



Semnan University



Research Article

Experimental Laboratory Evaluation of Durability Properties of Alkali-Activated Concrete Based on Blast Furnace Slag Used in Road Pavement

Mohammadhossein Mansourghanaei*^{}

Ph.D. in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-03-16

Revised: 2025-07-04

Accepted: 2025-07-09

Keywords:

Pavement concrete,
Alkali-activated concrete,
Water permeability,
Capillary water absorption,
Scanning Electron -
Microscopy (SEM).

ABSTRACT

The use of concrete in road pavements has always been of interest to civil engineering scientists due to its numerous benefits. In recent decades, production of alkali-activated concrete, which is environmentally friendly concrete, has attracted the attention of researchers. In this paper, a mix design of ordinary concrete containing 500 kg/m³ of Portland cement and a mix design of alkali-activated concrete containing blast furnace slag were made and the durability properties of the concrete were evaluated under water permeability and capillary water absorption tests at 7, 28 and 90 days of curing. Increasing the curing age of the concrete improved the results in all tests. In this regard, in ordinary concrete, the lowest permeability and capillary water absorption were obtained at 90 days of curing, with a height of 29 mm and a value of 0.13 cm/s^{1/2}, respectively, which resulted in an improvement of 19.44 and 27.77 percent compared to the 7-day curing age, respectively. In geopolymer concrete, the lowest capillary permeability and water absorption values were obtained at curing age of 90 days, with a height of 23 mm and a value of 0.071 cm/s^{1/2}, respectively, which resulted in an improvement of 14.81 and 35.45 percent, respectively, compared to the 7-day curing age of concrete. At a curing age of 90 days (as the optimal age), the capillary permeability and water absorption values in alkali-activated concrete were improved by 20.68 and 45.38 percent, respectively, compared to conventional concrete. The results of scanning electron microscopy (SEM) analysis of concrete samples overlapped with other tests in this study.

* Corresponding author.

E-mail address: mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

How to cite this article: Mansourghanaei, M. (2025). Experimental Laboratory Evaluation of Durability Properties of Alkali-Activated Concrete Based on Blast Furnace Slag Used in Road Pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(2), 117-129. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37174.1718>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی خواص دوام بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی مصرفی در روسازی راه

محمدحسین منصورقناعی*

دکترای تخصصی مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸	مصرف بتن در روسازی راه‌ها به دلیل مزایای فراوان آن همواره مورد توجه دانشمندان علم مهندسی عمران بوده است. در دهه‌های اخیر، تولید بتن قلیافعال که بتنی دوست‌دار طبیعت است مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقاله، یک طرح مخلوط از بتن معمولی حاوی عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از سیمان پرتلند و یک طرح مخلوط از بتن قلیافعال حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی ساخته شد و خواص دوام بتن تحت آزمون‌های نفوذپذیری آب و جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۹۰ و ۹۰ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. افزایش سن عمل‌آوری بتن موجب بهبود نتایج در تمام آزمون‌ها شد. در این راستا، در بتن معمولی، کمترین میزان نفوذپذیری و جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه به ترتیب به ارتفاع ۲۹ میلی‌متر و مقدار $0.13 \text{ cm/s}^{1/2}$ کسب گردید که به ترتیب ۱۹/۴۴ و ۲۷/۷۷ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری در پی داشت. در بتن قلیافعال، کمترین میزان نفوذپذیری و جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه به ترتیب به ارتفاع ۲۳ میلی‌متر و مقدار $0.071 \text{ cm/s}^{1/2}$ کسب گردید که به ترتیب ۱۴/۸۱ و ۳۵/۴۵ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری بتن در پی داشت. در سن ۹۰ روز عمل‌آوری (به عنوان سن بهینه)، مقدار نفوذپذیری و جذب مویینه آب در بتن قلیافعال به ترتیب به میزان ۲۰/۶۸ و ۴۵/۳۸ درصد بهبود را نسبت به بتن معمولی کسب کرد. نتایج حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های بتنی در هم‌پوشانی با سایر آزمون‌های این تحقیق قرار گرفت.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

استناد به این مقاله: منصورقناعی، محمدحسین . (۱۴۰۴). ارزیابی آزمایشگاهی خواص دوام بتن قلیافعال برپایه سرباره کوره آهن‌گدازی مصرفی در روسازی راه. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۱۱۷-۱۲۹.
<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37174.1718>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

روسازی راه به دلیل اینکه بخش اصلی بارهای ترافیکی را تحمل می‌کند یکی از ارکان مهم راه‌سازی به‌شمار می‌رود. روسازی راه همواره روی بخش توده خاک متراکم شده طبیعی (در چندین لایه) اجرا می‌گردد. آسفالت، متداول-ترین مصالح مصرفی برای روسازی راه‌ها شناخته می‌شود؛ اما تحت شرایطی ویژه نظیر در معرض بودن راه تحت بارهای سنگین ترافیکی (مانند کف فرودگاه‌ها)، کنترل یخ‌زدگی (مانند کف سردخانه‌ها و راه‌ها در مناطق سردسیر)، بهبود فرآیند زهکشی و غیره، روسازی راه با آسفالت پاسخگو نبوده و لازم است تا تحت این شرایط از بتن و یا ترکیب بتن و آسفالت به‌عنوان روسازی راه استفاده گردد. از طرفی، استفاده از بتن برای روسازی راه‌ها به دلیل استفاده حجم کمتر از بتن در مقایسه با آسفالت (با توجه به ضخامت کمتر در هنگام استفاده از بتن)، به حفظ منابع معدنی و محیط‌زیست بیشتر کمک می‌کند (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴b). همچنین، بهبود استحکام بتن، نقش بسزایی در افزایش طول عمر مفید راه‌ها دارد. این بهبود از طریق نوع مصالح مصرفی در ترکیب مخلوط بتن قابل دستیابی است (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۳a؛ منصورقناعتی و مردوخ‌پور، ۲۰۲۴).

در دهه‌های اخیر، نوع خاصی از بتن به‌نام بتن‌های قلیافعال، با توجه به مزایای فراوان از جمله خواص مکانیکی و دوام زیاد نسبت به بتن معمولی و به دلیل کاهش مضرات محیط‌زیستی مورد توجه دانشمندان علم مهندسی عمران قرار گرفته است (ریو و همکاران، ۲۰۱۳؛ مهدی‌پور و همکاران، ۲۰۲۰؛ نثوپین و همکاران، ۲۰۱۸). مصالح پوزولانی مورد استفاده در این نوع از بتن‌ها، اغلب ضایعات کارخانه‌های صنعتی (نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی، متاکاؤلین و خاکستر بادی (نوکلانگ و

همکاران، ۲۰۱۶؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶) می‌باشند (هاشمی‌پور و محمدی‌زاده، ۲۰۲۳؛ عموزاده عمرانی و همکاران، ۲۰۲۲). در دهه‌های اخیر، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به دلیل خصوصیات پوزولانی بالا، به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و دوام (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۳b؛ منصورقناعتی و مردوخ‌پور، ۲۰۲۳) در لایه‌های مختلف راه‌ها، چشم‌انداز گسترده‌ای پیدا کرده است (هاشمی‌پور و محمدی‌زاده، ۲۰۲۳؛ عموزاده عمرانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاتبی و همکاران، ۲۰۱۸). سرباره گرانوله شده‌ی کوره-بلند از مواد محیط‌زیستی می‌باشد که استفاده کردن از آن به‌جای سیمان، هم باعث بهبود استحکام بتن می‌شود و هم اینکه نیاز روزافزون استفاده از سیمان در بتن را کاهش می‌دهد (صدیق و کائور، ۲۰۱۲؛ یوکسل و همکاران، ۲۰۱۱).

مواد پوزولانی با تسریع در فرایند ژئوبسپارش (ژئوپلیمریزاسیون) و با تولید حجم زیادی از ژل‌های هیدراته (این ژل‌ها عامل اصلی چسبندگی و پیوند بین اجزای بتن هستند) منجر به بهبود خواص مکانیکی و دوام در بتن سخت‌شده می‌گردند (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۲b؛ منصورقناعتی، ۲۰۲۴). محصول نهایی فرایند ژئوبسپارش، ژل‌های هیدراته از قبیل سیلیکات-کلسیم هیدراته موسوم به ژل توبرمورایتی (C-S-H)^۱، سیلیکات‌آلومینیم-کلسیم هیدراته موسوم به ژل اترینگایت یا ژل شبه توبرمورایتی (C-A-S-H)^۲ و سیلیکات-آلومینیم-سدیم هیدراته موسوم به ژل شبه توبرمورایتی (N-A-S-H)^۳ هستند. این ژل‌ها، ضمن داشتن تراکم و چگالی بالا در خود، به‌خوبی می‌توانند حفرات و منافذ موجود در ملات را پر نمایند و اتصال بین سنگدانه و خمیر سیمان در نواحی انتقال بین‌سطحی (ITZ)^۴ در حفاصل بین سنگدانه و خمیر سیمان را تقویت کنند و

3 - Natrium-Aluminat- Sulfate -Hydrate (N-A-S-H) or Tobermorite-like gel
4- Interfacial transition zone (ITZ)

1- Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) or Tobermorite Gel
2- Calcium-Aluminat- Sulfate-Hydrate (C-A-S-H) or Ettringite Gel or Tobermorite-like gel

از این طریق منجر به تولید بتن متراکم و مستحکم قلیافعال گردند. این فرایند در بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند با توجه به تولید میزان کمتری از ژل C-S-H، به مقادیر ضعیف‌تری انجام می‌گیرد (منصورقناعی، ۲۰۲۳a؛ منصورقناعی، ۲۰۲۳b).

در تحقیق پیش‌رو سعی شده است تا با بررسی مزایای دوام بتن قلیافعال، این نوع از بتن به‌عنوان جایگزینی مناسب برای بتن معمولی (به‌دلیل مضرات این نوع از بتن نسبت به بتن قلیافعال) در مصرف روسازی راه‌ها معرفی گردد. در این راستا، از سرباره کوره آهن‌گدازی (به‌جای سیمان) در بتن استفاده گردید. تحقیقات نشان داده است که استفاده از مصالح با خصوصیات پوزولانی در بتن مصرفی راه‌ها، ضمن کاهش مضرات زیست محیطی، میزان دوام بتن مصرفی راه‌ها را بهبود می‌بخشد (طاهری و همکاران، ۲۰۲۳؛ رضایی لری و حسنی، ۲۰۱۹). همچنین، تحقیقات نشان داده است که به‌کارگیری مصالح با خواص پوزولانی نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی در بتن جهت ساخت روسازی راه‌ها منجر به بهبود دوام و مقاومت بتن روسازی می‌گردد (محمدی جناکی و حسنی، ۲۰۱۹؛ عبدالله‌زاده و نیلی، ۲۰۱۹؛ پاچیده و همکاران، ۲۰۲۲؛ میرنظامی و همکاران، ۲۰۲۴). دانشمندان معتقدند که با افزودن سرباره در ترکیب بتن قلیافعال، ساختار منافذ در بتن بهینه‌سازی شده و توزیع اندازه منافذ به‌طور مناسب‌تر خواهد بود، ITZ متراکم‌تر و استحکام و جنبه‌های دوام بتن به‌تدریج افزایش می‌یابد. به‌عبارتی، توسعه دوام رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ITZ در بتن قلیافعال سرباره‌ای دارد (دوآن و همکاران، ۲۰۱۳).

دوام در بتن از طریق انجام آزمون‌هایی نظیر نفوذپذیری آب و جذب مویینه آب قابل ارزیابی است (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴b؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۳a). نفوذپذیری، نقش مهم‌تر و بیشتری در بین عوامل مخرب

بتن دارد و در حقیقت نفوذپذیری، مقدار خسارت تحت عوامل خارجی را در بتن تعیین می‌کند (مهتا، ۲۰۱۴). نفوذپذیری وابسته به تخلخل و اتصال منافذ موجود در خمیر سیمان و ریزترک‌های موجود در بتن، خصوصاً در سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌باشد (بانتیا و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از مواد پوزولانی نظیر انواع سرباره‌ها در بتن مصرفی روسازی راه‌ها، میزان جذب آب نهایی (پاچیده و همکاران، ۲۰۲۲) و نفوذپذیری آب (رضایی لری و حسنی، ۲۰۱۹) را در بتن کاهش داده و از این طریق دوام بتن بهبود پیدا خواهد کرد. از طرفی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمل‌آوری در هوای آزاد در مقایسه با عمل‌آوری توسط آب، بر میزان جذب آب بتن می‌افزاید و نفوذپذیری بتن را بهبود می‌بخشد (الوادی و همکاران، ۲۰۱۴).

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به- واسطه تولید بتن قلیافعال، به چند مورد زیر خلاصه می- گردد:

۱- به‌کارگیری سرباره کوره آهن‌گدازی (به‌جای سیمان) به‌عنوان مصالح با خواص پوزولانی بالا در بتن روسازی راه‌ها.

۲- استفاده از بتن قلیافعال سرباره‌ای منجر به حفظ سلامت محیط‌زیست به‌واسطه مصرف سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب‌آهن (با توجه به شناخته شدن به‌عنوان مواد مضر محیط‌زیستی)، حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی و حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی می‌گردد.

۳- با توجه به جذب مویینه و نفوذپذیری کمتر آب در بتن قلیافعال سرباره‌ای نسبت به بتن معمولی تولید شده در این تحقیق آزمایشگاهی، دوام بتن قلیافعال مصرفی در روسازی راه در برابر عوامل مخرب خارجی را بهبود می- بخشد (در مقایسه با بتن معمولی).

۲. مصالح مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) با چگالی ۳۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص ۳۰۰۰ الی ۳۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم که تحت استاندارد ISIRI 389 تولید شده است، استفاده گردید. سرباره کوره آهن‌گدازی، محصول کارخانه ذوب‌آهن اصفهان با چگالی ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و چگالی ظاهری ۹۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات شیمیایی این محصول در جدول ۱ نشان داده شده است. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب‌آهک و ساخت طرح مخلوط در تحقیق پیش رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد. این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. براساس بندهای ۹-۱۰-۴ و ۹-۱۰-۳ ویرایش چهارم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران، آبی که قابل آشامیدن است، مزه و بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است را می‌توان بدون آزمون در بتن استفاده کرد، مگر آنکه سوابق قبلی نشان دهنده‌ی نامناسب بودن این آب برای بتن باشد. سنگدانه مصرفی از نوع مصنوعی و بر اساس ملزومات استاندارد ASTM C33، تهیه شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان است. برخی از مشخصات سنگدانه مصرفی در جدول ۲ به نمایش درآمده است. تحقیقات نشان داده است که بتن قلیافعال تازه به علت لزجت بالای موجود در محلول قلیافعال در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف‌تری دارد. جهت حل این مشکل، یک فوق‌روان‌کننده مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات اغلب به‌علت پیوندهای قوی بین کلسیم با بار مثبت و پلی‌کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است (پيله‌ور و همکاران، ۲۰۱۸). در

این راستا، از ابرروان‌کننده نسل چهارم مبتنی بر پلی-کربوکسیلات نرمال، محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه، بر اساس ویژگی‌های جدول ۳ استفاده گردید. محلول قلیافعال مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) و هیدروکسید سدیم (NaOH) با نسبت وزنی ۲/۵ می‌باشد که با چگالی ترکیبی برابر ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار گرفت. برخی از مشخصات محلول قلیافعال مصرفی در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جهت تهیه محلول هیدروکسید سدیم، ابتدا جرم مولی هیدروکسید سدیم (۳۹/۹۹ گرم بر مول) را در عدد مولاریته مورد نظر (در این پژوهش ۱۶ است) ضرب می‌کنیم تا وزن هیدروکسید سدیم جامد مصرفی (برای حل در یک لیتر آب) به‌دست آید. سپس این مقدار از وزن هیدروکسید سدیم جامد را در یک لیتر آب مخلوط می‌کنیم تا محلول هیدروکسید سدیم ساخته شود. این محلول باید ۲۴ ساعت قبل از ترکیب در بتن ساخته شود و در طول این مدت، در محیط و جای خشک نگهداری گردد. در ادامه، محلول قلیافعال ترکیبی مصرفی در بتن ژئوپلیمری با ترکیب محلول سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم با نسبت ۲/۵ ساخته شد.

۳. طرح مخلوط بتن

استاندارد مجزایی برای طرح مخلوط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد. بنابراین، به تبعیت برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی (دب و همکاران، ۲۰۱۵؛ منصورقنای و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقنای و همکاران، ۲۰۲۴b؛ منصورقنای و همکاران، ۲۰۲۳a؛ منصورقنای و مردوخ‌پور، ۲۰۲۴)، طرح مخلوط بتن قلیافعال مطابق با استاندارد تهیه بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 براساس جدول ۵ تهیه و تنظیم گردید.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی (بر اساس درصد)

L.O.I	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
۰/۰۲	۰/۱۸	۲/۴۹	۰/۹۲	۱/۲۱	۰/۱۲	۶/۲۴	۷/۴۵	۹/۱۷	۳۵/۵	۳۶/۷۲

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌ها

مصلح دانه‌ای بتن	حداقل قطر	حداکثر قطر (mm)	مدول نرمی (mm)	چگالی (kg/m ³)	درصد جذب آب
شن	۴/۷۵ (mm)	۱۹	۵/۷	۲۷۵۰	۲/۲
ماسه	۷۵ (μm)	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰	۲/۹

جدول ۳. مشخصات ابرروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	چگالی (kg/m ³)	استاندارد صرف	pH
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷

جدول ۴. مشخصات محلول قلیا فعال

نوع محلول	رنگ	مولاریته (mol/m ³)	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (p)	دمای ذوب (C)	جرم مولی (gr/mol)	*	**
هیدراکسید سدیم	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳/۳	۳۱۸	۳۹/۹۹	-	-
سیلیکات سدیم	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶	۲/۴	۴۷
* نسبت وزنی (مولار) سیلیکات به سدیم ** نسبت وزنی (مولار) سیلیکات به آب								

جدول ۵. مشخصات طرح مخلوط بتن

نوع بتن	کمیت	سیمان	سرباره	آب	شن	ماسه	ابرروان کننده	شرایط عمل‌آوری پس از قالب‌برداری	چگالی مخلوط بتن (kg/m ³)	نسبت W/C
معمولی	kg/m ³	۵۰۰	۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۵	۷	در آب	۲۴۹۷	۴۵ درصد
	درصد	۲۰/۰۲	۰	۹/۰۱	۴۰/۰۴	۳۰/۶۳	۰/۰۰۲۸			
قلیا فعال	kg/m ³	۰	۵۰۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۲/۶۳	۷	حرارت + محیط خشک	۲۴۹۴/۶۳	۴۵ درصد
	درصد	۰	۲۰/۰۴	۹/۱۹	۴۰/۰۸	۳۰/۵۷	۰/۰۰۲۸			

- در بتن قلیا فعال منظور از نسبت W/C، نسبت محلول قلیا فعال به سرباره کوره آهن‌گدازی مصرفی است.

۴. ساخت و عمل‌آوری بتن

حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب به مدت ۱/۵ دقیقه به طول انجامید. در ادامه، مصالح تر شامل آب (یا محلول قلیا فعال) به مخلوط اضافه شدند و ترکیب مصالح به مدت ۲/۵ دقیقه دیگر به طول انجامید. سپس مخلوط بتن تازه

در ابتدا، براساس طرح مخلوط جدول ۵، مصالح مصرفی توزین شدند و در ادامه، مصالح خشک شامل سیمان (یا سرباره) و سنگدانه در داخل دستگاه مخلوط‌کن برقی در

در قالب‌های فلزی فویل‌دار و روغن‌کاری شده از قبل در سه مرحله ریخته شد. در این راستا، به‌منظور اعمال تراکم، در هر مرحله ۲۵ ضربه به‌وسیله میله مخصوص به ترکیب بتن وارد شد. در پایان، قالب‌ها حاوی نمونه‌های بتنی در محیط خشک و تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از سپری شدن این زمان، قالب‌برداری نمونه‌ها انجام گرفت و نمونه‌های بتن معمولی در آب‌آهک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا سن انجام آزمون نگهداری و عمل‌آوری شدند. تحقیقات قبلی نشان داده است که عمل‌آوری حرارتی بتن قلیافعال منجر به بهبود خواص مکانیکی و دوام در این نوع از بتن نسبت به عمل‌آوری در دمای محیط می‌گردد. مناسب‌ترین زمان و دما برای این منظور، حرارت تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت می‌باشد (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴b). در این راستا، نمونه‌های بتن قلیافعال پس از قالب‌برداری به‌مدت ۴۸ ساعت درون کوره تحت عمل‌آوری حرارتی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا استحکام در این نوع از بتن بهبود یابد. پس از سپری شدن این زمان، نمونه‌های بتنی از کوره خارج شدند و در محیط خشک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا فرارسیدن زمان آزمون نگهداری و عمل‌آوری گردیدند. در راستای عمل‌آوری حرارتی در بتن قلیافعال، تحقیقات نشان داده است که نمونه‌های بتن قلیافعال تحت عمل‌آوری حرارتی در دمای ۵۰ الی ۷۰ درجه سلسیوس دارای استحکام بیشتر از نمونه‌های تحت دمای ۲۰ درجه سلسیوس هستند (مهتا و مونتیرو، ۲۰۱۴).

۵. استاندارد و روش انجام آزمون‌ها

آزمون نفوذپذیری آب در بتن در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS EN 12390-8 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۲×۲۰×۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. به منظور کاهش پراکندگی نتایج (رسیدن به

انحراف معیار کم)، در هر سن از عمل‌آوری بتن، سه نمونه بتنی و در مجموع ۹ نمونه بتنی ساخته شد. میزان انحراف معیار نیز در نمودارهای خروجی نتایج هر آزمون ترسیم گردید. براساس این استاندارد، در سن عمل‌آوری تعیین شده، نمونه‌ها از چهار وجه با چسب آکوارיום ضد آب گردیدند و تنها از دو وجه پایین و بالا به‌منظور انجام آزمایش آزاد باقی ماندند. پس از جانمایی نمونه‌ها در قالب دستگاه تعیین عمق نفوذ آب، مطابق استاندارد ذکر شده، نمونه‌ها به‌مدت 72 ± 2 ساعت تحت فشار آب ۵۰ ± 0.05 کیلوپاسکال قرار گرفتند. در طول دوره آزمایش، فشار آب بر نمونه‌ها کنترل گردید. پس از سپری شدن مدت زمان تعیین شده، نمونه‌ها شکسته شدند و عمق نفوذ آب در ارتفاع نمونه بتنی اندازه‌گیری گردید که نتیجه نهایی در هر دوره، میانگینی از سه نمونه بتنی بود.

آزمون جذب مویینه آب در بتن در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM C1585-13 روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰×۵ سانتی‌متر انجام گرفت. به منظور کاهش پراکندگی نتایج (رسیدن به انحراف معیار کم)، در هر سن از عمل‌آوری بتن، سه نمونه بتنی و در مجموع ۹ نمونه بتنی ساخته شد. میزان انحراف معیار نیز در نمودارهای خروجی نتایج هر آزمون ترسیم گردید. براساس استاندارد ذکر شده، ابتدا نمونه‌های بتنی در سن عمل‌آوری هدف به‌مدت ۷۲ ساعت داخل گرمکن با محفظه بسته تحت حرارت 50 ± 2 درجه سلسیوس گرما داده شدند تا نمونه‌ها به‌طور کامل خشک و آب موجود در حفرات مویینه تخلیه گردد. سپس نمونه‌های خشک شده وزن گردیدند. برای جلوگیری از اثر تبخیر و همچنین جریان آب در جهت‌های مختلف در طول آزمایش، اطراف نمونه‌های بتنی توسط پارافین مهر و موم شد و یک وجه در آب قرار گرفت و وجه مقابل به‌صورت آزاد قرار داده شد (بزکورت و یازیچی‌اوغلو، ۲۰۱۰). نمونه‌ها داخل ظرف روی شبکه‌های مش میلگردها به‌نحوی قرار داده شدند که آب تا ارتفاع 21 ± 2

میلی متر بالاتر از کف نمونه برسد. روی ظرف با پلاستیک پوشانده شد تا از تبخیر آب جلوگیری شود. در ادامه، آهنگ بالاروندگی آب از طریق پرشدن حفرات مویینه توسط آب شروع گردید. با توجه به وزن ایجاد شدن نمونه ها براساس استاندارد در فواصل زمانی ۳۶۰، ۳۰۰، ۲۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۵ دقیقه، مقادیر ارتفاع جذب آب براساس روابط ریاضی محاسبه گردید که نتیجه نهایی در هر دوره، میانگینی از سه نمونه بتنی بود. آنالیز SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در بتن، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI Quanta200 روی نمونه های خرد شده انجام گرفت. در این راستا، نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگنمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

۶. نتایج و تفسیر آزمون ها

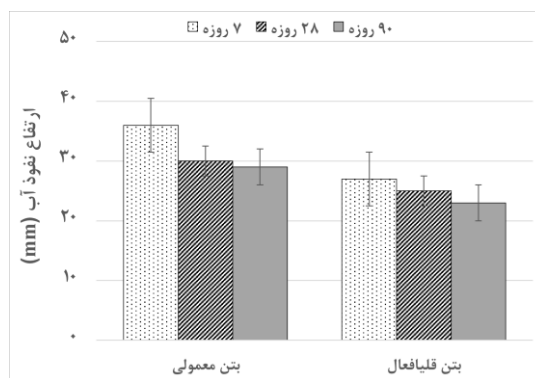
۶-۱. نتایج و تفسیر آزمون نفوذپذیری آب در بتن
نفوذپذیری به عنوان یک فاکتور اساسی در تعیین دوام بتن شناخته می شود (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۳a؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۲b). عدم نفوذپذیری خمیر سیمان هیدراته شده یک مشخصه بسیار با ارزش است زیرا خمیر سیمان هیدراته شده نفوذناپذیر منتج به بتن نفوذناپذیر می شود (مهتا و مونتیرو، ۲۰۱۴). در این مقاله، نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری آب، در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. براساس این نمودار، مشاهده می گردد که افزایش سن عمل آوری بتن موجب بهبود نتایج در طرح ها شده است. در این راستا در بتن معمولی، کمترین میزان نفوذپذیری آب در سن عمل آوری ۹۰ روزه به ارتفاع ۲۹ میلی متر کسب گردید که ۱۹/۴۴ درصد بهبود نسبت به سن ۷ روز عمل آوری را در پی داشت. در بتن قلیافعال، کمترین میزان نفوذپذیری آب در سن عمل آوری ۹۰ روزه به ارتفاع ۲۳ میلی متر کسب گردید

که ۱۴/۸۱ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روزه عمل آوری در پی داشت. بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی دارای نفوذپذیری کمتری از آب است. در این راستا، در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری، میزان برتری نتایج در بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی به ترتیب به میزان ۲۵، ۱۶/۶۶ و ۲۰/۶۸ درصد کسب شد. این امر به دلیل مشارکت بیشتر ذرات آلومینوسیلیکاتی موجود در سرباره کوره آهن گدازی در فرایند ژئوسپارش است (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴b؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۳b؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۲b) که منجر به تولید حجم بیشتری (نسبت به بتن معمولی) از ژل های هیدراته شده نظیر C-S-H در ترکیب بتن گردیده است. این ژل ها با پرکردن حفرات، منافذ، ترک ها و ایجاد پیوند در ITZ حد فاصل خمیر سیمان قلیافعال و سنگدانه ها، موجب استحکام بتن سخت شده می گردند.

تصاویر SEM حاصل از ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال در این پژوهش نیز حجم بالایی از تولید ژل های هیدراته در ماتریس ساختار بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی را نشان می دهد. با مقایسه نتایج آزمون نفوذپذیری آب در بتن معمولی و بتن قلیافعال این پژوهش با سایر تحقیقات مشابه (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۳a) مشاهده می گردد که افزایش سن عمل آوری بتن منجر به بهبود نتایج شده است. اما علت برتری نتایج در بتن معمولی و بتن قلیافعال تحقیق پیش رو نسبت به تحقیقات مشابه مذکور، به دلیل عیار بالاتر مصرف سیمان و سرباره در طرح مخلوط بتن معمولی و بتن قلیافعال در تحقیق پیش رو است.

معمولی به ترتیب ۶۳/۶۳، ۵۱/۳۳ و ۴۵/۳۸ درصد بهبود را نشان می‌دهد. این فرایند در نتیجه تولید حجم زیادی از ژل‌های هیدراته شده در ترکیب خمیر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی است که با پر کردن تخلخل‌ها، ترک‌ها و بهبود پیوند در ITZ، موجب بهبود تراکم و استحکام بیشتر (با توجه به تولید بیشتری از ژل‌های هیدراته در ترکیب) در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی شده است. تحقیقات نشان داده است که ژل‌های هیدراته در بتن سخت‌شده هستند (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴b؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۳a؛ منصورقناعتی و مردوخ‌پور، ۲۰۲۴). به عبارتی دیگر، ذرات آلومینوسیلیکاتی موجود در سرباره کوره آهن‌گدازی به مراتب بیشتر از سیمان پرتلند است. ذرات آلومینوسیلیکاتی در همجواری با رطوبت (آب یا محلول قلیافعال) طی واکنش شیمیایی (بسپارش در بتن معمولی و ژئوبسپارش در بتن قلیافعال) تبدیل به ژل‌های هیدراته می‌گردند. این ژل‌ها دارای خاصیت چسبندگی هستند و پیوند بین اجزای تشکیل‌دهنده بتن را تأمین می‌کنند. حجم تولید شده این ژل‌ها در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی بیشتر است. به همین دلیل، بتن حاصل دارای پیوند بهتر اجزا و تخلخل و ترک‌های کمتری است که منجر به بهبود در خواص دوام، علی‌الخصوص بهبود نتایج در آزمون نفوذپذیری آب و جذب مویینه آب در بتن قلیافعال (نسبت به بتن معمولی) می‌گردد.

با مقایسه نتایج حاصل از جذب مویینه آب در بتن معمولی و بتن قلیافعال در این تحقیق و تحقیقات مشابه (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۳a)، مشاهده می‌گردد که در تمامی تحقیقات، افزایش سن عمل‌آوری بتن منجر به بهبود نتایج شده است. اما برتری نتایج در این تحقیق به دلیل عیار مصرف بالاتر از سیمان پرتلند در بتن معمولی و بتن قلیافعال در طرح مخلوط بتن تحقیق پیش رو نسبت به سایر تحقیقات است.



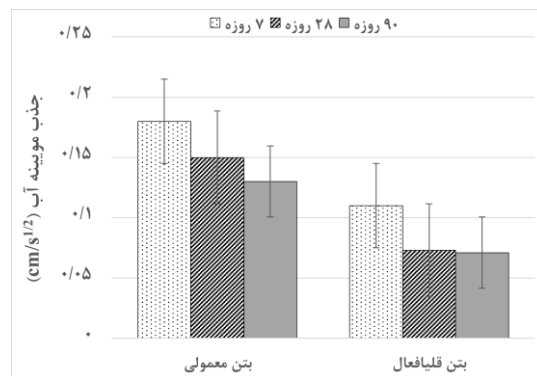
شکل ۱. ارتفاع نفوذ آب در بتن

۲-۶. نتایج و تفسیر آزمون جذب مویینه آب در بتن

در این پژوهش آزمایشگاهی، نتایج حاصل از آزمون جذب مویینه آب در شکل ۲ به‌نمایش درآمده است. بر اساس این نتایج، افزایش سن عمل‌آوری بتن موجب بهبود نتایج در طرح‌ها شده است. در این راستا، در بتن معمولی، کمترین میزان جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روز به مقدار $0.13 \text{ cm/s}^{1/2}$ کسب گردید که در پی داشت. اما در بتن قلیافعال، کمترین میزان جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روز به مقدار $0.071 \text{ cm/s}^{1/2}$ کسب گردید که ۳۵/۴۵ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری در پی داشت. تحقیقات نشان داده است که بتن قلیافعال در سن عمل‌آوری ۹۰ روز نسبت به بتن معمولی، ۴۰ درصد جذب آب کمتری دارد که تأثیر واکنش‌های پوزولانی در پر کردن منافذ و کاهش جذب آب را مشخص می‌کند (بزکورت و یازیچی‌اوغلو، ۲۰۱۰). در این پژوهش آزمایشگاهی، با توجه به ریزساختار متراکم‌تر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی که در تصاویر SEM در بخش ۶-۳ مشاهده می‌گردد، میزان جذب مویینه آب در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در سنین متناظر کاهش (بهبود) را نشان می‌دهد. در این راستا، در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در بتن، میزان جذب مویینه آب در بتن قلیافعال نسبت به بتن

را می‌توان به ذرات هیدراته نشده سرباره نسبت داد. قطر این ذرات و توده‌ها تا یک میکرومتر تخمین زده می‌شود و حجم آن در بتن معمولی بیشتر از بتن قلیافعال است. حجم منافذ در ترکیب بتن معمولی تا ۵۰۰ نانومتر تخمین زده می‌شود و وجود ریزترک‌ها در بتن قلیافعال با اندازه چند نانومتر، به عمل‌آوری حرارتی این نوع از بتن تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس ارتباط دارد. میزان تخلخل در بتن معمولی بسیار بیشتر از بتن قلیافعال است و به‌صورت شهودی، تخلخل در بتن معمولی تا ۵ درصد و در بتن قلیافعال کمتر از ۲ درصد حجم بتن تخمین زده می‌شود. برتری ریزساختاری بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در تصاویر مشهود است، در این راستا، حجم ژل‌های هیدراته شده در تصاویر نمونه بتن قلیافعال بیشتر از بتن معمولی دیده می‌شود و تعداد و اندازه منافذ، حفرات و ترک‌ها در بتن معمولی بیش از بتن قلیافعال است. در بتن معمولی، در قسمت توده خمیر سیمان پُرتلند، یون‌هایی مانند کلسیم، سولفات و هیدرواکسید و آلومینات که از طریق هوازی (حل) شدن به سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم ناشی شده، با هم ترکیب می‌شوند و تشکیل ژل C-A-S-H و هیدروکسید کلسیم موسوم به پُرتلندایت^۱ $(Ca(OH)_2)$ می‌دهند، به این مفهوم که در اثر واکنش کلسیم‌آلومینات با کلسیم‌سولفات، C-A-S-H ایجاد می‌شود و با پیشرفت در مرحله بسپارش، بلورهای ضعیف C-S-H و نسل دوم کریستال‌ها که از $Ca(OH)_2$ و ژل C-A-S-H شکل گرفته است شروع به پر کردن فضاهای خالی در شبکه اترینگایت و پُرتلندایت می‌کنند و با این عملیات، تراکم و سختی و مقاومت ITZ بتن زیاد می‌گردد (مهتا، ۲۰۱۴). تحقیقات سایرین نشان داده است که در بتن قلیافعال، واکنش پوزولانی با تبدیل CH به C-S-H ریزساختارها را متراکم و همگن می‌کند (دو و همکاران، ۲۰۱۴).

با مقایسه تصاویر SEM در این تحقیق با تصاویر



شکل ۲. نتایج جذب مویینه آب در بتن

۳-۶. نتایج و تفسیر SEM

در این تحقیق، تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی در مقیاس ۳ میکرومتر اخذ و در شکل ۳ به نمایش درآمده است. با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن در تمامی طرح‌های مخلوط از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح زیر تشکیل شده است (منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴a؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۴b؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۳a؛ منصورقناعتی و مردوخ‌پور، ۲۰۲۴):

- ۱- فاز اول حاوی محصولات بسپارش و ژئوبسپارش شامل ژل‌های هیدراته است که در تصاویر عمدتاً به رنگ تیره هستند.

- ۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند بسپارش و ژئوبسپارش هستند و در تصاویر عمدتاً به رنگ سفید هستند.

- ۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین‌سطحی تشکیل شده است. وجود نواحی تیره رنگ در تصاویر، نشان از تکمیل فرایند بسپارش و ژئوبسپارش و تولید ژل‌های هیدراته شده است. توده‌های سفید رنگ موجود در تصاویر را می‌توان به کریستال‌های مشارکت نکرده در فرایند شیمیایی نسبت داد و ذرات بسیار ریز موجود در ریزساختار بتن قلیافعال

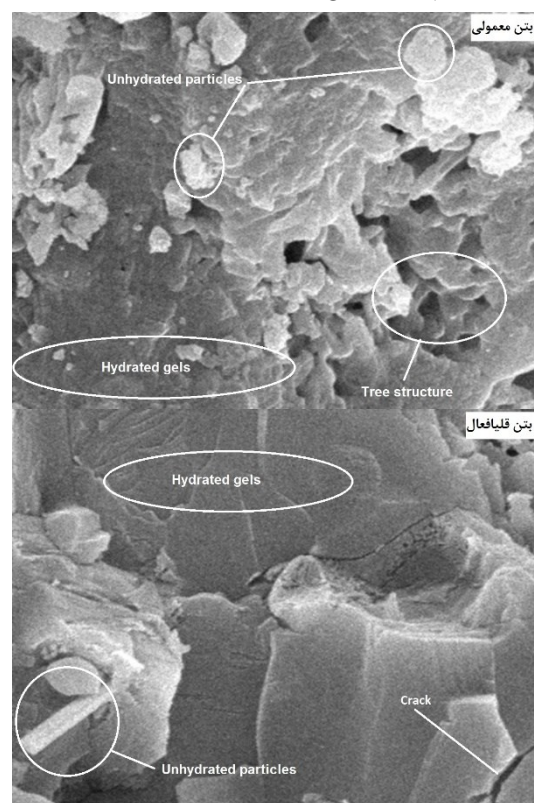
پردازشته شد. آنالیز تصاویر SEM نیز به منظور ارزیابی- های ریزساختاری و راستی‌آزمایی نتایج سایر آزمون‌ها انجام پذیرفت. نتایج حاصله در این پژوهش به شرح زیر ارایه می‌گردد.

۱- افزایش سن عمل‌آوری موجب بهبود نتایج در تمام آزمون‌ها شد. در این راستا، در بتن معمولی، کمترین میزان نفوذپذیری و جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه به ترتیب به ارتفاع ۲۹ میلی‌متر و مقدار $\text{cm/s}^{1/2}$ ۰/۱۳ کسب گردید که به ترتیب ۱۹/۴۴ و ۲۷/۷۷ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری در پی داشت. اما در بتن قلیافعال، کمترین میزان نفوذپذیری و جذب مویینه آب در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه به ترتیب به ارتفاع ۲۳ میلی‌متر و مقدار $\text{cm/s}^{1/2}$ ۰/۰۷۱ کسب گردید که به ترتیب ۱۴/۸۱ و ۳۵/۴۵ درصد بهبود را نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری در پی داشت.

۲- در تمامی سنین عمل‌آوری، عملکرد بتن قلیافعال در آزمون‌ها نسبت به بتن معمولی دارای برتری است؛ به- طوری که در سن ۹۰ روزه عمل‌آوری (به عنوان سن بهینه)، مقدار نفوذپذیری و جذب مویینه آب در بتن قلیافعال به ترتیب به میزان ۲۰/۶۸ و ۴۵/۳۸ درصد بهبود را نسبت به بتن معمولی کسب کرد.

۳- نتایج حاصل از آنالیز تصاویر SEM روی نمونه‌های بتنی در هم‌پوشانی و هماهنگی با سایر آزمون‌های این تحقیق قرار گرفت. از طرفی، در سایر تحقیقات در حوزه بتن‌های قلیافعال، نتایج مشابهی در آنالیز تصاویر SEM کسب گردید (منصورقناعتی و بیکلریان، ۲۰۲۲؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۲a).

SEM در سایر پژوهش‌ها (منصورقناعتی و بیکلریان، ۲۰۲۲؛ منصورقناعتی و همکاران، ۲۰۲۲a) که به طور مشابه روی بتن معمولی و بتن قلیافعال سرباره‌ای در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شده است، مشاهده می‌گردد که میزان تخلخل و منافذ و ریزترک‌ها در بتن حاصل از این تحقیق کمتر از دو تحقیق مشابه است. این امر به دلیل به کارگیری عیار سیمان و سرباره بالاتر در طرح اختلاط بتن تحقیق پیش رو می‌باشد.



شکل ۳. تصاویر SEM

۷. نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، به ساخت بتن قلیافعال سرباره‌ای و مقایسه آن با بتن معمولی، پیرو انجام آزمون- های نفوذپذیری آب در بتن و جذب مویینه آب در بتن،

۸. مراجع

- Abdolazade, S. and Nili, M. 2019. "The influence of compound layers on the mechanical properties and frost resistance of roller compacted concrete pavement". Concrete Res., 2(3): 17-28. doi: 10.22124/jcr.2019.7811.1207
- Amouzadeh Omrani, M., Tahmouresi, G. and Piri, P. 2023. "Experimental study of the effect of steel slag and reclaimed asphalt pavement (RAP) on the properties of self-compacting concrete (SCC) pavement". Concrete Res., 16(4): 95-108. doi: 10.22124/jcr.2023.23289.1604

- Banthia, N., Biparva, A. and Mindess, S. 2005. "Permeability of concrete under stress". *Cement Concrete Res.*, 35: 1651-1655.
- Bozkurt, N. and Yazicioglu, S. 2010. "Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions". *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, 17(2)
- 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.
- Du, H., Du, S. and Liu, X. 2014. "Durability performances of concrete with nano-silica". *Constr. Build. Mater.*, 73: 705-712.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shenb, C. 2013. "Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials". *J. Mater. Res. Technol.*, 2(1): 52-59.
- Hashemipoor, K. and Mohammadizadeh, M. R. 2023. "Study on the mechanical properties of porous concrete with high permeability using aluminum slag". *Concrete Res.*, 16(1): 73-83. doi: 10.22124/jcr.2023.21607.1557
- Elawady, E., El Hefnawy, A. A. and Ibrahim, R.A. F. 2014. "Comparative study on strength, permeability and sorptivity of concrete and their relation with concrete durability". *Int. J. Eng. Innov. Technol. (IJEIT)*, 4(4): 123-131.
- Katebi, B., Aghaei Araei, A., Salamat, A. and Hashemi Tabatabaei, S. 2018. "Use of steel slag mixed by fly ash as stabilization of road subgrade". *Buil. Eng. Housing Sci.*, 12(1): 13-19. [In Persian]
- Mansourghanaei, M. and Biklaryan, M. 2022. "Comparison of modulus-elasticity of pavement alkali-activated concrete and normal concrete under high temperature based on XRD and SEM test". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(3): 137-150. doi: 10.22075/jtie.2022.25524.1577
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2022a. "Experimental study of the effect of high temperature on the passage speed of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in alkaline slag concrete used in pavement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(1): 119-131. doi: 10.22075/jtie.2022.25104.1572
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2022b. "Experimental study of modulus of elasticity, capillary absorption of water and UPV in nature-friendly concrete based on geopolymer materials". *Int J. Adv. Struct. Eng.*, 12(2): 607-615.
- Mansourghanaei, M. 2023a. "Investigating the mechanical and durability properties of geopolymer concrete based on granulated blast furnace slag as green concrete". *J. Civ. Eng. Res.*, 5(3): 24-34.
- Mansourghanaei, M. 2023b. "Evaluation of mechanical properties and microstructure of pozzolanic geopolymer concrete reinforced with polymer fiber". *J. Civ. Eng. Res.*, 5(2): 1-13.
- Mansourghanaei, M. and Mardookhpour, A. 2023. "Investigating the properties of environmentally friendly green concrete (Geopolymer) under high temperature". *Sustain. Earth Trends*, 3(4): 62-69.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2023a. "Experimental study of properties of green concrete based on geopolymer materials under high temperature". *Civ. Eng. Infrastruct. J.*, 56(2): 365-379.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2023b. "Experimental study of mechanical properties of slag geopolymer concrete under high temperature, used in road pavement". *Int. J. Transport. Eng.*, 11(1): 1371-1385.
- Mansourghanaei, M. 2024. "Experimental evaluation of the impact resistance of alkali-activated slag concrete under high temperature". *J. Civ. Eng. Res.*, 6(3): 47-53.
- Mansourghanaei, M. and Mardookhpour, A. 2024. "Analysis of the numerical results obtained from the experimental examination of the mechanical properties of geopolymer concrete". *Num. Meth. Civ. Eng.*, 9(1): 31-41.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2024a. "Durability and mechanical properties of granulated blast furnace slag based geopolymer concrete containing polyolefin fibers and nano silica". *KSCE J. Civ. Eng.*, 28(1): 209-219.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2024b. "Experimental study of the effects of adding silica nanoparticles on the durability of geopolymer concrete". *Austral. J. Civ. Eng.*, 22(1): 81-93.
- Mehdipour, S., et al. 2020. "Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures". *J. Clean. Prod.*, 254: 120126.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. 2014. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials". McGraw-Hill Education.
- Mirnezami, S., Hassani, A. and Bayat, A. 2024. "Evaluation of the effect of metallurgical aggregates (steel and copper slag) on mechanical properties of concrete in jointed plain concrete pavements (JPCP). *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 10(3), 52-66. doi: 10.22075/jtie.2024.36172.1705
- Mohammadi Janaki, A. and Hassani, A. 2019. "Durability of alkali-activated slag/silica fume (AASS) concrete pavement". *MCEJ*, 19(4): 161-171. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-24567-fa.html>

- Neupane, K., Des Chalmers and Kidd, P. 2018. "High-strength geopolymer concrete- properties, advantages and challenges". *Adv. Mater.*, 7(2): 15-25. doi: 10.11648/j.am.20180702.11
- Nuaklong, P., Sata, V. and Chindaprasirt, P. 2016. "Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties". *J. Clean. Prod.*, 112: 2300-2307.
- Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. 2022. "The effect of adding different pozzolans on mechanical properties and water absorption of pervious concrete pavement". *J. Transport. Res.*, 19(3): 51-66. doi: 10.22034/tri.2022.68092
- Pilehvar, S., DuyCao, V., Szczotok, A., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., . . and LenaKjønksen, A. 2018. "Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials". *Constr. Build. Mater.*, 173: 28-39.
- Rezaei Lori, A. and Hassani, A. 2019. "Evaluation of the effect of copper slag on the improvement of the properties of pervious concrete". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 4(4): 53-70. doi: 10.22075/jtie.2018.14580.1305
- Ryu, G. S., et al. 2013. "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators". *Constr. Build. Mater.*, 47: 409-418.
- Siddique, R. and Kaur, D. 2012. "Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures". *J. Adv. Res.*, 3(1): 45-51.
- Singh, B., et al. 2015. "Geopolymer concrete: A review of some recent developments". *Constr. Build. Mater.*, 85: 78-90.
- Taheri, V., Naseri Yalghouzaghaj, M. and Mohammadi, N. 2023. "Evaluation of the effect of micro-silica gel, polymer fibers, fly ash and RAP on the performance and durability of concrete pavers". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 9(4): 83-103. doi: 10.22075/jtie.2024.32473.1658
- Yüksel, İ., Siddique, R. and Özkan, Ö. 2011. "Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 967-972.
- Zhuang, X.Y., et al. 2016. "Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.*, 125: 253-267.