمیایی ذرات نانوسیلیس در هیدراتاسیون سیمان، ذرات نانوسیلیس هسته‌هایی برای توسعه محصولات هیدراتاسیون سیمان در محلول ایجاد می‌نمایند. این ذرات به مانند سنگدانه‌ها نقش استخوان را در برابر ژل سیمان ایجاد می‌کنند. اتصال این نمونه استخوان‌بندی با ژل سیمان، نقش عمده‌ای در مقاومت بتن ایفا می‌کند.

با توجه به اعمال دمای عمل‌آوری (60°C) در نمونه‌های بتن سرباره قلیافعال، بروز ریزترک‌ها در این نمونه‌ها مشهود است. این موضوع، سرعت کمتر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های بتن سرباره قلیافعال نسبت به نمونه بتن کنترل را تفسیر می‌کند. در شکل ۵، نمونه‌های تحت حرارت زیاد (500°C)، ساختار بتن برای تمامی طرح‌ها نسبت به تصاویر اخذ شده طرح‌های متناظر در دمای اتاق (با توجه به شکل ۴) تضعیف شده است. همچنین، تغییرات در ماتریس محصولات نهایی واکنش شیمیایی ذرات تشکیل‌دهنده بتن که ژل‌های هیدراته هستند با ظهور حفرات، منافذ و ترک‌ها مشهود است. بخش اعظم این تغییرات را می‌توان به از دست رفتن آب در ریزساختار بتن نسبت داد.

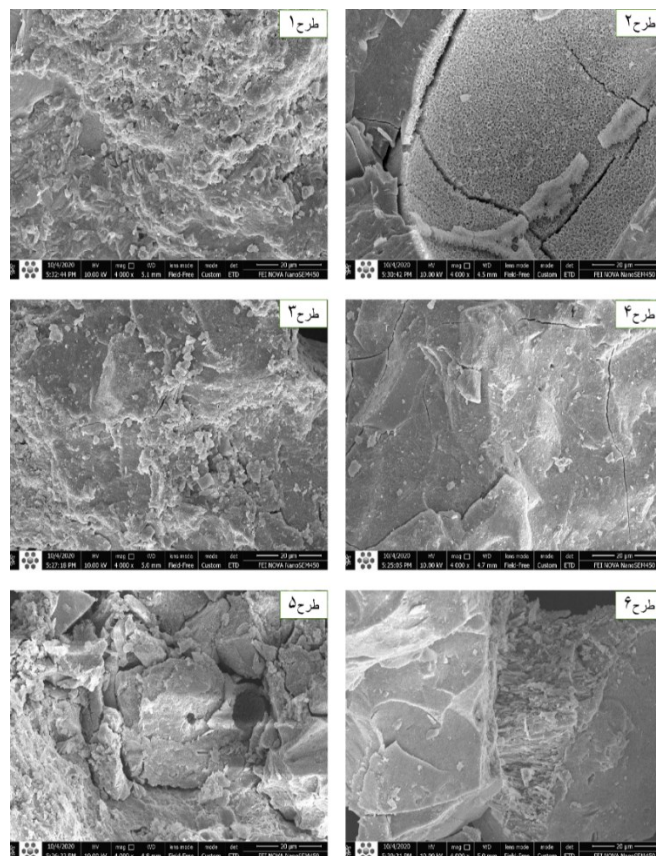
بیشتری در ریزساختار خود بهره می‌برند. این مطلب نشان از مشارکت بیشتر ذرات تشکیل‌دهنده بتن سرباره قلیافعال در فرایند ژئوپلیمریزاسیون در مقایسه با ذرات سیمان پرتلند در فرایند هیدراتاسیون دارد. برای بتن سرباره قلیافعال، با توجه به افزودن الیاف پلی‌الفین در طرح‌های ۵ و ۶، مشاهده می‌گردد که از حجم ترک‌ها کاسته شده و حضور الیاف منجر به تراکم بیشتر در ریزساختار بتن گردیده است. الیاف مانند پل در بین صفحات ترک‌خورده عمل می‌کند و در برابر بارهای وارده از خود مقاومت نشان می‌دهد. الیاف موجب کاهش توسعه ترک و حفظ موضعی کردن ناحیه ترک‌ها می‌گردد. با افزایش میزان نانوسیلیس در طرح‌های بتن سرباره قلیافعال، شاهد بهبود فرایند ژئوپلیمریزاسیون و افزایش حجم تولید ژل‌های هیدراته شده در نمونه بتنی می‌باشیم. اثر نانوسیلیس در بهبود مقاومت را می‌توان با مکانیزم چندمرحله‌ای زیر که زیرساخت‌های بتن را بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود، بیان نمود.

۱- افزایش واکنش پوزولانی (اسعدی و همکاران، ۲۰۱۹). حضور نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری واکنش پوزولانی را سرعت می‌بخشد، البته تأثیر پوزولانی نانوسیلیس بیش از نقش پرکنندگی آن است. این امر به دلیل فعالیت پوزولانی آن و واکنش ذرات نانو با محصولات هیدراتاسیون است. ذرات نانوسیلیس با درصد خلوص سیلیس آمورف بیش از ۹۹ درصد و سطح ویژه زیاد، با کریستال‌های شش‌وجهی هیدرواکسید کلسیم ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) حاصل از هیدراتاسیون واکنش نشان داده و تولید ژل C-S-H می‌کند. این ژل، با پر کردن فضاهای خالی، موجب افزایش چگالی ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) می‌شود. در نتیجه، موجب افزایش مقاومت و دوام بتن می‌گردد.

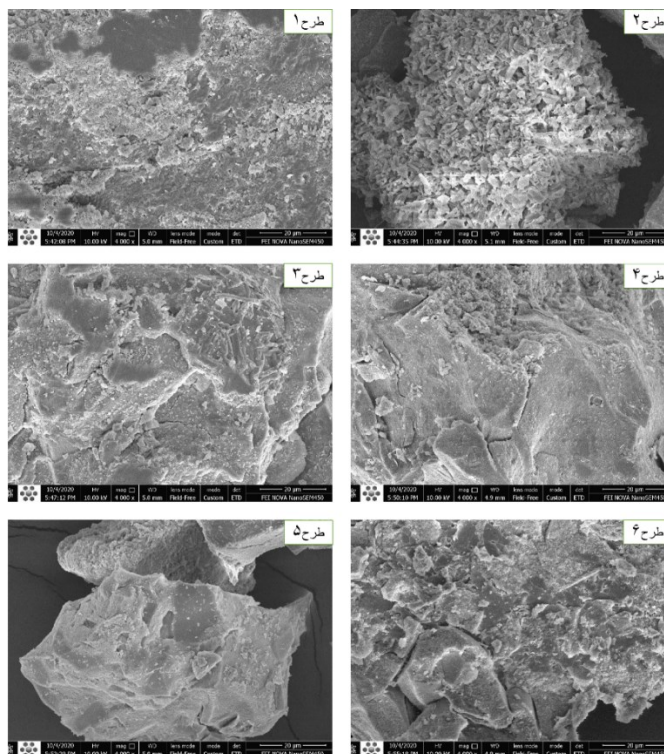
^۲- Acting as a nucleus

^۱- Filler effect

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دمای زیاد بر سرعت عبور امواج اولتراسونیک (UPV) در بتن سرباره قلیافعال مصرفی در روسازی



شکل ۴. تصویر ریزساختار بتن در مقیاس ۲۰ میکرومتر، ۹۰ روز عمل آوری در دمای اتاق



شکل ۵. تصویر ریزساختار بتن در مقیاس ۲۰ میکرومتر، ۹۰ روز عمل آوری بعد از حرارت زیاد

۴. نتیجه گیری

(۲۰۰۵) نیز گزارش شده است. آن‌ها تغییرات ناچیز

در سرعت امواج را به‌عنوان نشانه‌ای از یکنواختی ماتریس بتن در تمامی مخلوط‌ها دانستند.

- اعمال حرارت زیاد در بتن کنترل و بتن سرباره قلیافعال موجب افت نتایج حاصل از آزمون UPV گردید. در این راستا، بیشترین و کمترین میزان افت سرعت UPV (۳۷ و ۴۶ درصد) به ترتیب متعلق به طرح ۱ و طرح ۲ بود.
- بررسی تصاویر آزمون SEM در دمای اتاق و پس از حرارت زیاد در بتن، ضمن همپوشانی با نتایج UPV، نشان از ایجاد ریزترک‌های متعدد حاصل از فرایند عمل‌آوری حرارتی (60°C) در بتن سرباره قلیافعال بود. این ترک‌ها در ابعاد بسیار ریز بوده، تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تأثیر می‌گذارند و تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته‌اند (رن و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، اعمال حرارت زیاد در نمونه‌های بتن کنترل و بتن سرباره قلیافعال، آثار مخربی بر ریزساختار بتن بر جای گذاشت.

در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر دمای زیاد (50°C) بر سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن سرباره قلیافعال پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده، ضمن ارزیابی، با نتایج حاصل از آزمون SEM مورد تفسیر قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- افزودن نانوسیلیس به طرح‌های بتن سرباره قلیافعال موجب بهبود ریزساختار و سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن تحت دمای اتاق و حرارت زیاد گردید. به‌طوری‌که میزان بهبود UPV در طرح ۴ (بتن سرباره قلیافعال حاوی ۸ درصد نانوسیلیس)، نسبت به طرح ۲ (بتن سرباره قلیافعال فاقد نانوسیلیس)، در دمای اتاق و تحت حرارت زیاد، به ترتیب به میزان ۱۱/۵ و ۱۴ درصد رسید.
- افزودن الیاف پلی‌آلفین به بتن سرباره قلیافعال موجب افت میزان سرعت عبور امواج اولتراسونیک در بتن تحت دمای اتاق و تحت حرارت زیاد گردید. تأثیر کم الیاف بر سرعت امواج در مطالعه سهماران و همکاران

۵. مراجع

- Amiri, M. and Aryanpour, M. 2019. "The effects of high temperatures on concrete performance based on nanostructural changes in calcium silicate hydrate (C-S-H)". *Concrete Res.*, 12(4): 69-80.
- Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. and Low, I. M. 2019. "Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites". *Mater.*, 12(9): 1459.
- Bahadori, H. and Hosseini, P. 2012. "Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties)". *J. Civ. Eng. Manag.*, 18(3): 416-425.
- Bakhtiyari, S., Allahverdi, A., Rais-Ghasemi, M., Zarrabi, B. and Parhizkar, T. 2011. "Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste". *Thermochim. Acta*, 514(1-2): 74-81.
- Bazdar Ardebili, P., Pejmanzad, P. and Shamsaie, S. 2021. "Investigating the role of regional and international markets in attracting road transport in Iran". *J. Transport. Res.*, 18(4): 13-24. doi: 10.22034/tri.2021.273317.2871
- Beigi, M. H., Berenjian, J., Omran, O. L., Nik, A. S. and Nikbin, I. M. 2013. "An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete". *Mater. Design*, 50: 1019-1029.
- Bosiljkov, V. B. 2003. "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler". *Cement Concrete Res.*, 33(9): 1279-1286.
- Brindley, G. 1975. "Thermal transformations of clays and layer silicates". In: *Proceedings of International Clay Conference*, Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois, USA.

- Caetano, H., Ferreira, G., Rodrigues, J. and Pimienta, P. 2019. "Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes". *Constr. Build. Mater.*, 199: 717-736.
- Chellapandian, M., Mani, A. and Prakash, S. S. 2020. "Effect of macro-synthetic structural fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with different ratios of GFRP bars". *Compos. Struct.*, 254: 112790.
- Choubdar, A., Farajollahi, A. and Ameli, A. 2021. "Effect of polypropylene fiber on mechanical strength and durability of roller compacted concrete pavement containing convertor slag". *J. Transport. Res.*, 18(3): 133-152. doi: 10.22034/tri.2021.137310
- Davidovits, J. 2008. "Geopolymer chemistry and application". 2nd ed., Institut Géopolymère, France.
- Deb, P., Nath, P. and Sarker, P. 2015. "Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature". *Proc. Eng.*, 125: 594-600.
- Deb, P. S., Sarker, P. K. and Barbhuiya, S. 2016. "Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica". *Cement Concrete Compos.*, 72: 235-245.
- Ehsani, A., Nili, M. and Shaabani, K. 2017. "Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing Fly Ash". *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(5): 1854-1865.
- Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F. and Burhan Karakoç, M. 2019. "The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and styrene-butadiene latex additives at different ratios". *Constr. Build. Mater.*, 201: 257-267.
- IS 13311-1. 1992. "Method of non-destructive testing of concrete, Part 1: Ultrasonic pulse velocity [CED 2: Cement and Concrete]".
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J. and Sulieman, M. Z. 2012. "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties". *Constr. Build. Mater.*, 26(1): 565-573.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J. and Ou, J. 2004. "Microstructure of cement mortar with nano-particles". *Compos. Part B: Eng.*, 35(2): 185-189.
- Neupane, N., Chalmers, D. and Kidd, P. 2018. "High-strength geopolymer concrete-properties: Advantages and challenges". *Adv. Mater.*, 7(2): 15-25.
- Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A. and Khorami, M. 2018. "Portland cement structure and its major oxides and fineness". *Smart Struct. Syst.*, 22(2): 425-432.
- Parvar, M., Hassanvand, D., Khorsand, M., Tarahomi, F. 2021. "Investigation and analysis of the role of maritime transport sector on economic growth of Khuzestan province". *J. Transport. Res.*, 18(4): 85-98. doi: 10.22034/tri.2021.111710
- Provis, J. L. and Van Deventer, J. S. 2009. "Introduction to geopolymers". In: *Geopolymers*, Woodhead Publishing, pp. 1-11.
- Ren, W., Xu, J. and Bai, E. 2016. "Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(2): 04015124.
- Sahmaran, M., Yurtseven, A. and Yaman, I. O. 2005. "Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete". *Build. Environ.*, 40(12): 1672-1677.
- Scrivener, K. and R. James, K. 2008. "Innovation in use and research on cementitious material". *Cement Concrete Res.*, 38(2): 128-136.
- Vora, P. and Urmil V. D. 2013. "Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete". *Proc. Eng.*, 51: 210-219.

