امکان‌سنجی استفاده از سنگدانه سبک و ضایعات سرامیک در بتن سبک خودمتراکم

مقاله علمی – پژوهشی

رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
دانیال نصر، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan_Babagoli@yahoo.com

دریافت:۱٤۰۳/۰۹/۰۱- پذیرش:۱٤۰٤/۰۳/۰۱
صفحه ۳۰۸-۲۹۳

چکیده

با توجه به محدودیت منابع سنگدانه‌های طبیعی، حفظ این مواد برای تولید بتن، از جمله بتن خودتراکم، در سال‌های اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است. از سوی دیگر، مدیریت و دفع محصولات جانبی به یکی از دغدغه‌های بزرگ جهانی تبدیل شده است. در دهه‌های گذشته، استفاده از مواد جایگزین مانند سنگدانه‌های سبک در تولید بتن خودتراکم افزایش یافته است. به کارگیری این محصولات جانبی به عنوان سنگدانه‌های سبک (چه درشت و چه ریز) نه تنها به توسعه پایدار بتن خودتراکم کمک می‌کند، بلکه تأثیرات مثبتی بر محیط زیست دارد. در این تحقیق، با جایگزینی سبک‌دانه‌های لیکا و سرامیک ضایعاتی به جای بخشی از سنگدانه‌های طبیعی، ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اسلامپ روانی تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند. نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی میان‌تهی بیشترین مقاومت فشاری (۳۸/۱ و ٤۲/۱ مگاپاسکال)، کششی (۵/۳ و ۶/۳ مگاپاسکال) و خمشی (۶/۲ و ۷/۵ مگاپاسکال) را به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان دادند. همچنین، نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی فولر کمترین جذب آب (۱/۷٪ و ۱/۲٪)، بیشترین مقاومت الکتریکی (۱۶/۵ و ۵۱/۳ کیلواهم سانتی‌متر) و کمترین عمق نفوذ (۱۶/۵ و ۸/۵ میلی‌متر) را در همان سنین داشتند. نتایج کلی نشان داد که نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی میان‌تهی از نظر مقاومت مکانیکی عملکرد بهتری داشتند، در حالی که نمونه‌های ساخته‌شده با دانه‌بندی فولر، که دارای دانه‌بندی ریزتر بودند، از نظر مقاومت الکتریکی و جذب آب نتایج بهتری ارائه دادند.

واژه‌های کلیدی: لیکا، سرامیک ضایعاتی، خصوصیات عملکردی، دوام، بتن سبک خودمتراکم

۱-مقدمه

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و کاهش سریع منابع سنگدانه‌های طبیعی، صنعت ساخت‌وساز را به سمت استفاده از محصولات جانبی و مواد زائد جامد سوق داده است. بتن به‌عنوان یک ماده کلیدی در ساخت‌وساز، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح به‌شمار می‌رود و تولید آن به میزان قابل‌توجهی مصالح طبیعی نیاز دارد. با این حال، استفاده از بتن سبک به دلیل کاهش وزن سازه و سهولت ساخت، یکی از راهکارهای کاهش مصرف مصالح و هزینه‌های ساخت‌وساز محسوب می‌شود. تحقیقات متعددی (مانند Agwa et al, 2020; Cui et al, 2012; Gao et al, 2015; Wang et al, 2019) به بررسی قابلیت‌های بتن سبک پرداخته‌اند. استفاده از بتن سبک در سازه‌هایی با دهانه‌های بلند و ساختمان‌های بلندمرتبه می‌تواند نه تنها هزینه‌های ساخت‌وساز را کاهش دهد، بلکه از نظر

پایداری سازه در برابر نیروهای طبیعی همچون زلزله نیز موثر واقع شود، زیرا کاهش جرم سازه به معنای کاهش نیروهای زلزله وارد بر آن است. یکی از چالش‌های اصلی در تولید بتن سبک، مشکلاتی در فرآیند اختلاط آن است. به‌دلیل چگالی کمتر سنگدانه‌های سبک، احتمال جدایی مواد و کاهش استحکام در این نوع بتن بیشتر است. بنابراین، استفاده از بتن خودمتراکم با کارایی بالا برای LWC توصیه می‌شود (Sobhani et al, 2023).

بتن سبک با استفاده از سنگدانه‌های کم چگالی مانند لیکا، پوکه، خاک رس منبسط شده، و مواد مصنوعی دیگر ساخته می‌شود که باعث کاهش چگالی بتن در محدوده ۱۴۴۰ تا ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در مقایسه با بتن معمولی (۲۲۵۰ تا ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) می‌شود (Agrawal et al, 2021).

کاربردهای بتن سبک شامل ساخت بلوک‌های پیش‌ساخته، دال‌ها و پانل‌ها است و مصالحی مانند پوکه و LECA به‌دلیل دسترسی و قیمت مناسب، گزینه‌های محبوبی در این حوزه به‌شمار می‌آیند. این روند به دلیل کاهش مصرف منابع طبیعی و کاهش وزن سازه‌ها، به سمت پایداری و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی هدایت شده و موجب شده که بتن سبک در ساخت‌وسازهای مدرن به یکی از راهکارهای اصلی تبدیل شود.

بتن سبک سازه‌ای به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد خود از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت کرنش کششی بهتر، و خواص حرارتی و صوتی بهبود یافته، به‌عنوان یکی از مصالح برتر در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. فضاهای خالی موجود در سنگدانه‌های سبک مانند لیکا، پوکه، و دیگر مواد، باعث می‌شود که این نوع بتن نه‌تنها وزن کمتری داشته باشد بلکه خواص عملکردی آن در برخی زمینه‌ها مانند عایق‌سازی و استحکام ارتقاء یابد. از مزایای استفاده از بتن سبک سازه‌ای می‌توان به کاهش سطح مقطع المان‌های سازه‌ای مانند ستون‌ها، تیرها، صفحات و پی‌ها اشاره کرد که منجر به کاهش استفاده از فولاد مسلح می‌شود. همین موضوع به کاهش هزینه‌های کلی ساخت‌وساز نیز کمک می‌کند. بتن سبک به طور مؤثر برای چندین سال در کاربردهای سازه‌ای به کار گرفته شده است، زیرا علاوه بر کاهش وزن خود سازه، به کاهش تراکم و هزینه‌های فونداسیون و ساختمان نیز کمک می‌کند. تحقیقات انجام‌شده توسط نیومن و همکاران نشان داد که استفاده از ترکیب لیکا به همراه ۵۲۰ کیلوگرم سیمان بر متر مکعب و ۲۰ درصد دوده سیلیس ممکن است به تولید بتنی با مقاومت فشاری ۷۰٫۵ مگاپاسکال و چگالی ۱۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب منجر شود (Newman et al, 2003).

همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط کان و همکاران، استفاده از ترکیب سنگدانه‌های بازالت و پوکه، ۴۵۰ کیلوگرم سیمان بر متر مکعب و ۱۰ درصد دوده سیلیس به تولید بتنی با مقاومت فشاری ۴۳٫۸ مگاپاسکال پس از ۹۰ روز و چگالی خشک ۱۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب انجامید.(Kan et al, 2009)

مطالعات اخیر نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند؛ برای مثال، لو و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از بتن سبک برزیلی توانستند بتنی با مقاومت فشاری ۵۳٫۶ مگاپاسکال در ۲۸ روز و چگالی خشک ۱۶۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب تولید کنند.

در نتیجه، استفاده از SLWC در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه در سازه‌های بلندمرتبه و پل‌ها، به دلیل کاهش وزن، کاهش مصرف مصالح، بهبود عملکرد حرارتی و صوتی و کاهش هزینه‌ها، انتخاب مناسبی به شمار می‌آید.

در دنیای امروز، با پیشرفت‌های چشمگیر در علم و صنایع مختلف، افزایش بهره‌وری و کیفیت مصالح ساختمانی مانند بتن همواره مدنظر بوده است. اما این پیشرفت‌ها اغلب به همراه آسیب‌هایی برای محیط‌زیست رخ داده است. از این رو، تلاش‌های بسیاری توسط محققان و مهندسان انجام می‌گیرد تا علاوه بر بهبود خواص مصالح، به محیط‌زیست نیز آسیبی وارد نشود. بتن، به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان، همچنان در حال افزایش استفاده است. دوام و کیفیت بتن از اهمیت بسیاری برخوردار است، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده. برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب بتن، روش‌های مختلفی مانند لرزاندن آن به منظور کاهش تخلخل و هوا در بتن استفاده می‌شود. اما در برخی شرایط، نظیر کمبود نیروی ماهر یا تراکم زیاد میلگردها در سازه‌های بتنی، عمل لرزاندن به درستی انجام نمی‌گیرد که در نتیجه آن بتن ممکن است به خواص مطلوب خود نرسد. یکی از پیشرفت‌های مهم در صنعت بتن، توسعه بتن خودتراکم است. بتن خودتراکم به دلیل سهولت در اجرا، نیاز به لرزاندن ندارد و به راحتی می‌تواند در قالب‌های پر میلگرد جریان یابد. این ویژگی باعث کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت ساخت‌وساز می‌شود. همچنین، استفاده از بتن خودتراکم به دلیل ترکیب اقتصادی و سهولت در

دستیابی به اجزای تشکیل‌دهنده، به عنوان یکی از مصالح پرکاربرد در صنعت ساخت‌وساز شناخته شده است.

بتن، به دلیل مقاومت بالایی که در برابر آب و شرایط مهاجم دارد، از گذشته‌های دور تا امروز یکی از مصالح اصلی برای ساخت سازه‌های آبی مانند سدها، کانال‌ها، لوله‌های انتقال آب و مخازن ذخیره‌سازی آب بوده است. این مقاومت بتن در برابر شرایط خورنده و مهاجم، آن را به یکی از مصالح کلیدی برای استفاده در محیط‌های صنعتی و طبیعی تبدیل کرده است.

در عین حال، توجه به محیط‌زیست و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی یکی از دغدغه‌های اصلی در صنایع مختلف از جمله صنعت ساخت‌وساز است. یکی از مسائل مهمی که به محیط‌زیست آسیب می‌رساند، تولید سیمان و دی‌اکسید کربن ناشی از آن است. در این راستا، استفاده از مواد ضایعاتی در تولید بتن به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر پیشنهاد شده است. این رویکرد می‌تواند به کاهش زباله‌های ساختمانی و همچنین کاهش مصرف سیمان کمک کند.

در نهایت، استفاده از مواد ضایعاتی و بازیافتی در بتن نه تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند بلکه می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های بتن از جمله دوام و پایداری آن شود. به این ترتیب، صنعت بتن‌سازی می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی خود ایفا کند و در عین حال به نیازهای فنی و اقتصادی پروژه‌های ساختمانی پاسخ دهد (توکلی، ۱۳۹۲).

کاشی و سرامیک از مواد پرمصرف در سازه‌ها هستند که سالانه میلیون‌ها مترمربع تولید می‌شوند و ضایعات زیادی نیز به دنبال دارند. ایران با تولید حدود ۴۰۰ میلیون مترمربع کاشی در سال، رتبه پنجم جهانی را در این صنعت دارد. ضایعات این مواد در مراحل مختلف تولید، حمل‌ونقل، توزیع، و تخریب ساختمان‌ها ایجاد می‌شود. به‌ویژه، ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها مقدار قابل توجهی از این زباله‌ها را تشکیل می‌دهند. تخمین زده می‌شود که بین ۳ تا ۷ درصد از تولید روزانه سرامیک به ضایعات تبدیل شود. با توجه به اینکه این مواد قابلیت بازیافت مجدد در چرخه تولید را ندارند، به‌صورت زباله‌های ساختمانی در محیط زیست رها می‌شوند و مشکلات زیست‌محیطی بسیاری ایجاد می‌کنند. در راستای کاهش این مشکلات، تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده مجدد از ضایعات کاشی و سرامیک در ساخت‌وساز انجام شده است. به‌طور مثال، در تحقیق توکلی و همکاران (۱۳۹۰)، ضایعات کاشی به‌عنوان یک ماده پوزولانی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها کاشی‌های ضایعاتی را به پودر تبدیل کرده و به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن به کار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضایعات کاشی می‌توانند به‌عنوان یک پوزولان عمل کنند و خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشند. با جایگزینی ۱۰ تا ۴۰ درصد سیمان با پوزولان کاشی، مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف بررسی شد. هرچند کاهش مقاومت در سن ۷ روز مشاهده شد، اما در سنین بالاتر بتن تقویت شد. در تحقیق دیگری توسط تسو و لوبل (۲۰۱۲)، خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن سرامیکی سبک بررسی شد. آن‌ها از فسفات منیزیم به‌عنوان جایگزین سیمان پرتلند استفاده کردند. این ماده باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش استحکام سریع‌تر بتن شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری و چگالی بتن کاهش می‌یابد. همچنین، مدول الاستیک، مدول گسیختگی و مقاومت برشی مستقیم بتن نیز با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش یافتند.

در مجموع، استفاده از ضایعات کاشی و سرامیک در صنعت بتن نه تنها به کاهش زباله‌های ساختمانی کمک می‌کند، بلکه خواص مکانیکی و اقتصادی مطلوبی برای بتن به ارمغان می‌آورد. این رویکرد می‌تواند به بهبود وضعیت محیط‌زیست و کاهش مصرف سیمان، یکی از منابع بزرگ آلایندگی، منجر شود. تحقیق گجراتی و همکاران (۱۳۹٤) به بررسی تأثیر استفاده از ضایعات چینی بهداشتی به عنوان درشت‌دانه در بتن پرداخته است. این مطالعه نشان می‌دهد که جایگزینی شن با ضایعات چینی به میزان ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. تا ۹ درصد جایگزینی، این مواد نه تنها به دفع ضایعات و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند، بلکه خصوصیات مکانیکی بتن نیز بهبود می‌یابد. این یافته‌ها استفاده از ضایعات چینی بهداشتی را به‌عنوان جایگزینی مناسب در بتن توصیه می‌کنند. در تحقیق ابراهیم و همکاران (۲۰۲۰) نیز، استفاده از لیکا در بتن سبک سازه‌ای بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که استفاده از لیکا و جایگزینی سیمان پرتلند با ۵ و ۷ درصد سرباره و فوم سیلیکا، باعث کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی وزن بتن در مقایسه با بتن معمولی می‌شود.

همچنین مقاومت فشاری بتن سبک سازه‌ای حاوی لیکا به سطح مطلوبی رسید و از لحاظ عایق حرارتی نیز نسبت به بتن معمولی برتری داشت.

استفاده از بتن خودمتراکم، که نیازی به نیروی کار ماهر برای تراکم بتن ندارد، همراه با کاربرد دانه‌های سبک مانند لیکا، امکان تولید بتن سبک را به روشی ساده و مؤثر فراهم می‌کند. ضایعات سرامیک نیز به دلیل مشکلات بازیافت در تولید، می‌توانند به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در بتن به کار روند، که علاوه بر حفظ یا بهبود مقاومت بتن، به کاهش ضایعات محیط‌زیستی و مصرف منابع طبیعی کمک می‌کند.

به‌طور کلی، جایگزینی سرامیک ضایعاتی و لیکا در بتن نه تنها به بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن سازه‌ها کمک می‌کند، بلکه از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی نیز مزایای قابل توجهی دارد.

۲- مواد و مصالح مصرفی

سیمان پرتلند نوع ۲، دانه‌های سبک لیکا، ضایعات سرامیکی، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه (از جمله شن و ماسه طبیعی)، آب و فوق‌روان‌کننده‌ها، از جمله مواد به‌کاررفته در این مطالعه هستند که در ادامه توضیحاتی در مورد هر یک از آن‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۱- سیمان

سیمان به‌کاررفته در این پژوهش، سیمان پرتلند نوع ۲-۴۲۵ کارخانه اردستان است که مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ (ISIRI ٤) تولید می‌شود. این نوع سیمان برای ساخت بتن‌هایی که نیاز به حرارت هیدراتاسیون متوسط دارند و همچنین در معرض حمله سولفات‌ها به میزان متوسط قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. ویژگی‌های شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲-سبک‌دانه لیکا

ترکیب شیمیایی لیکا در جدول ۲ ارائه شده است. این ماده از طریق حرارت دادن خاک رس در کوره‌های متحرک در دماهای بالا تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود. محصول نهایی به صورت دانه‌های کروی شکل و با سطحی ناهموار به بازار عرضه می‌شود و در اندازه‌های مختلف وجود دارد. داخل سنگدانه دارای بافت اسفنجی سیاه با تخلخل ۷۳ تا ۸۸ درصد است. تخلخل بالای سنگدانه به بهبود ویژگی‌هایی چون وزن کم، هدایت حرارتی پایین، کاهش سر و صدا و مقاومت بالا در برابر ضربه کمک می‌کند. همچنین، سنگدانه‌ها دارای پوششی به ضخامت حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند که نسبت به بافت داخلی، جذب کمتری دارد. رنگ لیکا به مواد معدنی، روش تولید و کیفیت آن وابسته است.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق با استاندارد ملی ایران ۱۶۹۲

ویژگی شیمیایی		سیمان پرتلند تیپ ۲	شماره استاندارد ملی ایران برای روش آزمون مربوطه
CA درصد وزنی سیمان	حداکثر مقدار مجاز	۸	۱۶۹۲
کاهش وزن ناشی از سرخ شدن (درصد وزنی)	حداکثر مقدار مجاز	۳	۱۶۹۲
میزان باقیمانده نامحلول (درصد وزنی)	حداکثر مقدار مجاز	۰/۷۵	۱۶۹۲
SiO_2 (درصد وزنی سیمان)	حداکثر مقدار مجاز	۲۰	۱۶۹۲
Al_2O_3 (درصد وزنی سیمان)	حداکثر مقدار مجاز	٦	۱۶۹۲
Fe_2O_3 (درصد وزنی سیمان)	حداکثر مقدار مجاز	٦	۱۶۹۲
MgO (درصد وزنی سیمان)	حداکثر مقدار مجاز	۵	۱۶۹۲

لیکا معمولاً به رنگ قهوه‌ای است و این سنگدانه‌ها به‌طور کلی در سه حالت ریز، درشت و مخلوط با چگالی‌های ۱۱۲۰، ۸۸۰ و ۱۰۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق، از نوع ریز لیکا با درصد جذب آب ۱۲ و ۲۸ درصد برای دوره‌های خیساندن ۰,۵ و ۷۲ ساعت استفاده شده است.

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سبک‌دانه‌ی لیکا

نماد مواد شیمیایی	نام مواد	درصد موجود
SiO_2	سیلیس	-
Al_2O_3	آلومینا	۷/۰۱
K2O	اکسید پتاسیم	۰/۶۹
Na_2O	اکسید سدیم	۱/۹۹
H2O	آب	۰/۸۴
Fe_2O_3	اکسید آهن	۶۶/۰۵
TiO_2	دی‌اکسید تیتانیوم	۰/۹
CaO	اکسید کلسیم	۱۶/۵۷
MgO	اکسید منیزیم	۲/۴۶
SO_3	اکسید سولفات	۰/۲۱
P_2O	اکسید فسفات	۲/۶۹

۲-۳-سرامیک ضایعاتی

ضایعات سرامیک معمولاً به چندین شکل تولید می‌شوند. بخشی از این ضایعات در کارخانه‌ها و در حین و پس از فرآیند تولید به علت خطاهای ساخت، اشتباهات انسانی یا استفاده از مواد اولیه نامناسب به وجود می‌آید. همچنین، بخش دیگری از آن‌ها در حین حمل و نقل و بیشتر آن‌ها نیز به دنبال تخریب ساختمان‌ها و ضایعات باقی‌مانده از آن‌ها تولید می‌شود. ماهیت این مواد به گونه‌ای است که نمی‌توان آن‌ها را دوباره در چرخه تولید به کار گرفت و عملاً غیرقابل استفاده باقی می‌مانند؛ این امر باعث می‌شود که به عنوان زباله‌های ساختمانی به محیط زیست آسیب بزنند. بنابراین، با توجه به میزان تولید این ضایعات و روند رو به رشد صنعت سرامیک، توجه به استفاده مجدد از این مواد به شدت ضروری است (توکلی و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از راهکارهای مطرح‌شده برای استفاده دوباره از سرامیک‌ها، به‌کارگیری آن‌ها در بتن است. این مواد می‌توانند به صورت ریزدانه، درشت‌دانه یا پودر به عنوان جایگزین سیمان در بتن استفاده شوند. در این پژوهش، از سرامیک ضایعاتی به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه (ماسه) در ملات استفاده خواهد شد. همچنین، برای خرد کردن سرامیک ضایعاتی و دستیابی به دانه‌بندی مورد نظر از دستگاه لس‌آنجلس بهره گرفته شده و بر اساس طرح اختلاط و دانه‌بندی‌های مطلوب فولر و میان تهی، دانه‌بندی انجام شده تا درصد سرامیک ضایعاتی باقی‌مانده بر روی هر الک به‌دست آید.

جدول ۳ مشخصات و درصد ترکیبات شیمیایی طرامیک ضایعاتی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات و درصد ترکیبات شیمیایی سرامیک ضایعاتی

مشخصات شیمیایی	درصد
MnO	۰/۰۰۲
P_2O_5	۰/۱
K_2O	۳/۹۶
MgO	۰/۷
CaO	۰/۰۴
TiO_2	۰/۹
Fe_2O_3	۳/۲۶
Al_2O_3	۲۰/۳۴
SiO_2	۶۵/۱۵
LOI	۴/۵۴
SO_3	۰/۰۶

۲-۴- ماسه طبیعی

به طور کلی، تقسیم‌بندی یک نمونه از دانه‌ها به اندازه‌های یکسان، فرآیند دانه‌بندی نامیده می‌شود و هدف آن تعیین درجه‌بندی و توزیع ذرات مختلف در یک نمونه انتخابی است. در آزمایش دانه‌بندی، مصالح خشک شده با لرزاندن از روی الک‌های مختلف عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌ها روی هر الک و مقدار آن‌ها مشخص می‌گردد. بتن مورد بررسی به دلیل خاصیت خودمتراکم بودن، هنگام بتن‌ریزی به آسانی روی یکدیگر لغزیده و تمام فضای قالب را پر می‌کند. ماسه مصرفی بر اساس دانه‌بندی‌های فولر و میان تهی طبق طرح اختلاط دانه‌بندی شده است. به این صورت که درصد وزن باقیمانده بر روی هر یک از الک‌های ریزدانه، بر اساس دو دانه‌بندی ذکر شده محاسبه و مطابق با استاندارد ASTM C778 در بتن استفاده گردید.

۲-۵- شن طبیعی

نوع و مقدار شن مصرفی، همانند ماسه، در ویژگی‌های مکانیکی بتن نقش مهمی ایفا می‌کند. در این تحقیق، شن مورد

استفاده از نوع شکسته (تیزگوشه) با اندازه ۱۲/۵-۵ میلی‌متر انتخاب شده است.

چگالی خشک آن ۲/۵۱۸ کیلوگرم بر متر مکعب، چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۵۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی ظاهری آن ۲/۵۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. مشابه با ماسه، این شن نیز با استفاده از الک‌های درشت‌دانه و بر اساس دانه‌بندی فولر و میان تهی، طبق طرح اختلاط دانه‌بندی شد و برای استفاده در بتن مطابق با استاندارد ASTM C127-88 آماده گردید. برای تعیین مقدار آب اختلاط بتن، لازم است که میزان آب مورد نیاز برای عمل هیدراتاسیون و همچنین مقدار آب جذب‌شده توسط سنگ‌دانه‌ها محاسبه شود. جذب آب به معنی افزایش وزن سنگ‌دانه‌ها به‌خاطر آبی است که در منافذ آن‌ها وجود دارد و به‌عنوان درصدی از وزن خشک سنگ‌دانه‌ها بیان می‌شود. بر این اساس، مقدار جذب آب برای لیکا ۱۰۷ درصد، برای سرامیک ٤/۹ درصد، برای ماسه ۱/٦ درصد و برای شن ۱/۲ درصد محاسبه شده است.

۲-٦- آب

آب در بتن به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

-به‌عنوان یکی از اجزا تشکیل‌دهنده بتن یا ملات در هنگام ساخت.

-برای عمل‌آوری

کیفیت آب به‌دلیل وجود ناخالصی‌ها ممکن است باعث اختلال در فرآیند گیرش، اثرات منفی بر مقاومت بتن یا ملات، ایجاد لکه‌های روی سطح بتن یا ملات و حتی خوردگی آرماتورها شود. بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، آب قابل شرب که طعم و بوی مشخصی ندارد و تمیز و شفاف است، می‌تواند در بتن یا ملات استفاده شود. همچنین، آب غیرشرب در صورتی که pH آن بین ۵ تا ۸,۵ باشد و مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته‌شده با این آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه حداقل ۹۰ درصد مقاومت نمونه‌های ساخته‌شده با آب مقطر باشد، قابل استفاده است. اگر مقدار مواد جامد معلق، مواد محلول و یون‌های سولفات و کلر موجود در آن کمتر از مقادیر مجاز باشد، می‌توان از آن در بتن یا ملات استفاده کرد. در این پژوهش، از آب شرب (لوله‌کشی شهر اصفهان) استفاده شده است.

۲-۷- فوق روان‌کننده

فوق‌روان‌کننده‌ای که در این پژوهش استفاده شده، از شرکت ساختمان شیمی و با نام تجاری ابر روان‌کننده ممتاز Sashimi914 است. این فوق‌روان‌کننده که بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر تولید شده، عملکرد بسیار بالایی دارد و قابلیت کاهش چشمگیر نسبت آب به سیمان را برای تولید بتن مقاوم بدون نیاز به افزایش مقدار سیمان دارد. همچنین، این ماده باعث کاهش آب اختلاط در حالی که روانی ثابت حفظ می‌شود، کاهش تخلخل‌های نامنظم بتن به دلیل افزایش تراکم و غلظت، کاهش نفوذپذیری بتن، و افزایش مقاومت اولیه و نهایی بتن به علت کاهش آب مصرفی می‌گردد. این فوق‌روان‌کننده همچنین ماندگاری بالای کارایی بتن را تا پایان مراحل بتن‌ریزی تضمین می‌کند. مشخصات شیمیایی و فیزیکی این فوق‌روان‌کننده در جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ٤. مشخصات فنی فوق روان‌کننده‌ی پلی‌کربوکسیلات مورد استفاده در مطالعه

رنگ	قهوه‌ای روشن
قابلیت انحلال	آب
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص	۱/۲۰ ± ۰/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب
دما مورد نیاز	۲۰ درجه سانتی‌گراد
میزان مصرف	۰/۲ تا ۰/۷ درصد وزن سیمان
میزان یون کلر	صفر
مواد قلیایی	کمتر از معادل ۵ گرم Na2O در هر لیتر
میزان هوازایی	در صورت استفاده از درصدهای فوق، حدود ۲ درصد به میزان هوا اضافه می‌گردد.

۳- طرح اختلاط مورد استفاده

طرح اختلاط به کار رفته در این پژوهش بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی در جداول ۵ و ٦ ارائه شده است. در این جداول، حرف N به معنی طبیعی بودن سنگدانه‌ها (Natural) است، در حالی که لیکا با حرف L، سرامیک با حرف C، دانه‌بندی فولر با حرف F و دانه‌بندی میان‌تهی با حرف M مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است که مصالح طبیعی درشت‌دانه شامل شن با اندازه ۱۲-۵ میلی‌متر و مصالح ریزدانه شامل ماسه با اندازه ۵-۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، طرح‌های ۱ به عنوان

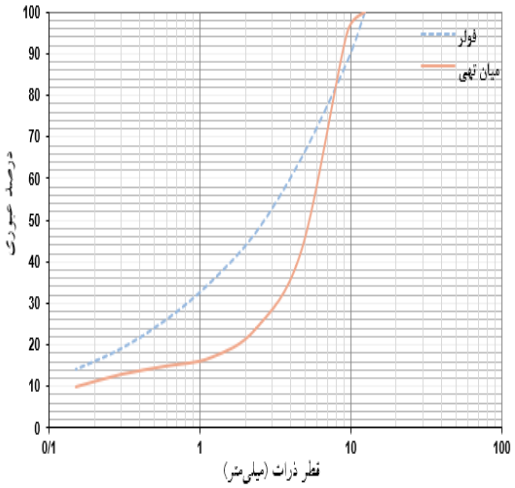
طرح‌های شاهد برای هر دانه‌بندی در نظر گرفته شده‌اند. نمودار دانه‌بندی فولر و میان‌تهی در شکل ۱ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار دانه‌بندی، در دانه‌بندی فولر، مجموع وزن باقی‌مانده بر روی الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۳۵ و ٦۵ درصد است، در حالی که در دانه‌بندی میان‌تهی، این مقادیر به ترتیب ۵۷٪ و ۴۳٪ می‌باشند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دانه‌بندی فولر ریزدانه‌تر و دانه‌بندی میان‌تهی درشت‌دانه‌تر است.

جدول ۵. طرح اختلاط مورد استفاده بر اساس دانه‌بندی فولر

ردیف	کد طرح	درشت دانه (kg/m³)	ریزدانه (kg/m³)	سیمان (kg/m³)	آب آزاد (kg/m³)	آب به سیمان	فوق روان کننده (kg/m³)
۱	NN_F	طبیعی ٦۴۷	طبیعی ۱۲۰۱	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۲	NL_F	طبیعی ٦۴۷	لیکا ۱۱۴	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۳	CL_F	سرامیک ۵۴۷	لیکا ۱۱۴	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵

جدول ٦. طرح اختلاط مورد استفاده بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی

ردیف	کد طرح	درشت دانه (kg/m³)	ریزدانه (kg/m³)	سیمان (kg/m³)	آب آزاد (kg/m³)	آب به سیمان	فوق روان کننده (kg/m³)
۱	NN_M	طبیعی ۱۰۵۴	طبیعی ۷۹۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۲	NL_M	طبیعی ۱۰۵۴	لیکا ۷۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۳	CL_M	سرامیک ۸۹۱	لیکا ۷۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی فولر و میان‌تهی طرح‌های اختلاط

٤- روش انجام آزمایش‌ها

٤-۱-آزمایش‌های بتن خودمتراکم سبک در حالت تازه

در مرحله اول، به منظور ارزیابی کارایی و روانی، آزمایش‌های بتن خودمتراکم سبک در حالت تازه انجام شد. سپس برای بررسی مشخصات مکانیکی و دوام، آزمایش‌ها در حالت سخت شده اجرا گردید. آزمایش‌های مربوط به حالت تازه شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش حلقه **J**، آزمایش مخروط جریان با قیف V شکل بودند. در حالی که آزمایش‌های مربوط به حالت سخت شده شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت الکتریکی و مهاجرت یون کلر بود. همچنین در این تحقیق از قالب‌های فولادی مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر، قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و تیرهای خمشی با ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر برای ساخت نمونه‌هایی که آزمایش‌های کنترل مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی آن‌ها انجام می‌شود، استفاده شد.

٤-۱-۱-آزمایش جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها برای سنجش بتن خودمتراکم است. در این آزمایش، قطر دایره‌ای که بعد از بلند کردن مخروط ایجاد می‌شود، به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری روانی بتن در نظر گرفته می‌شود. همچنین زمان لازم برای رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر به عنوان معیاری از ویسکوزیته بتن محسوب می‌گردد. در این مطالعه، آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد (ASTM C1611) انجام شد.

٤-۱-۲- آزمایش حلقه J

آزمایش حلقه **J** یکی از کاراترین و آسان‌ترین روش‌ها برای ارزیابی قابلیت عبور بتن خودمتراکم در آزمایشگاه و به‌ویژه در کارگاه‌هاست. این حلقه می‌تواند به همراه آزمایش جریان اسلامپ و قیف V شکل به‌کار رود تا ترکیبی از خاصیت پرکنندگی و عبور بتن را مشخص کند. روش انجام این آزمایش مشابه روش موجود در آزمایش جریان اسلامپ است. هم‌چنین جهت تفسیر بتن با کمک حلقه **J** از جدول ۷ استفاده می‌شود.

جدول ۷. تفسیر بتن با کمک حلقه J

تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقید (میلی‌متر)	درجه عبور	ملاحظات
۰-۲۵	۰	توانایی عبور زیاد
۲۵-۵۰	۱	توانایی عبور متوسط
>۵۰	۲	توانایی عبور کم

٤-۱-۳- آزمایش مخروط جریان با قیف V شکل

در این آزمایش، از یک قیف V شکل استفاده می‌شود که با تعیین زمان خروج بتن از آن، قابلیت پرکردن (روانی) بتن مشخص می‌شود. حجم قیف ۱۲ لیتر است و این وسیله برای بتن‌هایی با حداکثر اندازه سنگدانه ۲۰ میلی‌متر کاربرد دارد. این آزمایش به‌عنوان روشی برای ارزیابی توانایی پرکنندگی بتن خودتراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان در این آزمایش یکی از عوامل مهم است که باید به‌دقت مورد توجه قرار گیرد. پخش‌شدگی در این آزمایش نشان‌دهنده درجه وابستگی تا چسبندگی مخلوط بتن است.

٤-۲-آزمایش‌های بتن خودمتراکم سبک در حالت سخت شده

در این مرحله، آزمایش‌های مختلفی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت الکتریکی و مهاجرت یون کلر انجام شد که در ادامه به تشریح این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

٤-۲-۱-مقاومت فشاری

در این مطالعه، نمونه‌های مکعبی برای تعیین مقاومت مشخصه بتن با طرح‌های مختلف در نظر گرفته شدند و در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. در هر سری از آزمایش‌ها، سه نمونه برای تعیین مقاومت فشاری آزمایش شدند تا میانگین این نمونه‌ها به‌دست آید و اثر پراکندگی نتایج کاهش یابد.

٤-۲-۲- مقاومت کششی

این آزمایش که به آزمایش برزیلی یا شکافت معروف است، برای تعیین مقاومت کششی بتن به‌کار می‌رود و بر اساس استاندارد (ASTM C496) انجام می‌شود. در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. نمونه استوانه‌ای پس از قرار گرفتن در گیره نگهدارنده، به‌گونه‌ای زیر جک دستگاه مقاومت فشاری قرار می‌گیرد که نیروی اعمالی از سوی جک در امتداد ارتفاع نمونه و بر سطح جانبی آن وارد شود. محاسبه مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۱) صورت می‌گیرد.

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (۱)$$

در این رابطه، T نشان‌دهنده مقاومت کششی به واحد مگاپاسکال، P بار اعمال شده به واحد نیوتن، L طول نمونه به میلی‌متر و D قطر نمونه نیز به میلی‌متر است. برای انجام آزمایش مقاومت کششی در این مطالعه، نمونه‌های استوانه‌ای با طرح‌های مختلف تهیه شدند و سپس در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در هر سری از آزمایش، سه نمونه برای به‌دست آوردن میانگین مقاومت کششی مورد آزمایش قرار گرفتند.

٤-۲-۳-مقاومت خمشی

برای انجام آزمون تعیین مقاومت خمشی، تیرهای خمشی به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه، مطابق با استاندارد (INSO 17331) که بر اساس استاندارد (ASTM C293) تنظیم شده است، مورد آزمون قرار گرفتند. به‌این‌ترتیب، نمونه‌ها بلافاصله پس از خارج شدن از عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند تا از بروز هرگونه جمع‌شدگی در سطح بتن جلوگیری شود. مقاومت خمشی به‌عنوان مدول گسیختگی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، R) نمایانگر مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال، P حداکثر بار اعمال شده توسط جک بر حسب نیوتن ، L طول دهانه بر حسب میلی‌متر، b عرض متوسط نمونه در نقطه شکست بر حسب میلی‌متر و (d) عمق متوسط نمونه

در نقطه شکست بر حسب میلی‌متر می‌باشد. شایان ذکر است که در هر سری از آزمایش برای تعیین مقاومت خمشی نیز، ۳ نمونه به منظور محاسبه میانگین نتایج مورد آزمایش قرار گرفت.

٤-۲-٤-جذب آب و وزن مخصوص

جذب آب یکی از ویژگی‌های بتن است که نشان‌دهنده خصوصیات ریزساختار بتن از نظر خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد (ASTM C642-97) با استفاده از آون در دمای ۵ ± ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های مکعبی در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد.

٤-۲-۵- مقاومت الکتریکی

خواص الکتریکی بتن یک ویژگی کاربردی است که نشان‌دهنده نفوذپذیری و میزان جذب آب آن می‌باشد. یکی از روش‌های تعیین مقاومت الکتریکی بتن، مطابق با استاندارد (AASHTO 358-17)، استفاده از روش چهار نقطه‌ای با پروب ونر است. نتایج این روش نشان می‌دهد که هرچه مقاومت الکتریکی بالاتر باشد، نفوذ املاح مضر به بتن کمتر و دوام آن بیشتر است. به این ترتیب، روش چهار نقطه‌ای با استفاده از دستگاهی انجام می‌شود که دارای چهار الکترود است و این الکترودها روی سطح نمونه بتن قرار گرفته و مقاومت الکتریکی نمونه تا عمق مشخصی اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده و نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

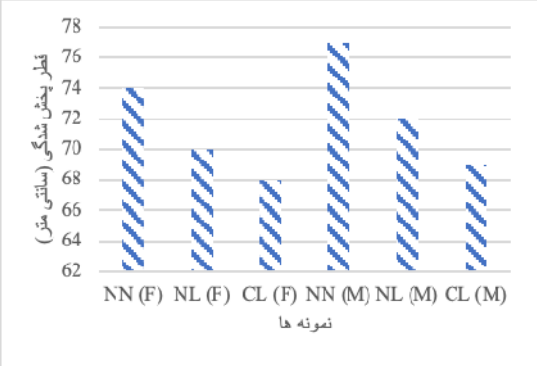
٤-۲-٦-مهاجرت یون کلر

این آزمایش به‌منظور شبیه‌سازی شرایط غیرپایدار و ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید انجام می‌شود و بر اساس استاندارد (AASHTO-TP64) روی مخلوط‌های مختلف اجرا شده است. در این روش، از نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر که از بریدن نمونه‌های استوانه‌ای به‌دست آمده‌اند، استفاده گردید. نمونه‌ها پس از اشباع با آب، درون غلاف لاستیکی قرار گرفتند و سطح پیرامونی آن‌ها ایزوله شد. سپس محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۳ نرمال به داخل غلاف لاستیکی ریخته شد و با سطح بالایی نمونه بتنی در تماس قرار گرفت. این مجموعه سپس در ظرفی حاوی محلول نمک (سدیم کلرید) با غلظت ۱۰ درصد قرار داده شد، به‌گونه‌ای که سطح پایینی نمونه با محلول نمک در تماس بود.

۵-نتایج

۵-۱-اسلامپ

در شکل ۲، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش جریان اسلامپ نشان داده شده است. تمامی طرح‌های مورد بررسی در این مطالعه در محدوده مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند، که این نشان‌دهنده کیفیت و کارایی مناسب بتن خودمتراکم است. این نتیجه تأیید می‌کند که ترکیبات مورد استفاده در بتن نه تنها قابلیت عبور و پرکنندگی خوبی دارند، بلکه به‌خوبی به ویژگی‌های روانی و کارایی بتن کمک می‌کنند.



شکل۲. آزمایش اسلامپ

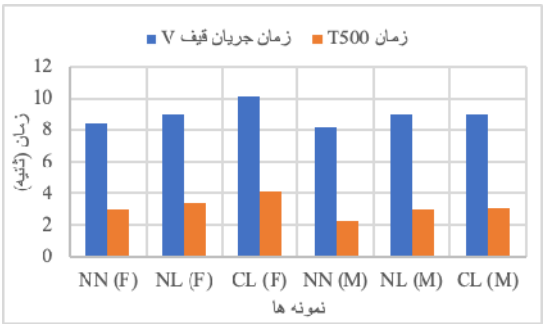
۵-۲-حلقه‌ی J

همان‌طور که اشاره شد، تفاوت بین نتایج آزمایش جریان اسلامپ و آزمایش حلقه **J** می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی قابلیت عبور بتن از میان آرماتورها مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به جدول ۷، مشاهده می‌شود که تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه **J** و جریان اسلامپ غیرمقید در محدوده‌ی ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر قرار دارد. این نشان‌دهنده درجه ۱ و توانایی عبور متوسط برای هر ٦ طرح مورد بررسی است.

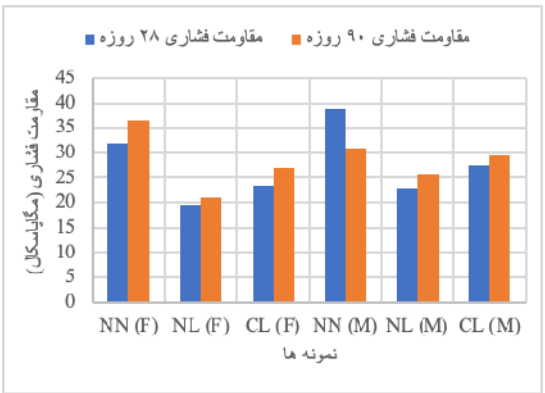
این نتایج به این معناست که بتن‌های خودمتراکم مورد استفاده در این تحقیق دارای قابلیت عبور مناسبی از میان آرماتورها هستند، که این ویژگی برای استفاده در سازه‌های با آرماتوربندی متراکم بسیار حیاتی است.

۵-۳-قیف V

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بتن‌های خودمتراکم می‌توانند با زمان‌های تخلیه متفاوت، به‌ویژه در محدوده‌های کم‌تر از ٦ ثانیه یا بیش از ۱۲ ثانیه، به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گیرند. زمانی که زمان تخلیه بتن بیش‌تر از ۱۲ ثانیه باشد، این به معنای لزجت خمیری زیاد است که می‌تواند تأمین کارایی مورد نیاز بتن را با مشکل مواجه کند. از سوی دیگر، اگر زمان تخلیه بتن کم‌تر از ٦ ثانیه باشد، نشان‌دهنده لزجت کم و احتمال وقوع پدیده جداشدگی است که می‌تواند منجر به کاهش کیفیت بتن شود. در شکل ۳، نتایج به‌دست آمده از این آزمایش به‌خوبی نمایش داده شده است و می‌توان از آن برای درک بهتر تأثیر زمان تخلیه بر خصوصیات کارایی و لزجت بتن‌های خودمتراکم استفاده کرد. این اطلاعات به مهندسان و طراحان کمک می‌کند تا در انتخاب زمان مناسب تخلیه و تنظیم نسبت‌های مخلوط برای دستیابی به بتن‌های با کیفیت و عملکرد مطلوب، تصمیم‌گیری نمایند.



شکل۳. آزمایش قیف V



شکل ٤. تغییرات مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال

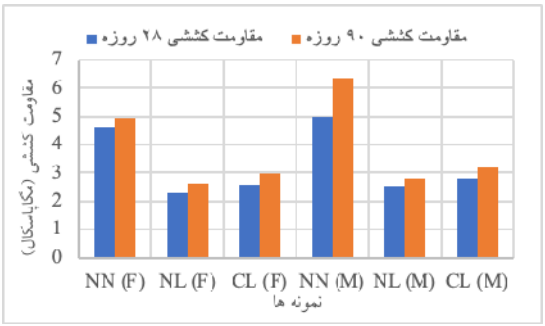
۵-٤- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰,۲ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. این آزمایش به‌منظور ارزیابی توانایی بتن در تحمل بارهای فشاری و سنجش کیفیت نهایی آن در دو مرحله ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری، در شکل ٤ به تصویر کشیده شده است. این نتایج می‌توانند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد بتن‌های خودمتراکم در مدت زمان‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرند و به شناخت بهتر از روند بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در طول زمان کمک کنند.

در دسته‌بندی اختلاط‌های بتن خودمتراکم، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا (CLF) در مقایسه با طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی دارای کاهش مقاومت فشاری برابر ۰/۲۸ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. همچنین، طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا (NLF) نیز در مقایسه با طرح شاهد، کاهش مقاومتی برابر ۰/٤۱ را در همان سنین نشان داد. در دسته‌بندی بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا (CLM) نسبت به طرح طبیعی- طبیعی (NNM) کاهش مقاومت ۰/۳۲ را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز داشت، در حالی که طرح طبیعی- لیکا (NLM) نیز به ترتیب کاهش‌های ۰/٤۲ و ۰/٤۰ را در این سنین ثبت کرد. این نتایج حاکی از این است که استفاده از سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم می‌تواند به بهبود مقاومت فشاری کمک کند. در نهایت، طرح (NNM) بالاترین مقاومت فشاری را با مقادیر ۳٤/٦ و ۳۷/۲ مگاپاسکال به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به خود اختصاص داد، در حالی که طرح (NLF) کم‌ترین مقاومت را با مقادیر ۱۷/۲ و ۱۹/۳ مگاپاسکال ثبت کرد.

۵-۵- مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۰۲ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. نتایج این آزمایش که برای تعیین مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد، در شکل ۵ نشان داده شده است. این آزمایش به‌منظور بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن خودمتراکم و ارزیابی عملکرد آن در برابر تنش‌های کششی صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده اطلاعات مهمی درباره پایداری و دوام بتن در برابر شرایط مختلف بارگذاری ارائه می‌دهند.

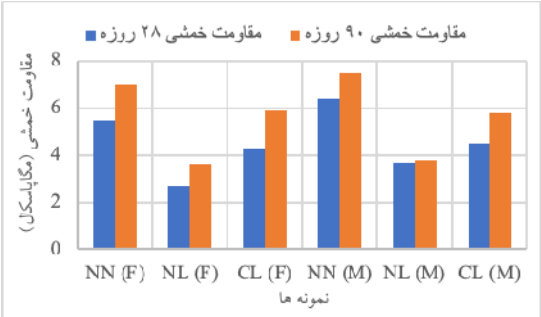


شکل ۵. تغییرات مقاومت کششی برحسب مگاپاسکال

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، نتایج نشان می‌دهد که میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی برابر ۰/۴۱ و ۰/۳۷ به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. همچنین، در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا، این میزان کاهش مقاومت نسبت به طرح شاهد برابر ۰/۵۵ و ۰/۵۳ به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز گزارش شده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی برابر ۰/۴۴ و ۰/۳۸ به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا نسبت به طرح شاهد نیز ۰/۵ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ثبت شده است. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم می‌تواند موجب بهبود مقاومت کششی نسبت به طرح‌هایی با سنگدانه‌های طبیعی و لیکا شود. در نهایت، طرح طبیعی- لیکا که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، بالاترین مقاومت کششی را با مقادیر ۴/۸ و ۵/۵ مگاپاسکال در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه از خود نشان داد، در حالی که طرح سنگدانه‌های طبیعی و لیکا با دانه‌بندی فولر کم‌ترین مقاومت کششی را با مقادیر ۲ و ۲/۴ مگاپاسکال به‌ترتیب در سنین مذکور داشت.

۵-۶-مقاومت خمشی

نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ٦ ارائه شده است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد خمشی مختلف طرح‌های اختلاط بتن خودمتراکم در زمان‌های مختلف عمل‌آوری هستند و می‌توانند به تحلیل بهتر رفتار مکانیکی بتن و ارزیابی تأثیر ترکیب سنگدانه‌ها و مواد افزودنی کمک کنند. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا (CLF) کاهش مقاومتی برابر ۰/۳۵ و ۰/۳۰ را نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان می‌دهد. همچنین، طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا کاهش مقاومتی برابر ۰/۵۲ و ۰/٤٦ را در مقایسه با طرح شاهد در همین سنین دارد. در دسته‌بندی بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا کاهش مقاومتی برابر ۰/۳۲ و ۰/۲٦ و طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا کاهش مقاومتی برابر ۰/٤٥ و ۰/٤۰ را نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم به بهبود مقاومت خمشی کمک می‌کند. در نهایت، طرح که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شده، دارای بالاترین مقاومت خمشی به میزان ٥/٦ و ٦/٦ مگاپاسکال در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده و در مقابل، طرح سنگدانه‌های طبیعی- لیکا که بر اساس دانه‌بندی فولر تهیه شده، کم‌ترین مقاومت خمشی با مقادیر ۲/۵ و ۳/٤ مگاپاسکال را در همین زمان‌ها دارد.

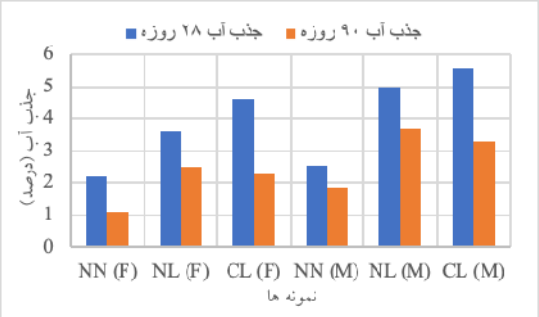


شکل ٦. تغییرات مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال

۵-۷-جذب آب

نتایج به‌دست آمده از آزمایش جذب آب نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان می‌دهد که رفتار جذب آب بتن خودمتراکم تحت تأثیر نوع سنگدانه‌ها و ترکیب اختلاط قرار دارد. این نتایج در شکل ۷ نمایش داده شده است. تغییرات قابل توجه در میزان جذب آب بین طرح‌های مختلف، بیانگر تأثیر عمیق نوع و دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر ویژگی‌های ریزساختاری و نفوذپذیری

بتن است. به‌طور خاص، نتایج نشان می‌دهد که برخی طرح‌ها با سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی نسبت به طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی، دارای نفوذپذیری کمتری هستند که این موضوع می‌تواند به بهبود دوام و عملکرد بتن در برابر شرایط محیطی کمک کند.

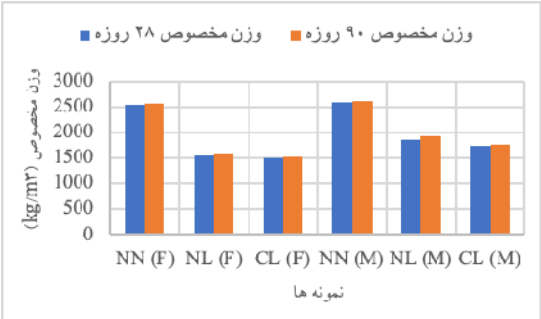


شکل ۷. تغییرات جذب آب برحسب درصد

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی به ترتیب ۲/۰۵ و ۱/۷۳ درصد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا نسبت به طرح شاهد برابر ۱/۷٤ و ۲ درصد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی به ترتیب ۲/۱۸ و ۱/۸ درصد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- لیکا نسبت به طرح شاهد برابر ۱/۹۵ و ۲/۰٦ درصد در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود جذب آب نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و لیکا می‌شود. به‌علاوه، طرح که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شده، دارای پایین‌ترین جذب آب به میزان ۱/۹٪ و ۱/۱٪ در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه است. همچنین، طرح‌های (CPM) و (NLM) که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شده‌اند، به‌ترتیب بالاترین جذب آب به میزان ٤/۸٪ در سن ۲۸ روزه و ۳/۱٪ در سن ۹۰ روزه را دارا هستند.

۵-۸-وزن مخصوص

نتایج به‌دست آمده از آزمایش وزن مخصوص طرح‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی خصوصیات فیزیکی بتن و تأثیر نوع سنگدانه‌ها بر وزن مخصوص انجام شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که وزن مخصوص بتن تحت تأثیر نوع و ترکیب سنگدانه‌ها قرار دارد و این ویژگی می‌تواند بر عملکرد و دوام بتن در شرایط مختلف تأثیرگذار باشد.



شکل ۸. تغییرات وزن مخصوص برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

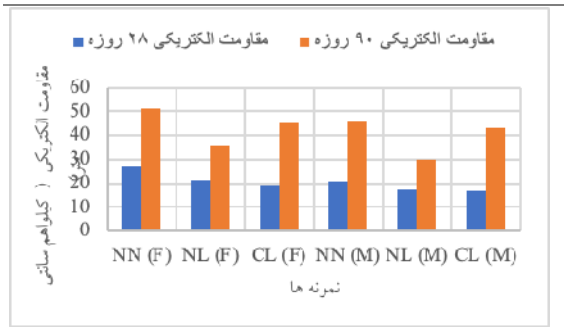
در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، طرح‌های حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا و سنگدانه‌های طبیعی- لیکا به ترتیب کاهش وزن مخصوصی برابر ۰/٤٦ و ۰/٤۲ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نشان دادند. همچنین در دسته‌بندی بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، کاهش وزن مخصوص در طرح‌های حاوی سنگدانه‌های سرامیک- لیکا و طبیعی- لیکا به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سنگدانه‌های لیکا و سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبک منجر به کاهش وزن مخصوص نسبت به طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی می‌شود. در نهایت، طرح‌های سرامیک- لیکا و طبیعی- لیکا که بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شده‌اند، به ترتیب دارای بالاترین وزن مخصوص به میزان ۲٤۳۰ و ۲٤٤۰ کیلوگرم بر مترمکعب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده‌اند. در مقابل، طرح که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شده، پایین‌ترین وزن مخصوص به میزان ۱۳۱۰ و ۱۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب را به دلیل استفاده از سنگدانه‌های سبک (لیکا) به نمایش گذاشته است.

۵-۹- مقاومت الکتریکی

انجمن بتن آمریکا مقادیر مشخصی برای مقاومت الکتریکی بتن و ارتباط آن با احتمال خوردگی پیشنهاد کرده است که در جدول ۸ ارائه شده است. این مقادیر به عنوان معیاری برای ارزیابی دوام بتن و توانایی آن در مقابل نفوذ املاح مضر استفاده می‌شوند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۹ نشان داده شده است و این نتایج می‌توانند به درک بهتری از رفتار بتن در برابر شرایط محیطی و احتمال خوردگی آن کمک کنند. با توجه به این نتایج، می‌توان به ارزیابی کیفیت و دوام بتن در پروژه‌های مختلف پرداخت.

جدول ۸. ارتباط مقاومت الکتریکی بتن و احتمال خوردگی

مقاومت الکتریکی ویژه (کیلواهم سانتی‌متر)	بزرگ‌تر یا مساوی ۱۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰ تا ۵۰	کوچک‌تر یا مساوی ۱۰
احتمال خوردگی	ناچیز	کم	متوسط	زیاد

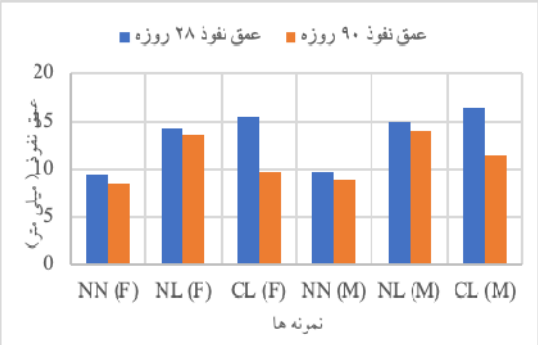


شکل ۹. تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب کیلواهم سانتی‌متر

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی به ترتیب با کاهش ۰/۲۶ و ۰/۱ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده شد. همچنین در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-لیکا این تغییرات به ترتیب برابر با کاهش ۰/۱۹ و ۰/۳۲ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. بنابراین، طرح سنگدانه‌های سرامیک-لیکا با توجه به جدول مربوطه، احتمال خوردگی کمتری نسبت به طرح (NPF) دارد. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی به ترتیب برابر با کاهش ۰/۲۹ و ۰/۰۶ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-لیکا این کاهش به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۳۵ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که طرح نیز احتمال خوردگی کمتری نسبت به طرح دارد. به‌طور کلی، وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم موجب بهبود مقاومت الکتریکی نسبت به طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و لیکا می‌شود. در نهایت، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، طرح‌های سنگدانه‌های طبیعی-لیکا و طبیعی-طبیعی که به ترتیب بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، دارای بالاترین مقاومت الکتریکی به میزان ۵۷/۹ و ۵۴/۶ کیلواهم سانتی‌متر و پایین‌ترین احتمال خوردگی در سن ۹۰ روزه بوده‌اند.

۵-۱۰-مهاجرت یون کلر

در این آزمایش، نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در مخزن محلول ۱۰٪ نمک طعام به‌عنوان محلول کاتولیت قرار داده شدند و محلول ۰/۳ مول سدیم هیدروکسید به‌عنوان آنولیت بر روی آن‌ها ریخته شد. در مرحله نهایی، با پاشیدن محلول ۰/۱ مول نیترات نقره بر روی نمونه‌های دو نیم شده، عمق ناحیه تغییر رنگ داده اندازه‌گیری شد تا عمق نفوذ کلرید تعیین گردد. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تغییرات عمق نفوذ در مهاجرت یون کلر برحسب میلی‌متر

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-لیکا نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی به‌ترتیب با افزایش ۱/۷۳ و ۱/۴ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده شد. همچنین، در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-لیکا این تغییرات به میزان

۱/۵۵ و ۱/٦ به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بود. بنابراین، طرح (CLF) در سن بالا از عمق نفوذ کمتری نسبت به طرح (NLF) برخوردار است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-لیکا (CLM) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NNM) به‌ترتیب با افزایش ۱/۷۵ و ۱/۳٦ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-لیکا (NLM) با افزایش ۱/۵۸ و ۱/٦۷ مشاهده شد. در این راستا، طرح سنگدانه‌های سرامیک-لیکا در سن بالا از عمق نفوذ کمتری نسبت به طرح (NLM) برخوردار است. نتایج نشان می‌دهند که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم به بهبود عمق نفوذ کمک کرده است. در نهایت، مشخص گردید که طرح‌های (NNF) و (NNM) که به ترتیب بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، پایین‌ترین عمق نفوذ را به میزان ۱۰ و ۱۱ میلی‌متر در سن ۹۰ روزه دارند.

٦- نتیجه‌گیری

-نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمامی طرح‌های بتن خودمتراکم در محدوده مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند. تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه **J** و جریان اسلامپ غیر مقید در محدوده ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر با درجه ۱ و توانایی عبور متوسط برای تمام ٦ طرح موجود مشاهده گردید و در رده‌ی لزجت VS2/VF2 طبقه‌بندی شدند. تمامی طرح‌ها نسبت به طرح شاهد خود، به دلیل تعداد زیاد منافذ در ساختار و جذب آب بالای سنگدانه‌های لیکا، کاهش قطر جریان اسلامپ و افزایش زمان جریان قیف (لزجت) را نشان دادند. این موضوع به‌ویژه در طرح‌هایی با مقادیر بیشتر لیکا و سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی مشهود بود.

-از نظر مشخصات مکانیکی، طرح (NNM) که حاوی درشت‌دانه و ریزدانه طبیعی بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شده، بالاترین مقادیر مقاومت فشاری (۳٤/٦ و ۳۷/۲ مگاپاسکال)، کششی (٤/۸ و ۵/۵ مگاپاسکال) و خمشی (۵/٦ و ٦/٦ مگاپاسکال) را در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه داشت. برعکس، طرح (NLF) که حاوی درشت‌دانه طبیعی و لیکا بود، کم‌ترین مقادیر مقاومت فشاری (۱۷/۲ و ۱۹/۳ مگاپاسکال)، کششی (۲ و ۲/٤ مگاپاسکال) و خمشی (۲/۵ و ۳/٤ مگاپاسکال) را در سنین مشابه نشان داد. به‌طور کلی، مقاومت مکانیکی طرح‌های اختلاط با روش میان‌تهی به‌دلیل دانه‌بندی درشت‌تر نسبت به طرح‌های فولر بهبود بیشتری داشت.

-مقایسه طرح‌های (NLF) با (CLF) و (NLM) با (CLM) در دانه‌بندی‌های مختلف، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی در طرح‌های حاوی سنگدانه سرامیک ضایعاتی (CLF و CLM) را در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد. خاصیت پوزولانی سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در مجاورت با آب و سایر سنگدانه‌ها، منجر به تشکیل مواد پایدار و افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌ها می‌شود که از عوامل مؤثر در افزایش مقاومت این طرح‌ها است.

-از لحاظ دوام، طرح (NNF) که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، کم‌ترین مقدار جذب آب (۱٪/۹ و ۱/۱٪)، بیشترین مقاومت الکتریکی (۳۰/۱ و ۵۷/۹ کیلواهم سانتی‌متر) و کم‌ترین عمق نفوذ (۱۱ و ۱۰ میلی‌متر) را به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد. همچنین، طرح‌های (CLM) و (NLM) که به‌ترتیب حاوی سرامیک ضایعاتی و لیکا و درشت‌دانه طبیعی و لیکا بودند، بالاترین مقدار جذب آب (٤٪/۸ و ۳/۱٪)، کم‌ترین مقاومت الکتریکی (۱۹/۳ و ۳۵/٤ کیلواهم سانتی‌متر) و بیشترین عمق نفوذ (۲۱ و ۱۸ میلی‌متر) را داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی، طرح‌های با دانه‌بندی ریزتر، تراکم بهتری دارند و نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی بالاتری ارائه می‌دهند.

-مقایسه جذب آب نمونه‌های ۹۰ روزه (CLF) و (CLM) نشان می‌دهد که جذب آب در این نمونه‌ها به طور معنی‌داری کمتر از نمونه‌های ۲۸ روزه بود. این پدیده ممکن است به دلیل واکنش تأخیری پوزولان سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی با هیدروکسید کلسیم تشکیل شده باشد که باعث تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. این تشکیل ثانویه می‌تواند منافذ را پر کرده و نفوذپذیری را کاهش دهد. در آزمایش‌های دوام طرح‌های (CLF) و (CLM) در سن ۹۰ روزه، کاهش عمق نفوذ کلر و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به سن ۲۸ روزه مشاهده شد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1- Self -Compacting Concrete
2- Light Weight Aggregate
3- Light Weight Concrete
4- Structural Light Weight Concrete
5- Light Weight Aggregate Concrete
6- Institute Of Standards And Industrial Research of Iran

۸- سپاسگزاری

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی (Grant) دانشگاه علم و فناوری مازندران به شماره ۱٤۰۳/۱۵۱۹/د تاریخ ۱٤۰۳/۰٤/۲۷ انجام شده است.

۹- مراجع

-توکلی، داود و حیدری، علی (۱۳۹۳). بررسی بتن حاوی پوزولان کاشی ضایعاتی به همراه میکروسیلیس. *مجله مهندسی عمران شریف*، دوره ۲-۳۰(۳)، ۱۳۳-۱۲۵.

-توکلی، شیوا، حیدری، علی، نوید مقدم، محمد و نیلفروشان، محمدرضا (۱۳۹۲). ارزیابی اثر استفاده از پودر سرامیک و اجر ضایعاتی به همراه نانو سیلیس برا تولید بتن با مقاومت با، گامی در جهت مدیریت پسماند و کاهش اثرات زیست محطی تولید سیمان. *همایش ملی نانو تکنولوژی، مزایا و کاربردها*. همدان، دانشکده شهید مفتح.

-توکلی، داوود (۱۳۹۰). استفاده از کاشی به عنوان پوزولان در بتن. *سومین کنفرانس ملی بتن ایران*، تهران، انجمن بتن ایران.

-گجراتی، حمیدرضا و خداداد سریزد مهدی (۱۳۹٤). ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی سرامیک ضایعاتی و تحلیل نتایج به روش تاگوچی. *دومین همایش ملی مهندسی سازه ایران*، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-Agrawal, Yash, Trilok Gupta, Ravi Sharma, Narayan Lal Panwar, and Salman Siddique. (2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. *Construction Materials* 1, No. 1, 39-62.

-Agwal, Ibrahim Saad, Omar Mohamed Omar, Bassam A. Tayeh, and Bassam Abdelsalam Abdelsalam. (2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 235.117541.

-Bogas, José Alexandre, Jorge de Brito, and José M. Figueiredo. (2015). Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production* 89, 187-195.

-Cui, H. Z., Tommy Yiu Lo, Shazim Ali Memon, and Weiting Xu. (2012). Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 35, 149-158.

-Gao, Yingli, and Chao Zou. (2015). Experimental study on segregation resistance of nanoSiO2 fly ash lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 93, 64-69.

-Ibrahim, Mohammed, et al. (2020). Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. International Journal of Concrete Structures and Materials 14, 1-15.

-Kan, Abdulkadir, and Ramazan Demirboğa (2009). A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites* 31, No. 7, 489-495.

-Lee, Yee Ling, Siong Kang Lim, Ming Han Lim, Foo Wei Lee, and Ming Kun Yew (2021). Effect of ceramic dust as partial replacement of cement on lightweight foamed concrete. *International Journal of Integrated Engineering* 13, No. 4, 304-312.

-Lu, Jian-Xin (2023). Recent advances in high strength lightweight concrete: From development strategies to practical applications. *Construction and Building Materials* 400,132905.

-Newman, John, and Phil Owens (2003). Properties of lightweight concrete." *Advanced concrete technology* 3, 1-29.

-Sobhani, J., S. Komijani, M. Shekarchi, and F. Ghazban (2023). Durability of concrete mixtures containing Iranian electric arc furnace slag (EAFS) aggregates and lightweight expanded clay aggregates (LECA). *Construction and Building Materials* 400, 132597.

-Tassew, Samson T., and Adam S. Lubell (2012). Mechanical properties of lightweight ceramic concrete. Materials and structures 45, 561-574.

-Wang, Huai-liang, Xiao-hua Huang, and Bao Xie (2019). Strength and deformation properties of structural lightweight concrete under true tri-axial compression. *Case Studies in Construction Materials* 11, e00269.

-Yim, Hong Jae, Young Hwan Bae, and Jae Hong Kim (2020). Method for evaluating segregation in self-consolidating concrete using electrical resistivity measurements. *Construction and Building Materials* 232, 117283.

Feasibility of Using Light Aggregate and Waste Ceramic in Self-Compacting Lightweight Concrete

Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

Danial Nasr, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

E-mail: Rezvan_Babagoli@yahoo.com

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Given the limited availability of natural aggregate resources, the conservation of these materials for concrete production, including Self-Compacting Concrete (SCC), has gained significant importance in recent years. Additionally, the management and disposal of by-products have become a major global concern. The use of alternative materials, such as Lightweight Aggregates (LWA), in SCC production has increased over the past decades. Utilizing by-products as LWA (both coarse and fine) contributes to the sustainable development of SCC while also benefiting the environment. In this study, physical, mechanical, and durability characteristics of self-compacting concrete were investigated by replacing part of the natural aggregates with lightweight Leca and ceramic waste. The results indicated that the slump flow of all mixes was within the acceptable range (55 to 85 cm). The samples with intermediate grading showed the highest compressive strength (38.1 and 42.1 MPa), tensile strength (5.3 and 6.3 MPa), and flexural strength (6.2 and 7.5 MPa) at 28 and 90 days, respectively. In contrast, the samples made with Fuller grading demonstrated the lowest water absorption (1.7% and 2.1%), highest electrical resistance (16.5 and 51.3 kΩ·cm), and lowest depth of chloride penetration (16.5 and 8.5 mm) at the same ages. Overall, samples produced with intermediate grading performed better in mechanical strength, while those with Fuller grading yielded superior results regarding electrical resistance and water absorption.

Keywords: Leca, Waste Ceramics, Performance Characteristics, Durability, Lightweight Self-Compacting Concrete