

Laboratory investigation of mechanical properties and durability of lightweight concrete reinforced with polymer fibers and basalt fibers in single and hybrid forms

Mehdi Khoshvatan^{1*}, Peyman Maleki²

1- Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran

2- Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Borujard Branch, Borujard, Iran

ABSTRACT

In order to reduce the weight of structures, reduce dead load and improve seismic performance, lightweight concrete can be used. Due to the use of lightweight materials that have a brittle and porous structure, the mechanical properties and durability of lightweight concrete are weaker than ordinary concrete. To improve the weaknesses of lightweight concrete, optimal amounts of fibers can be used in lightweight concrete mix design. In this article, the effect of using different amounts of polymer fibers and basalt, single and combined, on the mechanical properties and durability of lightweight concrete was investigated. A number of 124 cylindrical samples with a size of 300 x 150 mm were made for compressive strength and tensile strength tests. Also, 248 cylindrical samples with a size of 200 x 100 mm were made for tests. Experiments were performed on different samples for the ages of 28 and 90 days. The results showed that the addition of 1% polymer fibers increased the compressive strength by 24.4% and 26.92%, and the tensile strength by 66.12% and 72.22%, as well as the addition of 1.75% basalt fibers. increases by 18.13% and 14.93% and tensile strength by 41.93% and 47.22% at the ages of 28 and 90 days compared to the sample without fibers. Also, the addition of 1.25% basalt fibers had the best performance in improving the durability of lightweight concrete, so that the amount of final water absorption of lightweight concrete decreased to 31.93% and 45.38%. Adding the optimal amount of fibers increased the electrical resistance to 46.54% and 46.42%, and also caused the penetration of chloride ions into lightweight concrete at the ages of 28 and 90 days by 39.67% and 43.15% respectively. be reduced to a fiber-free sample. Finally, it was concluded that polymer fibers have the greatest effect in improving the mechanical properties of lightweight concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 June 2023

Revise Date: 05 September 2023

Accept Date: 04 January 2024

Keywords:

Structural lightweight concrete
mechanical properties
Durability of lightweight
concrete
Fiber reinforced lightweight
concrete
Basalt fiber
Polymer fiber

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.402870.3151>

*Corresponding author: Mehdi Khoshvatan
Email address: mehdikhoshvatan@iauaksh.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک مسلح شده با الیاف پلیمری و بازالت به فرم تکی و ترکیبی

مهدی خوش وطن^{۱*}، پیمان ملکی^۲

۱- مربی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد، بروجرد، ایران

چکیده

به منظور کاهش وزن سازه‌ها، کاهش بار مرده و بهبود عملکرد لرزه‌ای، می‌توان از بتن سبک استفاده کرد. به دلیل استفاده از مصالح سبک که دارای ساختار ترد و متخلخل هستند، خواص مکانیکی و دوام بتن سبک نسبت به بتن معمولی ضعیف‌تر است. برای بهبود ضعف‌های بتن سبک، می‌توان از مقادیر بهینه الیاف در طرح اختلاط بتن سبک استفاده کرد. در این مقاله تاثیر استفاده از مقادیر مختلف الیاف پلیمری و بازالت به دو نوع تکی و ترکیبی بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک بررسی شد. تعداد ۱۲۴ نمونه استوانه‌ای با اندازه ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر برای آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی ساخته شد. همچنین تعداد ۲۴۸ نمونه استوانه‌ای با اندازه ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر برای آزمایش‌های جذب آب، نفوذ پذیری سریع کلرید، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی ساخته شد. آزمایشات بر روی نمونه‌های مختلف برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱٪ الیاف پلیمری، مقاومت فشاری را به مقدار ۲۴٪/۴ و ۲۶٪/۹۲ و مقاومت کششی را به میزان ۶۶٪/۱۳ و ۷۲٪/۲۳ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه فاقد الیاف افزایش می‌دهد. همچنین افزودن مقدار ۱/۲۵٪ الیاف بازالت بهترین عملکرد را در بهبود دوام بتن سبک داشت، به طوری که مقدار جذب آب نهایی بتن سبک را به مقدار ۳۱٪/۹۳ و ۴۵٪/۳۸ کاهش داد. افزودن مقدار بهینه الیاف، مقاومت الکتریکی را به مقدار ۴۶٪/۵۴ و ۴۶٪/۴۲ افزایش داد، همچنین باعث شد مقدار نفوذ یون‌های کلرید به بتن سبک در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به میزان ۳۹٪/۶۷ و ۴۳٪/۱۵ نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش یابد. در آخر نتیجه‌گیری شد که الیاف پلیمری بیشترین تاثیر را در بهبود خواص مکانیکی بتن سبک دارد.

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه‌ای، خواص مکانیکی، دوام بتن سبک، بتن سبک الیافی، الیاف بازالت، الیاف پلیمری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.402870.3151	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	۱۴۰۲/۰۹/۱۴	۱۴۰۲/۰۹/۱۴	۱۴۰۲/۰۶/۱۴	۱۴۰۲/۰۴/۰۶
مهدی خوش وطن mehdikhoshvatan@iauksh.ac.ir			نویسنده مسئول* پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن سبک، یکی از مصالح مدرن در صنعت ساخت است. آیین نامه ACI 213R-87 [۱]، چگالی بتن سبک سازه‌های را بین ۱۹۲۰-۱۱۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن را حداقل ۱۷ مگاپاسکال بیان کرده است. به منظور کاهش وزن سازه‌های بتنی و کاهش بار مرده، می‌توان از بتن سبک در ساختمان‌های بلند، پل‌ها با دهانه زیاد، سدها و سازه‌های هیدرولیکی و... استفاده کرد. استفاده از بتن سبک باعث کاهش نیروهای وارده ناشی از زلزله شده و در نتیجه سازه در برابر نیروهای لرزه‌ای مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد [۲]. بتن سبک یک عایق حرارتی خوب بوده و استفاده از این ماده ساختمانی باعث صرفه‌جویی در انرژی تا ۱۵٪، آسیب کمتر به محیط زیست و صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود [۳و۴]. تجزیه و تحلیل گزارش‌ها و داده‌های پایگاه، نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر استفاده از مصالح ساختمانی مدرن مانند بتن سبک در جهان رشد قابل توجهی داشته است [۵]. بتن سبک را می‌توان با استفاده از سنگدانه‌های سبک طبیعی مانند پرلیت، ورمیکولیت، رس و شیل تولید کرد [۶و۷]. اما به دلیل محدود بودن منابع طبیعی و آسیب کم‌تر به محیط زیست، محققان استفاده از مصالح سبک مصنوعی مانند زباله‌های کشاورزی [۸]، زباله‌های لاستیکی و پلاستیکی برش داده شده [۹]، پسماندهای پلیمری غیر آلی [۱۰] و محصولات جانبی صنعتی مانند سرباره کوره‌ها [۱۱] را توسعه داده‌اند. برجسته‌ترین مزیت استفاده از مصالح سبک مصنوعی، سازگاری با محیط زیست و تولید بتن سبک پاک است.

به دلیل استفاده از سنگدانه‌های سبک در طرح اختلاط بتن، به دلیل شکننده بودن و ساختار ضعیف مصالح سبک، باعث می‌شود که خواص مکانیکی و دوام بتن سبک نسبت به بتن با وزن نرمال ضعیف‌تر باشد [۱۲-۱۴] محققان نتیجه‌گیری کردند هرچه مقدار استفاده از مصالح سبک وزن در طرح اختلاط افزایش یابد، خواص مکانیکی و دوام بتن سبک بیشتر دچار ضعف می‌شود [۱۵-۱۷]. در تحقیقی دیگر، مشاهده شد که مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بتن سبک حاوی ۲۵٪ چوب پنبه به‌عنوان مصالح سبک، به ترتیب به میزان ۷۳٪، ۴۲٪ و ۷۸٪ نسبت به بتن کنترل فاقد مصالح سبک کم‌تر است. با افزایش مقدار چوب پنبه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به مقدار بیشتری نسبت به نمونه فاقد مصالح سبک کاهش یافته است. با این حال با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش، نمونه‌هایی که حاوی مقادیر بالای چوب پنبه هستند قبل از گسیختگی فاز پلاستیک را نشان داده و این نشان دهنده ظرفیت خوب تغییر شکل غیر الاستیک بتن سبک با درصد بالای چوب پنبه است [۱۸].

برخی از محققان نتیجه‌گیری کردند استفاده از مصالح سبک که دارای خلل و فرج زیاد هستند، باعث می‌شود در ساختار بتن سبک فضاهای خالی بوجود آمده و ساختار بتن سبک متخلخل شود. همین امر باعث افزایش میزان جذب آب و همچنین نفوذ عوامل مخرب مانند یون کلرید به داخل بتن سبک می‌شود [۱۹-۲۱]. در یک بررسی آزمایشگاهی، محققان میزان جذب آب و نفوذ پذیری سریع کلرید (RCPT) بتن سبک را که از شاخصه‌های سنجش دوام بتن بوده را بررسی کردند. محققان نتیجه‌گیری کردند به دلیل وجود فضاهای خالی و همچنین تخلخل بالای ساختار بتن سبک، میزان جذب آب و نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک نسبت به بتن معمولی به ترتیب به میزان ۱۲/۵٪ و ۳۵/۰٪ بیشتر است [۱۹].

یک راه حل مناسب برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن سبک، افزودن الیاف بعنوان ماده اضافی کمکی به مخلوط بتن سبک است [۲۲و۲۳]. از جمله الیاف‌های طبیعی می‌توان به آریست، سلولز، سیزال، پشم و موی حیوانات که منشا طبیعی دارند اشاره کرد. برای الیاف‌های مصنوعی می‌توان الیاف فولادی، الیاف کربن، الیاف پلی پرو پیلن (PP)، الیاف بازالت و الیاف پلیمری، که منشا مصنوعی دارند را نام برد [۲۴و۲۵]. از اثرات مثبت افزودن الیاف بر خواص بتن سبک می‌توان به افزایش ظرفیت جذب انرژی، مقاومت بسیار زیاد الیاف‌ها در برابر ترک خوردگی و بهبود رفتار بعد از ترک خوردگی، جلوگیری از افزایش عرض ترک‌های ناشی از انقباض که در مراحل اولیه هیدراتاسیون بوجود آمده‌اند، مقاومت بالا در برابر ضربه و بارهای ضربه‌ای، بهبود قابل توجه مقاومت کششی، مقاومت خمشی، سختی خمشی و مدول الاستیسیته اشاره کرد [۲۶و۲۷]. نتایج یک تحقیق نشان داد که افزودن مقدار ۰/۵٪ الیاف بازالت به مخلوط بتن سبک ساخته شده از میکروسفرهای شیشه‌ای تو خالی و تقویت شده با ماکروسفر اپوکسی باعث بهبود مقاومت فشاری شده و محققان دلیل آن را متصل نمودن ماتریس سیمان به وسیله الیاف بازالت ذکر کردند که همین امر باعث بهبود خواص مکانیکی بتن سبک شده است [۲۸].

تعدادی دیگر از محققان روی اثر افزودن الیاف بر مقاومت فشاری بتن سبک تحقیق کردند و بیان کردند افزودن الیاف تاثیر ناچیزی در بهبود مقاومت فشاری بتن سبک دارد و در صورت استفاده از دوزهای بالای الیاف، مقاومت فشاری بتن سبک نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش می‌یابد [۲۹ و ۳۰]. همچنین اکثر محققان گزارش دادند افزودن انواع الیاف به مخلوط بتن سبک، کارایی و اسلامپ را کاهش می‌دهد. دلیل این امر کلوخه شدن الیاف و انسداد ساختار بتن سبک است [۳۱ و ۳۲]. در یک تحقیق آزمایشگاهی محققان نتیجه‌گیری کردند افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن سبک ساخته شده از دانه‌های سبک رس منبسط شده (لیکا)، کارایی را کاهش داده و تاثیر ناچیزی در بهبود مقاومت فشاری داشته است، اما مقاومت خمشی را به مقدار ۵۵٪ نسبت به نمونه بدون الیاف بهبود بخشیده است. همچنین با افزایش مقادیر لیکا، خواص مکانیکی بتن سبک بیشتر دچار ضعف شد [۳۳]. در پژوهشی دیگر، محققان بیان کردند افزودن ۰/۲۲٪ الیاف PP به بتن سبک ساخته شده از لیکا، مقاومت فشاری را به میزان ۰/۱۲٪، مقاومت کششی را به مقدار ۴/۵٪ و مدول الاستیسیته را به مقدار ۲/۵۵٪ نسبت به بتن کنترل افزایش داده است. محققان نتیجه‌گیری کردند که با افزایش مقدار الیاف به ۰/۳۳٪ مقاومت فشاری به میزان ۵/۳۰٪ کاهش یافته و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب به مقدار ۴/۷٪ و ۳/۹٪ نسبت به بتن کنترل افزایش می‌یابد [۳۴]. نتایج یک تحقیق نشان داد که افزودن الیاف بازالت به بتن سبک ساخته شده از لیکا، تاثیر چندانی در بهبود مقاومت فشاری نداشته و در صورت استفاده از مقادیر بالای الیاف، مقاومت فشاری را نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش می‌دهد [۳۰]. با این حال در یک تحقیق محققان نتیجه‌گیری کردند افزودن ۰/۵٪ و ۱/۵٪ الیاف بازالت به بتن سبک ساخته شده از سبکدانه‌های سرامیست مقاومت فشاری را به ترتیب به میزان ۱۱/۵٪ و ۱۸/۵٪ افزایش می‌دهد و دلیل این امر را مقاومت بیشتر سنگدانه‌های سبک سرامیست می‌دانند که باعث شده است تاثیر الیاف بازالت بر مقاومت فشاری برجسته تر بشود. همچنین محققان نتیجه‌گیری کردند مخلوط بتن سبک حاوی ۱/۵٪ الیاف بازالت، به مقدار ۳۴٪ مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه بدون الیاف دارد [۳۵]. در تحقیقی که روی اثر الیاف فولادی بر میزان جذب آب بتن سبک انجام شد، نتیجه‌گیری شد که میزان جذب آب بتن سبک حاوی الیاف فولادی، ۱۰٪ بیشتر از نمونه بدون الیاف است. در مقابل تعدادی از محققان نتیجه‌گیری کردند که الیاف‌هایی مانند الیاف کربن، الیاف بازالت، الیاف PP و الیاف‌هایی که طول و قطر کمی داشته و دارای ظاهر ظریف هستند، باعث کاهش میزان جذب آب و نفوذ پذیری بتن سبک می‌شوند [۳۶]. در پژوهشی دیگر محققان نتیجه‌گیری کردند با افزودن مقدار ۰/۲۸۵٪ الیاف PP و PVA بصورت تکی به مخلوط بتن سبک ساخته شده از مصالح سبک OPS، مقدار جذب آب بتن سبک به ترتیب به میزان ۱۷/۳٪ و ۲۱/۵٪ نسبت به نمونه سبک بدون الیاف کاهش می‌یابد. در تحقیق مذکور بیان شده است که افزودن الیاف ترکیبی PP+PVA به دلیل اثر هم‌افزایی مثبت هر دو الیاف بر هم، مقدار جذب آب نمونه را به مقدار ۲۴٪ نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش داده است [۳۷]. نتایج منتشر شده در تحقیقی دیگر نیز نشان داد افزودن مقادیر ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف کربن، جذب آب بتن سبک را به ترتیب به مقدار ۱۸/۷٪، ۳۸/۵٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش داده است [۳۸].

در یک بررسی آزمایشگاهی، محققان نتیجه‌گیری کردند بار الکتریکی عبوری از بتن سبک حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ اسکوریا به ترتیب به میزان ۲٪ و ۵/۵٪ بیشتر از بتن معمولی است. با این حال افزودن مقدار ۱٪ الیاف PP به مخلوط بتن سبک حاوی ۱۰٪ اسکوریا، مقدار بار الکتریکی عبوری از نمونه را به میزان ۱/۲٪ نسبت به نمونه بتن سبک فاقد الیاف کاهش داد [۳۹]. در مطالعه‌ای دیگر، محققان بیان کردند افزودن مقدار ۰/۲۵٪ الیاف PVA به مخلوط بتن سبک میزان نفوذ پذیری سریع کلرید را ۱۶٪ نسبت به نمونه‌ای که حاوی ۱٪ دانه‌های لاستیک خرد شده است کاهش داد [۴۰]. اما عده‌ای از محققان گزارش داده‌اند که الیاف فولادی به دلیل رسانا بودن یک راه میانبر برای انتقال بار الکتریکی و یون‌های تحت تاثیر میدان الکتریکی به داخل ساختار بتن سبک بوده و باعث افزایش مقدار نفوذ پذیری کلرید بتن و کاهش مقاومت الکتریکی بتن سبک می‌شود و در مواقعی عملکرد تست را مختل می‌کند [۴۱].

با مطالعه پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر، دریافت شد که تحقیق در خصوص دوام بتن بسیار جزئی و محدود است. از آن جهت که دوام بتن از شاخصه‌های مهم این مصالح ساختمانی است، این پژوهش به منظور بررسی اثرات افزودن الیاف پلیمری و بازالت به فرم تکی و ترکیبی بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک انجام شد. در این مقاله تاثیرات افزودن الیاف پلیمری و الیاف بازالت بصورت تکی و ترکیبی (پلیمر+بازالت) بر خواص مکانیکی بتن سبک ساخته شده از سبکدانه لیکا بررسی شده است. آزمایشات و پارامترهای مورد بررسی

شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و همچنین شاخصه‌های دوام شامل مقدار جذب آب نهایی، مقدار نفوذ پذیری سریع کلرید (RCPT) و مقاومت الکتریکی برای سنین ۲۸ و ۹۰ بطور کامل بررسی شده است.

۲- روش تحقیق آزمایشگاهی

آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی ۱۲۴ نمونه استوانه‌ای با اندازه ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر و آزمایش‌های جذب آب نهایی، نفوذپذیری سریع کلرید، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی بر روی ۲۴۸ نمونه استوانه‌ای با اندازه ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر انجام شد. ساخت و عمل آوری نمونه‌ها در محیط و شرایط آزمایشگاهی انجام شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 [۵۲]، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن مطابق استاندارد ASTM C496 [۵۳]، جذب آب نهایی مطابق استاندارد ASTM C642 [۵۴]، نفوذ پذیری سریع کلرید مطابق استاندارد ASTM C1202 [۵۵] و آزمایش مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی مطابق استاندارد ASTM C1760 [۵۶] در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۱- مصالح

سیمان مورد استفاده در این مقاله، سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ تولید شده در کارخانه سیمان سامان کرمانشاه با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۲ مگاپاسکال، وزن مخصوص ۳۱۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح ویژه ۳۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم است که مطابق با استاندارد ASTM C150 [۴۲] تولید شده است. همچنین از میکروسیلیکا تولید شده در کارخانه فروآلیاژ ازنا به عنوان ماده مکمل سیمان که تولید آن مطابق با استاندارد ASTM C1240 [۴۴] است، استفاده شده است. مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیکا در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیکا

ترکیب	سیمان (درصد)	میکروسیلیکا (درصد)
SiO ₂	۲۰/۷±۰/۳	۹۰-۹۵
CaO	۶۵±۰/۵	۰/۵-۱
Al ₂ O ₃	۵/۲±۰/۲	۰/۶-۱/۲
Fe ₂ O ₃	۴/۶±۰/۲	۱/۲-۱/۸
Na ₂ O	۰/۱۵±۰/۲	-
MgO	۱/۸±۰/۲	۰/۶-۱/۲
So ₃	۲/۲±۰/۴	-
K ₂ O	۰/۵±۰/۰۵	-
C	-	۰/۸-۲
Cl	-	۰/۰۵-۰/۰۷
C ₃ S	۵۹/۴۷	-
C ₂ S	۱۴/۴۸	-
C ₃ A	۶	-
C ₄ AF	۱۴	-
Free CaO	۱/۳±۰/۲	-

سنگدانه‌های مورد استفاده از نوع شن طبیعی با سایز ۶ تا ۱۲ میلی متر به عنوان سنگدانه درشت و ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۶ میلی متر به عنوان سنگدانه‌های ریز است. دانه بندی سنگدانه‌های درشت و ریز مطابق آییننامه ASTM C136 [۴۵] انجام شده و شکل ۱ نمودار دانه بندی شن و شکل ۲ نمودار دانه بندی ماسه را نشان می‌دهد. همچنین میزان جذب آب و وزن مخصوص شن و ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C127 [۴۶] بدست آمد. مصالح سبک استفاده شده از نوع سبکدانه‌های رس منبسط شده سازه‌ای (لیکا سازه‌ای) با سایز ۴ تا ۱۰ میلی متر است که مطابق با استاندارد ASTM C330 [۴۷] دانه بندی شده است. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی شن، ماسه و لیکا ارائه شده است.

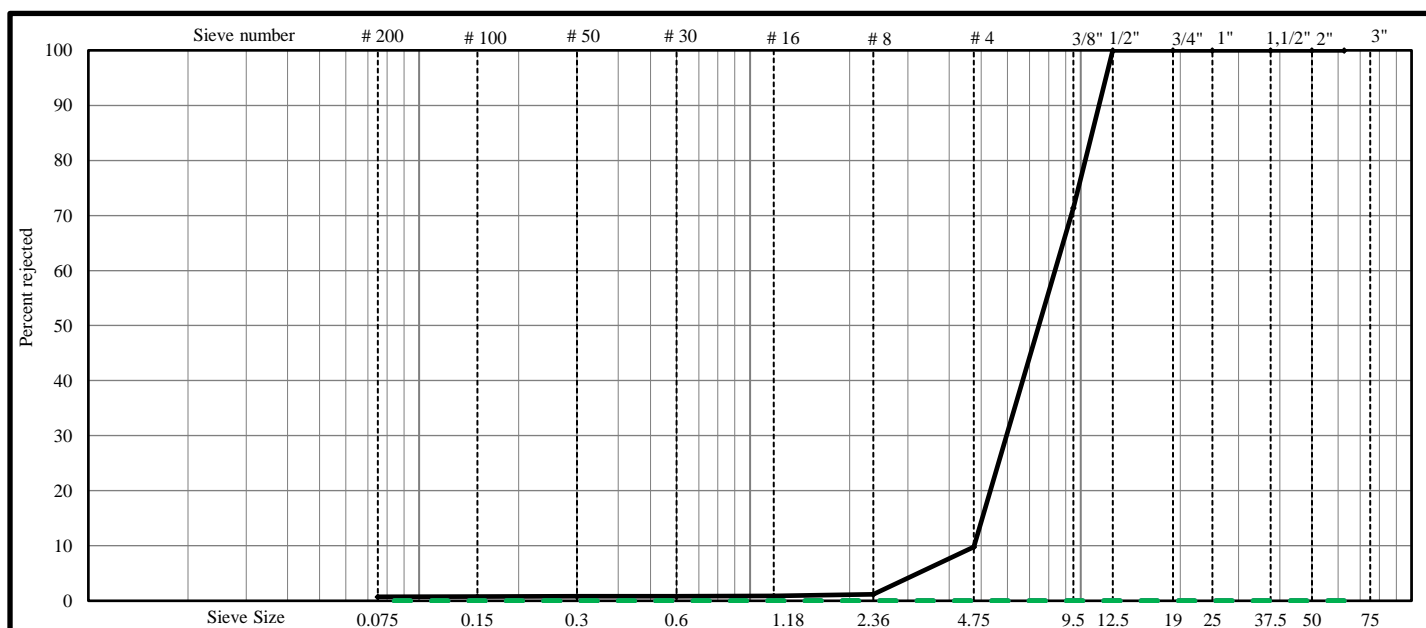
جدول ۲: مشخصات مکانیکی و فیزیکی شن، ماسه و لیکا

لیکا	ریزدانه (ماسه)	درشتدانه (شن)	خصوصیات
۴-۱۰	۰/۶	۶-۱۲	Size (mm)
۳۷۰	۲۷۱۳	۲۷۲۰	Bulk Density (kg/m ³)
۳۲۰	۲۵۸۵	۲۶۵۹	Dry Density (kg/m ³)
-	۳/۰۰	۶/۱۴	Fineness Modulus
۱۸	۱/۸۳	۰/۷۹	Water Absorption (%)
-	۳/۰۰	۶/۱۴	FM
-	۷۹	-	SE (%)

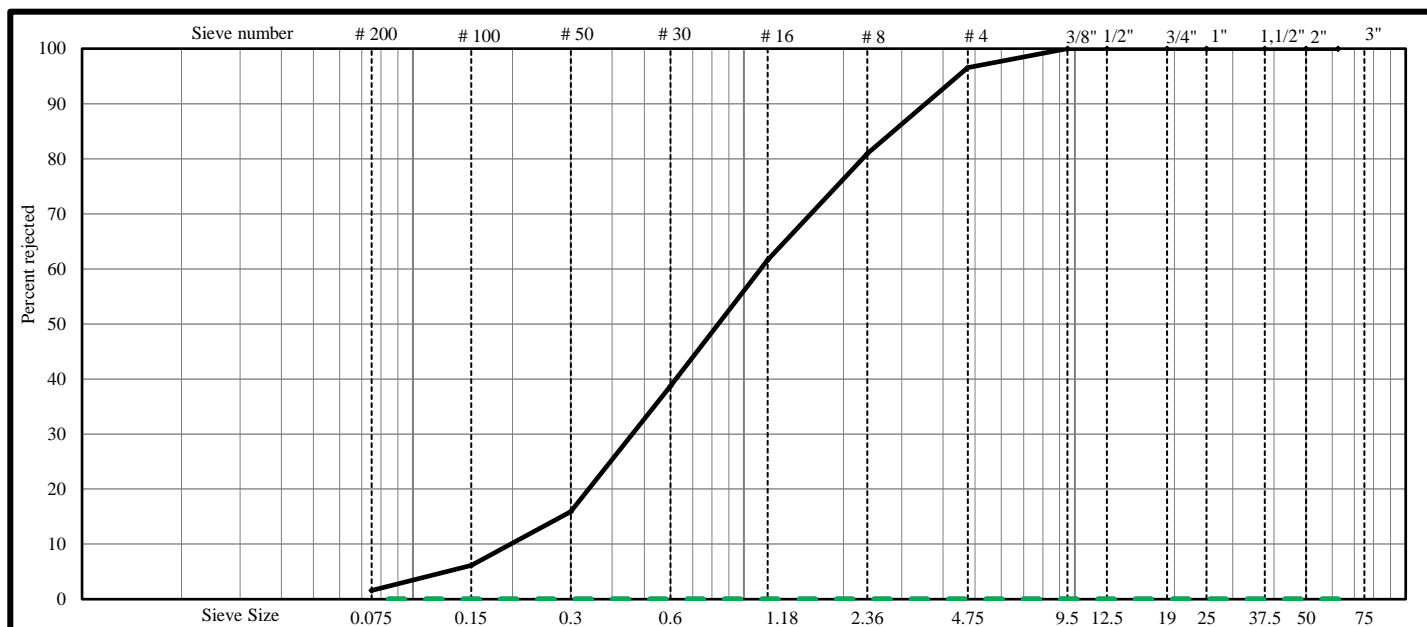
به منظور بررسی اثرات افزودن الیاف بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک، از الیاف بازالت با طول ۱۲ میلی‌متر که منشأ آتشفشانی دارد و الیاف پلیمری (KORTTA Wave) با طول ۵۵ میلی‌متر که از مواد اصلاح شده نانو کوپلی پروپیلن ساخته شده است به فرم تکی و ترکیبی استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌ها را نشان می‌دهد. به منظور رسیدن به یک کارایی مطلوب، از یک فوق روان کننده و کاهنده آب با کارایی بالا بر پایه پلی کربوکسیلات اثر مطابق با استانداردهای ASTM C1017 [۴۸] و ASTM C494 type F [۴۹] استفاده شد.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌ها

چگالی (Kg/m ³)	جذب آب (%)	مدوا الاستیسیته (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	نسبت طول به قطر (L/D)	قطر (μm)	طول (mm)	الیاف
۹۱۰	۰	۳۵۰۰-۷۰۰۰	۴۵۰-۷۰۰	۲۷۵	۲۰۰	۵۵	Polymer Wave (PF)
۲۸۰۰	۸-۱۰	۸۲۰۰۰-۹۲۰۰۰	۲۸۰۰-۳۲۰۰	۶۴/۸۶	۱۸/۵	۱۲	Basalt (BF)



شکل ۱: منحنی دانه بندی شن مورد استفاده در مقاله حاضر



شکل ۲: منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده در مقاله حاضر



شکل ۴: الیاف پلیمری



شکل ۳: الیاف بازالت

۲-۲- طرح اختلاط

در این مقاله، تعداد ۳۱ طرح اختلاط مطابق با آیین نامه ACI 211 [۵۰] طراحی شده است که یک طرح اختلاط مربوط به بتن سبک بدون الیاف (بتن سبک کنترل)، ۱۰ طرح اختلاط برای بتن سبک حاوی الیاف بازالت، ۱۰ طرح اختلاط مربوط به بتن سبک حاوی الیاف پلیمری و ۱۰ طرح اختلاط نیز مربوط به بتن سبک حاوی الیاف ترکیبی بازالت+پلیمر است. به منظور بررسی تاثیر افزودن الیاف بازالت و پلیمری بصورت تکی و ترکیبی بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک، مقادیر سیمان، میکروسیلیکا، سنگدانه‌های درشت و ریز، لیکا، فوق

روان کننده و آب در تمامی طرح‌ها ثابت بوده و فقط مقادیر الیاف‌ها متغیر است. مقادیر الیاف پلیمری و بازالت: $0/25\%$ ، $0/5\%$ ، $0/75\%$ ، 1% ، $1/25\%$ ، $1/5\%$ ، $1/75\%$ ، 2% و $2/25\%$ و $2/5\%$ وزن کل مواد سیمانی و پوزولانی (سیمان+میکروسیلیکا) است. همچنین مقادیر ذکر شده الیاف برای طرح‌های حاوی الیاف ترکیبی صادق بوده و سهم هر الیاف بصورت $\frac{1}{2}$ است. برای تمامی طرح‌ها نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) ثابت و برابر $0/38$ بوده و مقدار مصرف میکروسیلیکا برابر 15% وزن سیمان و میزان مصرف فوق روان کننده برابر $0/8$ لیتر به ازای هر 100 کیلوگرم مواد سیمانی و پوزولانی است. در جدول ۴ اطلاعات مربوط به تمامی طرح اختلاط‌های طراحی شده بیان شده است.

جدول ۴: طرح اختلاط نمونه‌های بتن سبک

Mix ID	Cement (kg/m ³)	SF* (kg/m ³)	Coarse Aggregates (Kg/m ³)	Fine Aggregates (Kg/m ³)	Leca (Kg/m ³)	Water (Kg/m ³)	SP** (Kg/m ³)	Polymer Fibers (%)	Basalt Fibers (%)
C	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	-
P0.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۲۵	-
P0.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۵	-
P0.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۷۵	-
P1%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱	-
P1.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱/۲۵	-
P1.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱/۵	-
P1.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱/۷۵	-
P2%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۲	-
P2.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۲/۲۵	-
P2.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۲/۵	-
B0.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۰/۲۵
B0.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۰/۵
B0.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۰/۷۵
B1	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۱
B1.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۱/۲۵
B1.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۱/۵
B1.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۱/۷۵
B2%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۲
B2.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۲/۲۵
B2.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	-	۲/۵
H0.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
H0.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
H0.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۳۷۵	۰/۳۷۵
H1%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۵	۰/۵
H1.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵
H1.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۷۵	۰/۷۵
H1.75%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵
H2%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱	۱
H2.25%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵
H2.5%	۴۶۰	۶۹	۲۴۰	۶۵۰	۲۲۰	۲۰۱	۴/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵

در جدول ۴ SF*: میکروسیلیکا، SP**: فوق روان کننده، C: بتن سبک فاقد الیاف (نمونه کنترل)، P: طرح اختلاط های حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری، B: طرح اختلاط های حاوی مقادیر ذکر شده الیاف بازالت و H: طرح اختلاط های حاوی الیاف هیبریدی (پلیمر+بازالت) است.

۲-۳- ساخت و عمل آوری نمونه ها

ابتدا مصالح خشک مانند سیمان، میکروسیلیکا، سنگدانه‌های درشت (شن) و سنگدانه‌های ریز (ماسه) و لیکا بصورت لایه لایه به دیگ میکسر اضافه شدند. سپس آب و فوق روان کننده به مخلوط خشک اضافه شد. به منظور جلوگیری از کلوخه شدن و به هم پیوستن

الیافها، در مرحله آخر الیافها در چند مرحله به مخلوط اضافه شدند و تا بدست آمدن یک مخلوط همگن و یکپارچه عمل اختلاط ادامه یافت. سپس فرایند بتن ریزی در قالبها مطابق استاندارد ASTM C192 [۵۱] انجام شد. قالبهای مورد استفاده در این مقاله، به دلیل استفاده از استاندارد بتن آمریکا (ASTM) قالبهای استوانه‌ای با سایز ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی به روش دو نیم شدن و قالبهای استوانه‌ای با اندازه ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر برای جذب آب، آزمایش نفوذ پذیری سریع کلرید، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی است. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌های بتن سبک از قالبها خارج و به حوضچه عمل آوری انتقال یافتند. عمل آوری نمونه‌های بتن سبک به وسیله آب مطابق استاندارد ASTM C192 [۵۱] برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد.



شکل ۵: حوضچه عمل آوری نمونه های بتن سبک

۳- روش های آزمایش

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 [۵۲] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. مطابق استاندارد ASTM C39 مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از تقسیم حداکثر بار اعمال شده (P_{max}) بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع بر سطح مقطع نمونه (A) بر حسب سانتی متر مربع بدست می آید.

$$F_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن:

مقاومت کششی برزیلی بتن مطابق با استاندارد ASTM C496 [۵۳] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. مقاومت کششی بتن مطابق رابطه ۲ بدست می آید:

$$T = \frac{2P}{\pi.L.D} \quad (2)$$

که در آن T مقاومت کششی به روش دو نیم شدن بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، P حداکثر بار اعمال شده بر حسب کیلوگرم، L طول آزمون بر حسب سانتی متر و D قطر آزمون بر حسب سانتی متر است.



شکل ۷: نمونه استوانه ای تحت آزمایش مقاومت کششی بروش دو نیم شدن



شکل ۶: نمونه استوانه ای تحت آزمایش مقاومت فشاری

۳-۳- آزمایش جذب آب نهایی

آزمایش جذب آب نهایی بتن مطابق با استاندارد ASTM C642 [۵۴] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نمونه‌ها داخل یک خشک کن با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. وزن نمونه‌ها بعد از خشک شدن تعیین شد، سپس نمونه‌های بتن سبک به مدت ۴۸ ساعت در آب اشباع شده و مجدداً وزن شدند. در نهایت جذب آب نهایی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$WaterAbsorption(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (3)$$

که در آن B وزن نمونه اشباع شده در آب و A وزن نمونه خشک شده در خشک کن بر حسب کیلوگرم است.

۳-۴- آزمایش نفوذ پذیری سریع یون کلرید (RCPT)

برای سنجش سریع نفوذ پذیری یون کلر در بتن از آزمایش RCPT مطابق استاندارد ASTM C1202 [۵۵] استفاده می‌شود. آزمون‌هایی به ضخامت ۵۰ میلی متر از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر برش داده شده است (شکل ۸). سپس نمونه‌ها به مدت ۱۸ ساعت در شرایط خلا درون محفظه خلا اشباع شدند. بعد از قرار گیری آزمون درون سلول دستگاه، یک سمت نمونه با محلول سدیم کلرید و سمت دیگر با محلول سدیم هیدروکسید در تماس قرار گرفت. بار الکتریکی عبوری از آزمون‌های بتنی اشباع تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت و طی مدت زمان ۶ ساعت ثبت شد. در آخر کل بار الکتریکی عبوری مطابق رابطه ۴ محاسبه گردید. در شکل ۹ نحوه انجام آزمایش RCPT نشان داده شده است.

$$Q = 900 \times (2l_0 + 2l_{30} + 2l_{60} + \dots + 2l_{330} + 2l_{360}) \quad (4)$$

که در آن Q مقدار کل بار الکتریکی عبوری از نمونه بر حسب کولمب و I جریان اندازه گیری شده در زمان های مختلف پس از اعمال ولتاژ و بر حسب میلی آمپر است.



شکل ۸: نمونه استوانه ای برش خورده شده برای قرار گیری در سلول آزمایش RCPT



شکل ۹: نحوه انجام آزمایش RCPT

۳-۵- مقاومت الکتریکی

یکی از مشخصه های بتن که مقاومت در برابر جاری شدن جریان الکتریکی به واسطه حرکت یون ها در بتن را نشان می دهد، مقاومت الکتریکی است. رابطه قوی میان نفوذ یون کلر و مقاومت الکتریکی در مخلوط های بتنی وجود دارد. در این مقاله مقاومت الکتریکی مطابق استاندارد ASTM C1760 [۵۶] انجام شده است. روند آزمایش به این صورت است که نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر بین دو سلول دستگاه قرار داده شده و سلول ها با محلول سدیم کلرید ۳٪ پر شدند. سپس مقدار ولتاژ ۶۰ ولت به مدت ۶۰ ثانیه به دو انتهای نمونه اعمال شد. همچنین دمای نمونه ها در طول آزمایش باید ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد باشد. در نهایت هدایت الکتریکی طبق رابطه ۵ و مقاومت الکتریک طبق رابطه ۶ محاسبه شد. در مطالعات پیشین نیز از این روش برای مقاومت الکتریکی بتن استفاده شده است [۵۷ و ۵۸].

$$\sigma = \frac{K \times I \times L}{V \times D^2} \quad (5)$$

در این رابطه، هدایت الکتریکی بتن با σ نشان داده شده است که بر حسب $(m/\Omega.m)$ می باشد، k عدد ثابت و برابر $1.273/2$ ، I شدت جریان اندازه گیری شده پس از گذشت ۶۰ ثانیه بر حسب میلی آمپر، V ولتاژ اعمال شده بر حسب ولت، D قطر نمونه بر حسب میلی متر و L طول نمونه بر حسب میلی متر است.

$$R = \frac{1000}{\sigma} \quad (6)$$

در رابطه ۶، R مقاومت الکتریکی بر حسب $(\Omega.m)$ و σ هدایت الکتریکی است.

۴- نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج نشان می دهد که افزودن مقادیر بهینه الیاف های پلیمری و بازالت به فرم تکی و ترکیبی، باعث بهبود مقاومت فشاری بتن سبک شده و آن را نسبت به نمونه کنترل افزایش می دهد. با توجه به جدول ۵، دریافت می شود که الیاف پلیمری بیشترین تاثیر و الیاف بازالت کمترین تاثیر را در بهبود مقاومت فشاری بتن سبک دارد. افزودن ۱٪ الیاف پلیمری به مخلوط بتن سبک، بیشترین تاثیر را در بهبود مقاومت فشاری داشته و آن را به مقدار ۲۴/۴٪ و ۲۶/۹۲٪ نسبت به نمونه فاقد الیاف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می دهد. همچنین مقدار بهینه الیاف بازالت در این مقاله برابر ۱/۷۵٪ بود که مقاومت فشاری بتن سبک را به مقدار ۱۸/۱۳٪ و ۱۴/۹۳٪ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه کنترل افزایش داد. استفاده از الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) در طرح اختلاط بتن سبک، به دلیل تاثیر هم افزایی مثبت الیاف پلیمری بر الیاف بازالت، باعث شد که مقاومت فشاری بتن سبک به مقدار ناچیز نسبت به نمونه های حاوی الیاف بازالت به فرم تکی بیشتر باشد. لازم به ذکر است استفاده از مقادیر بیشتر از ۲٪ الیاف های ذکر شده (۲/۲۵٪، ۲/۵٪) در طرح اختلاط بتن سبک، بر مقاومت فشاری بتن سبک تاثیر منفی گذاشته و آن را نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش می دهد. علت این امر را می توان توزیع نامناسب الیاف در ماتریس بتن، تجمع زیاد و کلوخه شدن الیاف ها و تراکم نامناسب مخلوط بیان کرد. در جدول ۵ نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری بتن سبک کنترل (فاقد الیاف) و نمونه های حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری، الیاف بازالت و الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ارائه شده است.

۴-۲- مقاومت کششی به روش دو نیم شدن

پس از انجام آزمایش مقاومت کششی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، دریافت شد که استفاده از الیاف پلیمری و بازالت بصورت تکی و هیبریدی در طرح اختلاط بتن سبک، مقاومت کششی را به مقدار چشم گیر نسبت به نمونه فاقد الیاف افزایش می دهد. در مرحله اول بارگذاری، الیاف با طول کم (الیاف بازالت) در دهانه ترک های ریز ساختار بتن سبک قرار گرفته و مانع از گسترش ترک ها می شوند، اما با تداوم بارگذاری کششی، رشد ترک ها بیشتر شده و الیاف پلیمری که جنس سخت تر و طول بیشتری از الیاف بازالت دارد، از طریق مکانیسم پل زدن در دهانه ترک ها مانع باز شدن دهانه ترک ها و پدید آمدن ترک های بزرگتر شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی به مقدار قابل توجه می شود. به همین دلیل الیاف پلیمری بیشترین تاثیر و الیاف بازالت کمترین تاثیر را در بهبود مقاومت کششی دارد. بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه ای است که حاوی ۱٪ الیاف پلیمری است. در این نمونه مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به مقدار ۶۶/۱۳٪ و ۷۲/۲۳٪ نسبت به نمونه فاقد الیاف بیشتر است. لازم به ذکر است در صورت استفاده از مقادیر بیشتر از ۱٪ الیاف پلیمری، مقاومت کششی به تدریج کاهش می یابد، اما باز هم از نمونه کنترل بیشتر است. همچنین از میان نمونه هایی که حاوی مقادیر ذکر شده الیاف بازالت هستند، نمونه ای که حاوی ۱/۷۵٪ الیاف بازالت است دارای بیشترین مقاومت کششی بوده و مقاومت کششی بتن سبک را به مقدار ۴۱/۹۳٪ و ۴۷/۲۲٪ نسبت به نمونه کنترل در سنین ۲۸ و ۹۰ روز افزایش داده است. برخلاف الیاف پلیمری، استفاده از مقادیر بیشتر از ۱/۷۵٪ الیاف بازالت، بر مقاومت کششی بتن سبک تاثیر منفی گذاشته و حتی آن را نسبت به نمونه کنترل کاهش می دهد. لازم به ذکر است تاثیر الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) در بهبود مقاومت کششی بتن سبک از الیاف بازالت به فرم تکی به مقدار ناچیز

بیشتر است، که این به دلیل تاثیر هم افزایی مثبت الیاف پلیمری بر الیاف بازالت است که باعث می شود ضعف های الیاف بازالت تا حدودی جبران شود. به عنوان مثال مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه های که حاوی ۱/۷۵٪ الیاف ترکیبی است، به مقدار ۹۱/۰۹٪ و ۶/۶۰٪ از نمونه های که حاوی همین مقدار الیاف بازالت به فرم تکی است بیشتر است. نتایج مربوط به مقاومت کششی نمونه مرجع و نمونه های سبک حاوی مقادیر مختلف الیاف پلیمری، الیاف بازالت و الیاف ترکیبی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی به روش دو نیم شدن

Mix ID	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		مقاومت کششی دو نیم شدن (مگاپاسکال)		چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
	۲۸ روز	۹۰ روز	۲۸ روز	۹۰ روز	
C	۳۷/۵	۴۴/۲	۳/۱	۳/۶	۱۷۲۱
P0.25	۴۲/۲	۴۸/۹	۴/۲	۴/۹۵	۱۷۳۳
P0.5	۴۲/۵	۴۹/۷	۴/۲۵	۵	۱۷۹۱
P0.75	۴۵/۵۵	۵۱	۴/۸۵	۵/۱	۱۷۹۳
P1	۴۶/۶۵	۵۶/۱	۵/۱۵	۶/۲	۱۸۳۰
P1.25	۴۴/۹۸	۵۲/۴	۴/۶۵	۵/۵	۱۸۶۳
P1.5	۴۴/۴۵	۵۱/۵	۴/۱۵	۴/۹	۱۸۵۰
P1.75	۴۱/۶۵	۴۷/۹	۴	۴/۷	۱۸۷۶
P2	۴۱/۱	۴۷/۳	۳/۸۵	۴/۶	۱۸۹۹
P2.25	۳۵	۴۰/۳	۳/۷۵	۴/۴	۱۸۰۴
P2.5	۳۲/۷۵	۳۷/۷	۳/۶	۳/۹	۱۹۰۰
B0.25	۳۱/۲۵	۳۵/۶	۳/۱۵	۳/۷	۱۷۳۰
B0.5	۳۲/۹	۳۷	۳/۳	۳/۸	۱۷۳۹
B0.75	۳۳/۵۵	۳۷/۸	۳/۳۸	۳/۹	۱۷۴۶
B1	۳۴/۴۵	۳۸/۶	۳/۷	۴/۲	۱۷۵۲
B1.25	۳۶/۶۵	۴۲/۹	۳/۸	۴/۵	۱۷۶۷
B1.5	۴۱/۶۵	۴۸/۳	۴/۱	۴/۸۶	۱۷۷۳
B1.75	۴۴/۳	۵۰/۸	۴/۴	۵/۳	۱۷۹۰
B2	۳۹/۴۵	۴۵	۳/۵	۴/۱	۱۷۹۸
B2.25	۲۸/۳۵	۳۲/۶	۲/۸	۳/۲	۱۸۲۵
B2.5	۲۴/۳۵	۲۷/۷	۲/۵	۲/۹	۱۸۳۱
H0.25	۳۲/۲	۳۶/۹۵	۳/۴	۳/۸۱	۱۷۳۳
H0.5	۳۳/۲۵	۳۸	۳/۵۳	۳/۹۳	۱۷۴۶
H0.75	۳۴/۸	۳۸/۳۵	۳/۷۰	۳/۹۷	۱۷۵۲
H1	۳۵/۹	۳۹/۴	۳/۸۰	۴/۳	۱۷۶۰
H1.25	۳۷/۹	۴۴/۵	۳/۹۱	۴/۸	۱۷۷۱
H1.5	۴۲/۶	۴۹	۴/۲۹	۴/۹۴	۱۷۸۸
H1.75	۴۵/۲	۵۱/۳	۴/۸	۵/۶۵	۱۸۰۴
H2	۳۳/۳	۳۸/۲	۳/۴	۳/۸۵	۱۸۱۵
H2.25	۳۱/۱	۳۶/۱	۳/۳	۳/۷۴	۱۸۲۶
H2.5	۳۰/۵۵	۳۵/۲	۳/۱۵	۳/۶۸	۱۸۵۱

شکل ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ خرابی و گسیختگی نمونه ها را نشان می دهد. همانطور که از شکل ها مشخص است، نمونه هایی که حاوی مقادیر بهینه الیاف پلیمری و بازالت بصورت تکی و ترکیبی هستند، نسبت به نمونه کنترل به مقدار کمتر دچار خرابی شده و مقاومت در برابر ترک خوردگی آن ها از نمونه کنترل به مراتب بیشتر است. از میان نمونه های نام برده شده، نمونه ای که حاوی ۱٪ الیاف پلیمری است مقاومت بیشتری در برابر گسیختگی و خرابی داشته که این به دلیل مکانیسم پل زدن الیاف پلیمری در دهانه ترک ها و جلوگیری از گسترش ترک بوده که از خرابی ناگهانی بتن سبک جلوگیری می کند. پس می توان گفت بهترین عملکرد الیاف ها در بهبود خواص مکانیکی بتن سبک مربوط به افزایش قابل توجه مقاومت کششی و همچنین مقاومت در برابر ترک خوردگی است.



شکل ۱۱: گسیختگی نمونه سبک حاوی ۱٪ الیاف پلیمری بعد از اعمال بار



شکل ۱۰: گسیختگی نمونه بتن سبک کنترل بعد از اعمال بار کششی



شکل ۱۳: گسیختگی نمونه سبک حاوی ۱/۷۵٪ الیاف ترکیبی بعد از اعمال بار

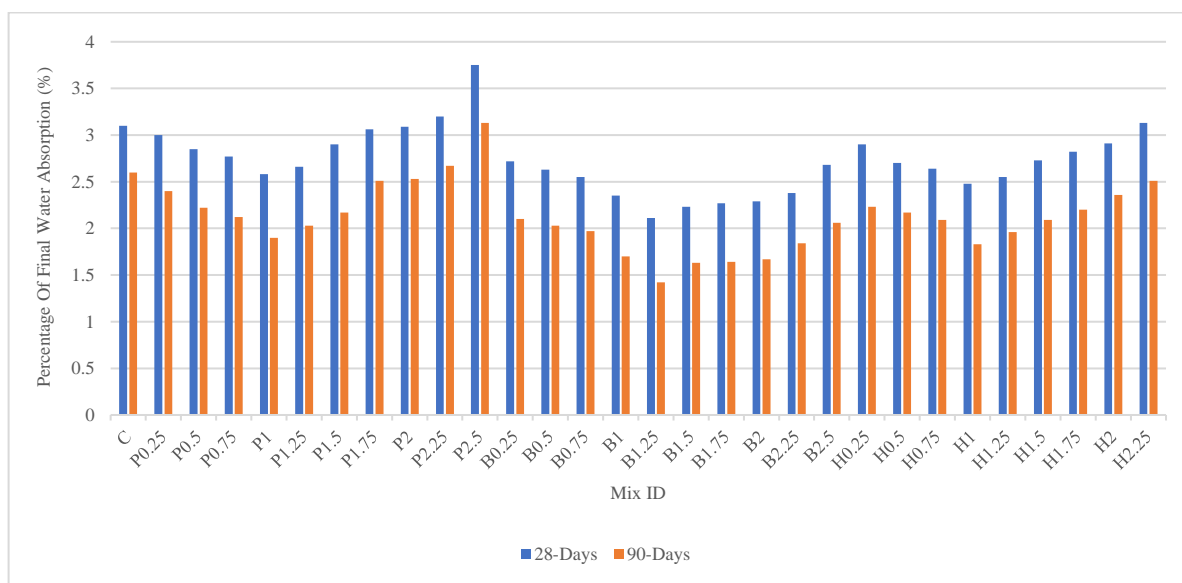


شکل ۱۲: گسیختگی نمونه بتن حاوی ۱/۷۵٪ الیاف بازالت بعد از اعمال بار

۴-۳- جذب آب نهایی

در بتن سبک تخلخل و فضاهای خالی نسبت به بتن معمولی بیشتر است، که همین امر باعث می‌شود مقدار جذب آب بتن سبک بیشتر از بتن معمولی باشد. شکل ۱۴ درصد جذب آب نهایی ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴، افزایش سن عمل‌آوری باعث کاهش درصد جذب آب تمامی نمونه‌ها و بهبود دوام بتن سبک می‌شود. همچنین افزودن هر سه نوع الیاف ذکر شده به مخلوط بتن سبک، درصد جذب آب نهایی را کاهش داده و در بهبود دوام بتن سبک تاثیر مثبت دارد. در این مقاله، الیاف بازالت به دلیل ظاهر نازک و نسبت قطر به طول کم، باعث پر شدن حفرات و فضاهای خالی شده و بهترین عملکرد را در کاهش درصد جذب آب نسبت به

دیگر الیاف از خود نشان می‌دهد، بطوری که افزودن مقدار ۱/۲۵٪ الیاف بازالت به مخلوط بتن سبک، درصد جذب آب نهایی را به مقدار ۳۱٪/۹۳ و ۴۵/۳۸٪ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌دهد که مقدار چشم‌گیری است. در صورت استفاده از مقادیر بیشتر از ۱/۲۵٪ الیاف بازالت، مقدار جذب آب نهایی بتن سبک به تدریج افزایش می‌یابد اما باز هم نسبت به نمونه کنترل کمتر است. محققان نتیجه‌گیری کردند استفاده از الیاف هایی که دارای طول و قطر زیاد هستند، باعث ایجاد حفرات و فضاهای خالی در ساختار بتن شده و مقدار جذب آب را افزایش می‌دهد [۳۳]. در این مقاله استفاده از مقادیر کم الیاف پلیمری، باعث بهبود درصد جذب آب به میزان مناسب شده است که دلیل آن را می‌توان جلوگیری از گسترش ترک‌ها و همچنین به وجود آمدن ترک‌های جدید از طریق مکانیسم پل زدن الیاف پلیمری در فضاهای خالی بتن سبک بیان کرد. افزودن ۱٪ الیاف پلیمری به مخلوط بتن سبک بیشترین تاثیر مثبت در کاهش مقدار جذب آب نهایی را داشته و آن را به میزان ۱۶/۷۷٪ و ۲۶/۹۲٪ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌دهد که مقدار مناسبی است. در صورت استفاده از مقادیر بیشتر از ۱٪ الیاف پلیمری، میزان جذب آب نهایی بتن سبک به تدریج افزایش می‌یابد، به طوری که در نمونه‌های حاوی ۲/۲۵٪ و ۲/۵٪ الیاف پلیمری، میزان جذب آب از نمونه کنترل بیشتر است. همچنین در نمونه‌هایی که حاوی مقادیر ذکر شده الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) هستند، به دلیل تاثیر هم افزایی مثبت الیاف بازالت، درصد جذب آب نهایی هم از نمونه کنترل و هم از نمونه‌های حاوی الیاف پلیمری به فرم تکی کمتر است. افزودن ۱٪ الیاف ترکیبی به طرح اختلاط بتن سبک، درصد جذب آب نهایی بتن سبک را به مقدار ۲۰٪ و ۲۹/۶۱٪ کاهش می‌دهد. از دلایل دیگر تاثیر مثبت الیافها در کاهش درصد جذب آب می‌توان به استفاده از مقدار بهینه میکروسیلیکا اشاره کرد. استفاده از میکروسیلیکا باعث پرشدن فضاهای خالی و انسداد حفرات موجود در ساختار بتن سبک شده و به عملکرد بهتر الیافها در بهبود دوام بتن سبک کمک قابل توجهی می‌کند.



شکل ۱۴: نتایج مربوط به درصد جذب آب نهایی نمونه های بتن سبک

۴-۴- نفوذ پذیری سریع کلرید (RCPT) و مقاومت الکتریکی

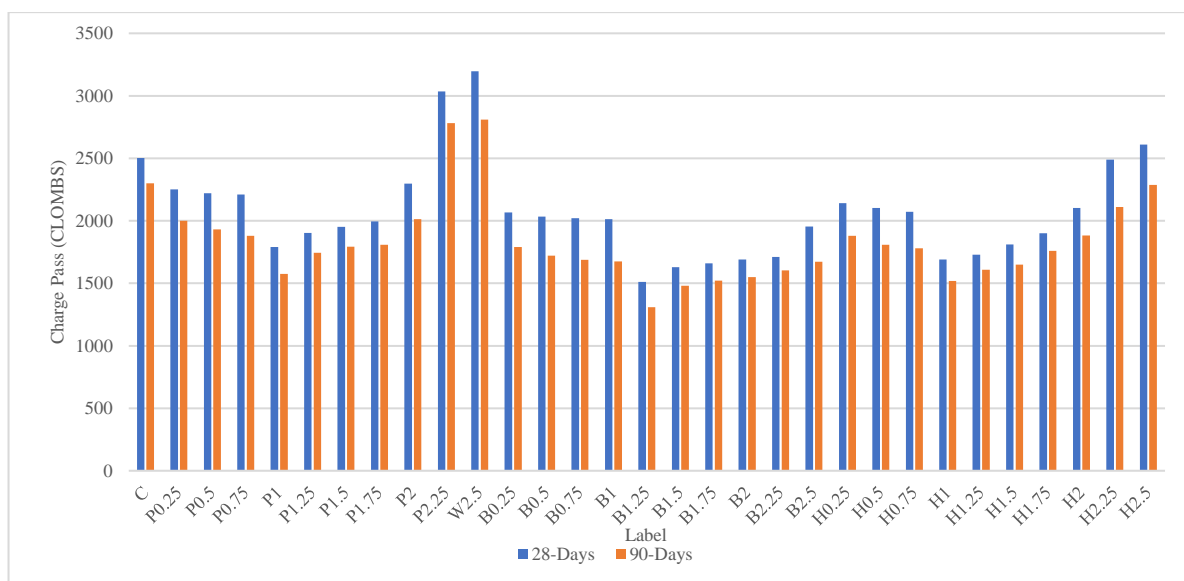
نتایج مربوط به آزمایش نفوذ پذیری سریع کلرید (RCPT) در شکل ۱۵ و مقاومت الکتریکی نمونه بتن سبک فاقد الیاف و نمونه‌های حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و بازالت به فرم‌های تکی و ترکیبی در شکل ۱۶ برای سنین ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است.

افزودن درصد بهینه هر سه نوع الیاف پلیمری، الیاف بازالت و الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) به مخلوط بتن سبک، باعث می‌شود که مقدار بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها کاهش یافته و مقاومت الکتریکی افزایش یابد. در نتیجه مقدار نفوذ یون کلرید و یون‌های تحت اثر میدان الکتریکی به نمونه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز کاهش می‌یابد. از میان الیاف‌های مورد بررسی در این مقاله، استفاده از الیاف بازالت در طرح اختلاط بتن سبک به دلیل خواص فیزیکی ظریف و قطر کم باعث پر شدن فضاهای خالی و انسداد حفرات موجود در ساختار بتن سبک شده و بیشترین تاثیر مثبت در بهبود مقاومت الکتریکی و کاهش میزان نفوذ یون کلرید به داخل نمونه‌های بتن سبک را دارد. به‌طوریکه افزودن تمامی مقادیر ذکر شده الیاف بازالت به مخلوط بتن سبک، باعث افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه کاهش میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک در سنین ۲۸ و ۹۰ روز شد. مقدار بهینه استفاده از الیاف بازالت برابر ۱/۲۵٪ است که مقاومت الکتریکی بتن سبک را به میزان ۴۶/۵۴٪ و ۴۶/۴۲٪ افزایش داده و باعث شد میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک به میزان ۳۹/۶۷٪ و ۴۳/۱۵٪ نسبت به نمونه فاقد الیاف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز کاهش یابد که مقدار قابل توجهی است.

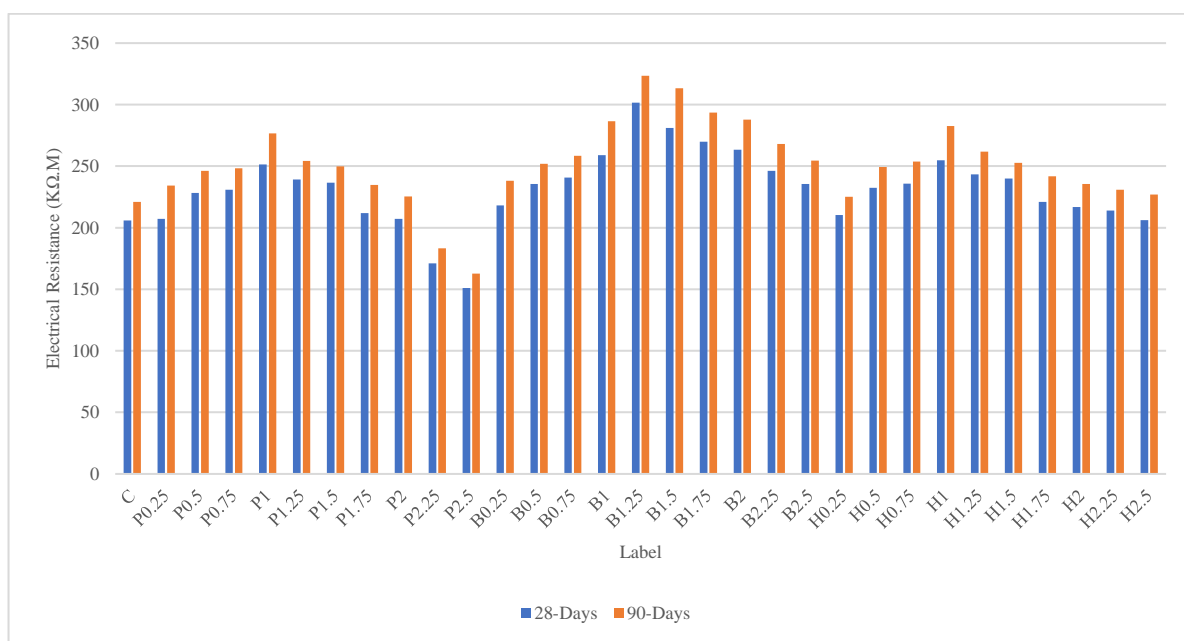
استفاده از مقدار بهینه الیاف پلیمری (۱٪)، باعث افزایش مقاومت الکتریکی به مقدار ۲۲/۰۶٪ و ۲۵/۲۴٪ و در نتیجه کاهش میزان نفوذ یون کلرید و یون‌های تحت اثر میدان الکتریکی به داخل بتن سبک به میزان ۲۸/۵۲٪ و ۳۱/۵٪ نسبت به نمونه کنترل در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌شود، که دلیل این امر را می‌توان جلوگیری از باز شدن دهانه ترک‌ها و گسترش ترک‌های موجود ناشی از انقباض بتن سبک از طریق مکانیسم پل زدن الیاف پلیمری در دهانه ترک‌ها و فضاهای خالی بیان کرد. در صورت استفاده از مقادیر زیاد الیاف پلیمری (۲/۲۵٪، ۲/۵٪) در مخلوط بتن سبک، میزان مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش یافته و میزان نفوذ یون کلرید به داخل نمونه نسبت به نمونه کنترل بیشتر است. همچنین استفاده از درصد بهینه الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) تاثیر بیشتری در بهبود مقاومت الکتریکی و کاهش میزان نفوذپذیری کلرید بتن سبک نسبت به استفاده از الیاف پلیمری بصورت تکی در بتن سبک دارد، که علت این امر تاثیر هم‌افزایی مثبت الیاف بازالت بر الیاف پلیمری است. افزودن ۱٪ الیاف ترکیبی به مخلوط بتن سبک، مقاومت الکتریکی را به میزان ۲۳/۸۰٪ و ۲۷/۹۴٪ نسبت به نمونه فاقد الیاف بهبود بخشید و باعث شد که مقدار نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک به میزان ۳۳/۲۸٪ و ۳۴/۰۲٪ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه کنترل کاهش یابد.

میزان بار الکتریکی عبوری از نمونه کنترل در سنین ۲۸ و ۹۰ روز برابر ۲۵۰۳ و ۲۳۰۱ کلوامپرس بود که با توجه به جدول ارائه شده در استاندارد ASTM C1202 [۵۱] میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک برای نمونه کنترل متوسط گزارش می‌شود که با افزودن مقادیر بهینه الیاف بازالت، الیاف پلیمری و الیاف ترکیبی به بتن سبک مقدار بار الکتریکی عبوری از نمونه کاهش می‌یابد و میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک از متوسط به کم تبدیل می‌شود.

همچنین ذکر این نکته ضروری است که استفاده از درصد بهینه میکروسیلیکا در بهبود مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری سریع بتن سبک تاثیر قابل توجهی داشته و باعث می‌شود که الیاف‌ها عملکرد بهتری در بهبود مقاومت الکتریکی و کاهش میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک داشته باشند. میکروسیلیکا با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته تولید می‌کند که با خاصیت پرکنندگی باعث انسداد حفرات و فضاهای خالی بتن سبک شده و مانع تحرک یون کلرید و یون‌های تحت اثر میدان الکتریکی می‌شود.



شکل ۱۵: نتایج مربوط به آزمایش RCPT نمونه‌های بتن سبک



شکل ۱۶: نتایج مربوط به آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن سبک

۵- نتیجه گیری

در این مقاله خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن و دوام شامل درصد جذب آب نهایی، نفوذ پذیری سریع کلرید (RCPT) و مقاومت الکتریکی بتن سبک فاقد الیاف به عنوان نمونه کنترل و نمونه های بتن سبک حاوی مقادیر ۰/۲۵ تا ۲/۵ الیاف پلیمری و الیاف بازالت به فرم‌های تکی و هیبریدی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بررسی شد. به منظور بررسی اثرات الیافها بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک، مقادیر تمامی مصالح و افزودنی‌های مورد استفاده در این مقاله ثابت بوده و فقط مقادیر الیافها متغیر بود. بعد از انجام آزمایشات و تجزیه و تحلیل اطلاعات، نتایج زیر بدست آمد:

۱. افزایش سن عمل آوری نمونه‌های بتن سبک از ۲۸ به ۹۰ روز، باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن سبک شد، که علت آن حفظ رطوبت نمونه‌ها به وسیله آب و کامل شدن فرایند هیدراتاسیون است.
 ۲. افزودن مقدار بهینه هر سه نوع الیاف پلیمری، الیاف بازالت و الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) به مخلوط بتن سبک، باعث بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز شد. از میان الیاف‌های استفاده شده در این مقاله، الیاف پلیمری بیشترین تاثیر و الیاف بازالت کمترین تاثیر را در بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی داشتند. همچنین تاثیر الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت) در بهبود مقاومت فشاری مقاومت کششی بتن سبک، به مقدار ناچیز از الیاف بازالت به فرم تکی بیشتر است که علت این امر هم افزایشی مثبت الیاف پلیمری بر الیاف بازالت است که ضعف‌های الیاف بازالت را تا حدودی جبران می‌کند.
 ۳. بهترین عملکرد استفاده از الیاف‌های پلیمری و بازالت به فرم تکی و ترکیبی در مخلوط بتن سبک، مربوط به افزایش قابل توجه مقاومت کششی بتن سبک است، که باعث شد بتن سبک از یک ماده ترد و شکننده به یک ماده شکل پذیرتر و با ظرفیت کششی بیشتر تبدیل بشود.
 ۴. با توجه به خرابی و گسیختگی نمونه‌ها بعد از اعمال بارهای فشاری و کششی، نتیجه‌گیری شد که مقاومت نمونه‌های حاوی الیاف در برابر خرابی و گسیختگی ناشی از بارگذاری نسبت به نمونه کنترل به مراتب بیشتر بوده و نمونه‌های حاوی الیاف های ذکر شده کمتر دچار خرابی و ترک خوردگی شده اند. نمونه‌ای که حاوی ۱٪ الیاف پلیمری است، کمترین میزان خرابی و ترک خوردگی را داشت.
 ۵. افزودن مقادیر بهینه الیاف‌های پلیمری و بازالت به فرم تکی و هیبریدی به مخلوط بتن سبک، باعث کاهش درصد جذب آب نهایی بتن سبک و بهبود دوام آن شد. الیاف بازالت به دلیل قطر کم و قرار گیری در حفرات و انسداد فضاهای خالی ساختار بتن سبک بیشترین تاثیر را در کاهش درصد جذب آب نهایی بتن سبک نسبت به الیاف پلیمری و ترکیبی داشت. همچنین، در صورت استفاده از مقدار بهینه الیاف پلیمری (۰.۱٪)، مقدار جذب آب نهایی بتن سبک به مقدار قابل قبول کاهش یافته که دلیل این امر را می‌توان مکانیسم پل زدن الیاف پلیمری در دهانه ترک‌ها و جلوگیری از گسترش ترک‌ها دانست. لازم به ذکر است استفاده از مقدار بهینه میکروسلیکا باعث انسداد فضاهای خالی موجود در ساختار بتن سبک شده و به عملکرد بهتر الیاف پلیمری در کاهش جذب آب نهایی بتن سبک کمک می‌کند.
 ۶. هرچقدر میزان مقاومت الکتریکی بیشتر باشد، مقدار بار الکتریکی عبوری و همچنین میزان نفوذ یون کلرید و یون‌های تحت اثر میدان الکتریکی به داخل بتن سبک کمتر و در نتیجه میزان خوردگی کمتر است. افزودن درصد بهینه الیاف بازالت، الیاف پلیمری و الیاف ترکیبی به مخلوط بتن سبک، باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن سبک شده و مقدار بار عبوری از نمونه و میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک را کاهش می‌دهد. از میان الیاف‌های مورد بررسی در این مقاله، الیاف بازالت بهترین تاثیر مثبت را در افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش بار الکتریکی عبوری و نفوذ پذیری یون کلرید داشت. همچنین استفاده از مقدار مناسب الیاف پلیمری (۰.۱٪) نیز باعث افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش مقدار نفوذ پذیری کلرید بتن سبک شد که دلیل این امر پل زدن الیاف در دهانه ترک‌ها و استفاده از مقدار بهینه میکرو سلیکا بوده که با خاصیت پرکنندگی به عملکرد بهتر الیاف‌ها در بهبود دوام کمک می‌کند.
 ۷. استفاده از الیاف ترکیبی (پلیمر+بازالت)، به دلیل اثر هم افزایشی مثبت الیاف بازالت بر الیاف پلیمری، نسبت به استفاده تکی از الیاف پلیمری، به مقدار ناچیز تاثیر بیشتری در کاهش درصد جذب آب نهایی، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن سبک در سنین ۲۸ و ۹۰ روز دارد.
- با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که استفاده از مقادیر بهینه الیاف‌های بررسی شده در این مقاله در بهبود خواص مکانیکی و دوام اثر مثبت داشته و همین امر باعث افزایش طول عمر سازه و بهبود عملکرد آن، کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری و همچنین آسیب کم تر به محیط زیست می‌شود.

مراجع

- [1] ACI 213R-87. (2014). Guide for structural Lightweight-aggregate concrete. *American Concrete Institute (ACI)*, Farmington, Hills, Michigan.
- [2] Majhi RK, Padhy A, Nayak AN. (2021). Performance of structural lightweight concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 3:100121.
- [3] Real S, Gomes MG, Rodrigues AM, et al. (2016). Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. *Construction and Building Materials*, 121:460-470.
- [4] Roufael G, Beaucour A-L, Eslami J, et al. (2020). Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 268:121221.
- [5] Global construction. (2020). *Global construction Perspective and oxford Economic*. London, UK. 1-9.
- [6] Rashad AM. (2016) A synopsis about perlite as building material—A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 121:338-353.
- [7] Rashad AM. (2016). Vermiculite as a construction material—A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 125:53-62.
- [8] Mo KH, Alengaram UJ, Jumaat MZ, et al. (2015). Feasibility study of high volume slag as cement replacement for sustainable structural lightweight oil palm shell concrete. *Journal of cleaner production*, 91:297-304.
- [9] Adesina A. (2021). Overview of the influence of waste materials on the thermal conductivity of cementitious composites. *Cleaner Engineering and Technology*, 2:100046.
- [10] Fongang RT, Pemndje J, Lemougna P, et al. (2015). Cleaner production of the lightweight insulating composites: microstructure, pore network and thermal conductivity. *Energy and Buildings*, 107:113-122.
- [11] Tuncel EY, Pekmezci BY. (2018). A sustainable cold bonded lightweight PCM aggregate production: Its effects on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 181:199-216.
- [12] Basha SI, Ali M, Al-Dulaijan S, et al. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 32:101710.
- [13] Schumacher K, Saßmannshausen N, Pritzel C, et al. (2020). Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density. *Construction and Building Materials*, 264:120167.
- [14] A. Sujatha, S. Deepa Balakrishnan. (2023). Properties of high strength lightweight concrete incorporating crushed coconut shells as coarse aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [15] Sikora P, Rucinska T, Stephan D, et al. (2021) Evaluating the effects of nanosilica on the material properties of lightweight and ultra-lightweight concrete using image-based approaches. *Construction and Building Materials*, 264:120241.
- [16] Nadh VS, Vignan GS, Hemalatha K, et al. (2021). Mechanical and durability properties of treated oil palm shell lightweight concrete. *Materials Today: Proceedings*, 47:282-285.
- [17] Muhtar. (2023). Performance-based experimental study into quality zones of lightweight concrete using pumice aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, e01960.
- [18] Tedjditi AK, Ghomari F, Taleb O, et al. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 265:120734.
- [19] Lau P, Teo D, Mannan M. (2018). Mechanical, durability and microstructure properties of lightweight concrete using aggregate made from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 176:24-34.
- [20] Patel S, Majhi R, Satpathy H, et al. (2019). Durability and microstructural properties of lightweight concrete manufactured with fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate. *Construction and Building Materials*, 226:579-590.
- [21] Hasan M, Saidi T, Afifuddin M. (2021). Mechanical properties and absorption of lightweight concrete using lightweight aggregate from diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, 277:122324.
- [22] M. Sifan, B. Nagarathnam, J. Thamboo, K. Poologanathan, M. Corradi. (2023). Development and perspectives of lightweight high strength concrete using lightweight aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 362, 129628.
- [23] Abdeliazim Mustafa Mohamed, Bassam A. Tayeh, Yazan I. Abu Aisheh, Musab Nimir Ali Salih. (2023). Exploring the performance of steel fiber reinforced lightweight concrete: A case study review. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, e01968.
- [24] Neville AM, Brooks JJ. (1987). Concrete technology. *Longman Scientific & Technical England*, Vol. 438..
- [25] Mehta PK, Monteiro PJ. (2017). Concrete microstructure, *properties and materials*.
- [26] Trabelsi A, Kammoun Z. (2020). Mechanical properties and impact resistance of a high-strength lightweight concrete incorporating prickly pear fibres. *Construction and Building Materials*, 262:119972.
- [27] Sahoo S, Selvaraju AK. (2020). Mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete made with sintered fly ash aggregates and synthetic fibres. *Cement and Concrete Composites*, 113:103712.

- [28] T. Jiang, Y. Wang, S. Shi, N. Yuan, X. Wu, D. Shi, K. Sun, Y. Zhao, W. Li, J. Yu. (2022). Study on compressive strength of lightweight concrete filled with cement-reinforced epoxy Macrospheres and basalt fibers, *Structures*, Volume 44, Pages 1347-1355.
- [29] Karamloo M, Afzali-Naniz O, Doostmohamadi A. (2020). Impact of using different amounts of polyolefin macro fibers on fracture behavior, size effect, and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*,250:118856.
- [30] Saradar A, Nemati P, Paskiabi AS, et al. (2020). Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: Experimental and numerical assessment. *Journal of Building Engineering*,32:101732.
- [31] Amin M, Tayeh BA. (2020). Investigating the mechanical and microstructure properties of fibre-reinforced lightweight concrete under elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*,13:e00459.
- [32] Poongodi K, Murthi P. (2020). Impact strength enhancement of banana fibre reinforced lightweight self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*,27:1203-1209.
- [33] Nahhab AH, Ketab AK. (2020). Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on the fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. *Construction and Building Materials*,233:117922.
- [34] Altalabani D, Bzeni DK, Linsel S. (2020). Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;252:119084.
- [35] Zeng Y, Sun P, Tang A, et al. (2020). Shear performance of lightweight aggregate concrete with and without chopped fiber reinforced. *Construction and Building Materials*,263:120187.
- [36] Zinkaah OH. (2014). Influence of steel fibers on the behavior of light weight concrete made from crushed clay bricks. *American Journal of Civil Engineering*,2(4):109-116.
- [37] Yew MK, Yew MC, Saw LH, et al. (2019). Influence of High Performance Hybrid Polyvinyl Alcohol-Polypropylene Fibres on Mechanical Properties of Oil Palm Shell Lightweight Concrete. *Engineering, Materials Science*,
- [38] Dawood ET, Mohammad YZ, Abbas WA, et al. (2018). Toughness, elasticity and physical properties for the evaluation of foamed concrete reinforced with hybrid fibers. *Heliyon*,4(12):e01103.
- [39] Mohseni E, Kazemi MJ, Koushkbaghi M, et al. (2019). Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials*, 209:532-540.
- [40] Hossain K, Hossain M, Manzur T. (2020). Structural performance of fiber reinforced lightweight self-compacting concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Journal of Building Engineering*,30:101291.
- [41] Salmasi F, Mostofinejad D. (2020). Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*,251:119032.
- [42] ASTM C150. (2015). Standard Specification for Portland Cement. *American Society for Testing and Materials*.
- [43] ACI 116R-90. (2000). Cement and Concrete Terminology. *American Concrete Institute*.
- [44] ASTM C1240-15. (2015). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. *American Society for Testing and Materials*.
- [45] ASTM C136. (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials*.
- [46] ASTM C127. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *American Society for Testing and Materials*.
- [47] ASTM C330. (2014). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- [48] ASTM C1017. (2013). Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- [49] ASTM C494 type F. (2016). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- [50] ACI 211-98. (2004). Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. *American Concrete Institute*.
- [51] ASTM C192. (2015). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *American Society for Testing and Materials*.
- [52] ASTM C39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*.
- [53] ASTM C496. (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*.
- [54] ASTM C642. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *American Society for Testing and Materials*.

- [55] ASTM C1202. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *American Society for Testing and Materials*.
- [56] ASTM C1760. (2012). Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- [57] B. Tayebani, D. Mostofinejad. (2019). Penetrability, corrosion potential, and electrical resistivity of bacterial concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(3), 04019002.
- [58] N. Parastegari, D. Mostofinejad, D. Poursina. (2019). Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete, *Construction and Building Materials*, 210:588-595.