Journal of Structural and Construction Engineering, 11(12), 2025, pp. 164-184

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigating the behavior of lightweight structural concrete reinforced with fibers by laboratory method

Mehdi Khoshvatan [1], Mohsen Oghabi [2*]

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

ABSTRACT

The use of natural and artificial lightweight materials is a suitable solution to reduce the dimensions of the structure, minimize the seismic force of concrete structures, increase the speed and ease of implementation, and finally reduce the costs of construction and maintenance of concrete structures. In this article, the effect of the use of Leca and Perlite aggregates on the mechanical properties of lightweight concrete was investigated. In the following, by adding different percentages of basalt and polymer fibers to the light concrete mixing plan, the effects of fibers on the mentioned mechanical properties and also the volume of consumed materials were investigated. The results showed that the specific weight of lightweight concrete made with Leca and Perlite is 25-30% lower than normal concrete, which has a direct relationship with the compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity. So that the use of the mentioned light aggregates reduced the compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity by 44.88-75%, 17.13-36% and 8.5-30%, respectively, compared to normal weight concrete. On the other hand, the use of the optimal percentage of polymer fibers increased the tensile strength and modulus of elasticity by 14.65% and 21.5%, respectively, compared to the reference sample of the first group (normal weight concrete), and the compressive strength was slightly lower. On the other hand, the addition of fibers in the light concrete mixing plan, due to the improvement of mechanical properties, saves the consumption of materials and reduces the cost of making light concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 December 2023
Revise Date: 29 May 2024
Accept Date: 04 July 2024

Keywords:
Structural lightweight concrete
fiber concrete
concrete behavior
specific weight
compressive strength tensile strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2024.429011.3294

*Corresponding author: Mohsen Oghabi
Email address: Mohsenoghabi@iauksh.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

بررسی رفتار بتن سبک سازه‌ای تقویت شده با الیاف به روش آزمایشگاهی

مهدی خوش وطن[1]، محسن عقابی[2*]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

استفاده از مصالح سبک طبیعی و مصنوعی راه‌حل مناسبی برای کاهش المان‌های سازه‌ای، به‌حداقل رساندن نیروی لرزه‌ای سازه‌های بتنی، افزایش سرعت و سهولت اجرا و در نهایت کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری سازه‌های بتنی است. بررسی پژوهش‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که به‌دلیل ویژگی‌های خاص بتن سبک، بهبود رفتار بتن سبک سازه‌ای با روش‌های مختلفی مانند استفاده از افزودنی و الیاف‌های مختلف در سالیان اخیر بیشتر مورد توجه بوده است. استفاده از الیاف به‌دلیل بهبود اتصال سنگ‌دانه و ملات پیرامونی می‌تواند رفتار بتن را تاحد زیادی بهبود بدهد. استفاده ترکیبی از دو نوع الیاف با مقادیر مختلف به‌عنوان نوآوری تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله تأثیر استفاده از سبکدانه‌های لیکا و پرلیت بر خواص مکانیکی بتن سبک بررسی شد. در ادامه با افزودن درصدهای وزنی سیمان به مقادیر 0/25 تا 2/5 الیاف بازالت و پلیمری به طرح اختلاط بتن سبک، تأثیرات الیاف بر خواص مکانیکی ذکر شده و همچنین حجم مصالح مصرفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با لیکا و پرلیت به میزان ٪30-25 از بتن معمولی کمتر است، که مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته با وزن مخصوص رابطه مستقیم دارد. بطوری‌که استفاده از سبکدانه‌های ذکر شده باعث کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب به میزان ٪75-44/9، 17/1- 36% و ٪30-8/5 نسبت به بتن نمونه شاهد شد. در مقابل استفاده از درصد بهینه الیاف پلیمری باعث شد که مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب به مقدار ٪14/6و ٪21/5 نسبت به نمونه مرجع گروه اول (بتن با وزن نرمال) افزایش و مقاومت فشاری به مقدار ناچیز کمتر باشد. از طرفی افزودن الیاف در طرح اختلاط بتن سبک، به دلیل بهبود خواص مکانیکی، باعث صرفه‌جویی در مصرف مصالح، کاهش هزینه ساخت بتن سبک می‌شود. استفاده از الیاف ترکیبی برای نمونه‌های با سن 28 روزه نسبت به نمونه مرجع باعث افزایش 19 درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های با الیاف 1 درصدی می‌شود. در نمونه‌های با الیاف ترکیبی برای نمونه با 1/75درصد افزایش 18 درصدی مقاومت فشاری می‌شود. استفاده از الیاف بر مقامت خمشی بیشترین مقدار در نمونه‌های با 1 درصد و به نسبت نمونه مرجع 57 درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه‌ای، بتن الیافی، رفتار بتن، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2024.429011.3294
1402/09/23	1403/03/09	1403/04/14	1403/12/30	1403/12/30	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.429011.3294

*نویسنده مسئول: محسن عقابی

پست الکترونیکی: mohsenoghabi@iauksh.ac.ir

1- مقدمه

باوجود مزایای فراوان بتن، اعضای بتنی به دلیل چگالی کمتر بتن نسبت به فولاد، ابعاد بزرگ‌تری نسبت به اعضای فولادی دارند. وزن اعضا در ساختمان‌های بتنی بخش قابل توجهی از بار وارده بر ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد. بتن معمولی وزن بالایی دارد که در هنگام زلزله به دلیل نیروی وزن زیاد می‌تواند باعث ایجاد تنش بیشتر در سازه شود. وزن زیاد بتن یکی از نقاط ضعف آن است. بتن معمولی از سیمان پرتلند، سنگ‌دانه‌های طبیعی، آب و مواد افزودنی (در برخی موارد) ساخته شده است. تمرکز پژوهشگران و مهندسان همواره بر جبران این ضعف بتن یعنی کاهش وزن آن بوده است. سطح انتقال میانی بین سنگ‌دانه‌ها و ماتریس وجود ندارد و یا در صورت وجود بسیار کوچک است که از نظر اهمیت بسیار مهم است. در سال‌های اخیر اکثر متخصصان با بررسی دوام سازه‌های بتن مسلح به‌ویژه در مناطق خورنده به این نتیجه رسیده‌اند که مقاومت به‌تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی تمام خواص بتن به‌ویژه دوام آن باشد. در طراحی بتن برای نواحی مختلف، علاوه بر مقاومت و تحمل بار در طول عملیات، باید به پایایی و دوام آن نیز توجه شود. استفاده از مصالح سبک وزن طبیعی و مصنوعی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش ابعاد سازه و به حداقل رساندن نیروی لرزه‌ای وارد بر سازه‌های بتنی و در نهایت افزایش سرعت اجرا و کاهش هزینه‌ها محسوب می‌شود. بتن سبک را می‌توان با استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک طبیعی مانند پرلیت، ورمیکولیت، رس و شیل تولید کرد [2و1]. اما به دلیل محدود بودن منابع طبیعی و آسیب کم‌تر به محیط زیست، پژوهشگران استفاده از مصالح سبک مصنوعی مانند زباله‌های کشاورزی [3]، زباله‌های لاستیکی و پلاستیکی برش داده شده [4]، پسماندهای پلیمری غیر آلی [5] و محصولات جانبی صنعتی مانند سرباره کوره‌ها [6] را توسعه داده‌اند. به دلیل استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک بجای بخشی یا همه مصالح با وزن نرمال، 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 [7-8] . بوگاس و گومز رفتار مکانیکی و دوام بتن سبک سازه‌ای تولید شده با سنگ‌دانه اسکوریای طبیعی را ارزیابی کردند. به این نتیجه رسیدند که انقباض با جایگزینی مصالح طبیعی با مصالح سبک افزایش می‌یابد [9].

آقامحمدزاده و همکاران به‌طور تجربی رابطه بین تغییر شکل برشی در تیرهای بتن مسلح سبک را ارزیابی کردند. رفتارهای خمشی و برشی تیرهای بتن‌آرمه با بتن سبک و اتصال آنها به ستون به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [10]. سلیم به‌طور تجربی تأثیر شکست مواد مصنوعی را مورد مطالعه قرار داد و نفوذپذیری بتن نشان داد که استفاده از خاکسترهای آتش‌فشانی و مواد سرباره مصنوعی بر خواص عملکردی بتن تأثیر می‌گذارد [11]. در پژوهشی دیگر خوش وطن و پورامینیان [12] اثرات استفاده از سبکدانه‌های لیکا و پوکه و پرلیت را بر خواص مکانیکی و وزن مخصوص بتن سبک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از لیکا نسبت به پوکه و پرلیت، خواص مکانیکی بهتری را در بر دارد. همچنین آنها نتیجه‌گیری کردند که وزن مخصوص بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با مخلوطی از مقادیر بهینه لیکا، پرلیت و پوکه تا ٪31 کمتر از بتن معمولی است [12].

یک راه‌حل مناسب برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن سبک، افزودن الیاف به‌عنوان ماده اضافی کمکی به مخلوط بتن سبک است. 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 ترک‌خوردگی، جلوگیری از افزایش عرض ترک‌های ناشی از انقباض که در مراحل اولیه هیدراتاسیون به وجود آمده‌اند، مقاومت بالا در برابر ضربه و بارهای ضربه‌ای، بهبود قابل‌توجه مقاومت کششی، مقاومت خمشی، سختی خمشی و مدول الاستیسیته اشاره کرد [14و13].

عده‌ای از پژوهشگران نیز بیان کردند افزودن الیاف تأثیر ناچیزی در بهبود مقاومت فشاری بتن سبک دارد و در صورت استفاده از مقادیر بالای الیاف، مقاومت فشاری بتن سبک نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش می‌یابد [15-16] . همچنین اکثر پژوهشگران گزارش دادند افزودن انواع الیاف به مخلوط بتن سبک، کارایی و اسلامپ را کاهش می‌دهد. دلیل این امر کلوخه‌شدن الیاف و انسداد ساختار بتن سبک است [17-18] . ناهاب[1] و همکاران [19] بیان کردند افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن سبک ساخته شده از دانه‌های سبک رس منبسط شده (لیکا)، کارایی را کاهش داده و تأثیر ناچیزی در بهبود مقاومت فشاری داشته است، اما مقاومت خمشی را به مقدار ٪55 نسبت

[1] Nahab

به نمونه بدون الیاف بهبود بخشیده است. همچنین با افزایش مقادیر لیکا، خواص مکانیکی بتن سبک بیشتر دچار ضعف شد [19] . در پژوهشی دیگر، التبانی[2] و همکاران [20] گزارش دادند افزودن ٪0/22 الیاف PP به بتن سبک ساخته شده از لیکا، مقاومت فشاری را به میزان ٪0/12، مقاومت کششی را به مقدار ٪4/5 و مدول الاستیسیته را به مقدار ٪2/55 نسبت به بتن کنترل افزایش یابد. پژوهشگران بیان کرده‌اند که با افزایش دوز الیاف به ٪0/33 مقاومت فشاری به میزان ٪5/30 کاهش‌یافته و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب به مقدار ٪4/7 و ٪3/9 نسبت به بتن کنترل افزایش می‌یابد. بر خلاف پژوهشگران دیگر، ژنگ[3] و همکاران [21] گزارش دادند افزودن ٪0/5 و ٪1/5 الیاف بازالت به بتن سبک ساخته شده از سبکدانه‌های سرامیست مقاومت فشاری را به ترتیب به میزان ٪11/5 و 18/%5 افزایش می‌دهد و دلیل این امر را مقاومت بیشتر سنگ‌دانه‌های سبک سرامیست می‌دانند که باعث می‌شود تأثیر الیاف بازالت بر مقاومت فشاری برجسته‌تر بشود. همچنین پژوهشگران بیان کردند مخلوط بتن سبک حاوی ٪1/5 الیاف بازالت، به مقدار ٪34 مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه بدون الیاف دارد [21].

علی آبادی و همکاران (1402) به بررسی تأثیر انتقال حرارت از قالب بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به محیط کلی بتن خودتراکم و به هسته مرکزی آن نسبت به قالب فولادی St37 حدود 50/61 و 66/62 درصد کاهش می یابد.با استفاده از قالب پلی پروپیلن می توان اثر انتقال حرارت، دما و عوامل محیطی به بتن خودتراکم را کاهش داد و استفاده از آن در سازه های بتنی منجر به دوام بیشتر و افزایش مقاومت فشاری بالاتر نسبت به سایر قالب ها شود[22]. علی آبادی و درخشان نژاد (1402) بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بازیافتی پلی اتیلن ترفتالات بر خواص مکانیکی بتن خود تراکم را انجام دادند. نتایج آزمایش های آنها نشان داد که با افزایش درصد الیاف پلی‌اتیلن‌ترفتالات در بتن خودتراکم مقاومت کششی طی عمل‌آوری 7 و 28 روزه در تا 50 درصد هم افزایش مقاومت نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف می شود[23]. خوش وطن و ملکی (1402) به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک مسلح شده با الیاف پلیمری و بازالت به‌فرم تکی و ترکیبی پرداختند. نتیجه گیری کردند که افزودن مقدار بهینه الیاف، مقاومت الکتریکی را به مقدار حدود 46 درصد افزایش داد، همچنین باعث شد مقدار نفوذ یون‌های کلراید به بتن سبک در سنین 28 و 90 روز به میزان تا 46 نسبت به نمونه فاقد الیاف کاهش یابد. نتیجه‌گیری کردند که الیاف پلیمری بیشترین تاثیر را در بهبود خواص مکانیکی بتن سبک دارد [24].

باتوجه‌به پژوهش صورت گرفته در زمینه بتن سبک، به دلیل مقاومت بهتر بتن متعارف نسبت به بتن سبک بسیاری از پژوهش برای بهبود رفتار بتن انجام شده است. بهبود رفتار بتن سبک با روش‌های مختلفی مورد توجه پژوهشگران بوده است. استفاده از الیاف به‌دلیل بهبود اتصال سنگ‌دانه و ملات پیرامونی موضوعی مهم و مورد توجه برای بهبود رفتار بتن سبک است. پژوهشگران از الیاف‌های مختلف و درصدهای متفاوت از 1 تا 3 درصد برای افزایش عملکرد بتن سبک استفاده کرده‌اند که به نظر می‌رسد استفاده از الیاف ترکیبی بازالت و پلیمری با مقادیری متفاوتی از درصدهای استفاده از الیاف کمتر مورد توجه بوده و نوآوری تحقیق حاضر است. در این مقاله اثرات استفاده از مصالح سبک پرلیت و لیکا بر وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن بررسی شد. همچنین به‌منظور بررسی اثرات الیاف بر خواص مکانیکی، از مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و الیاف بازالت در طرح اختلاط بتن سبک استفاده شد و خواص مکانیکی بتن سبک مسلح به الیاف با خواص مکانیکی بتن معمولی و بتن سبک فاقد الیاف باهم مقایسه شد.

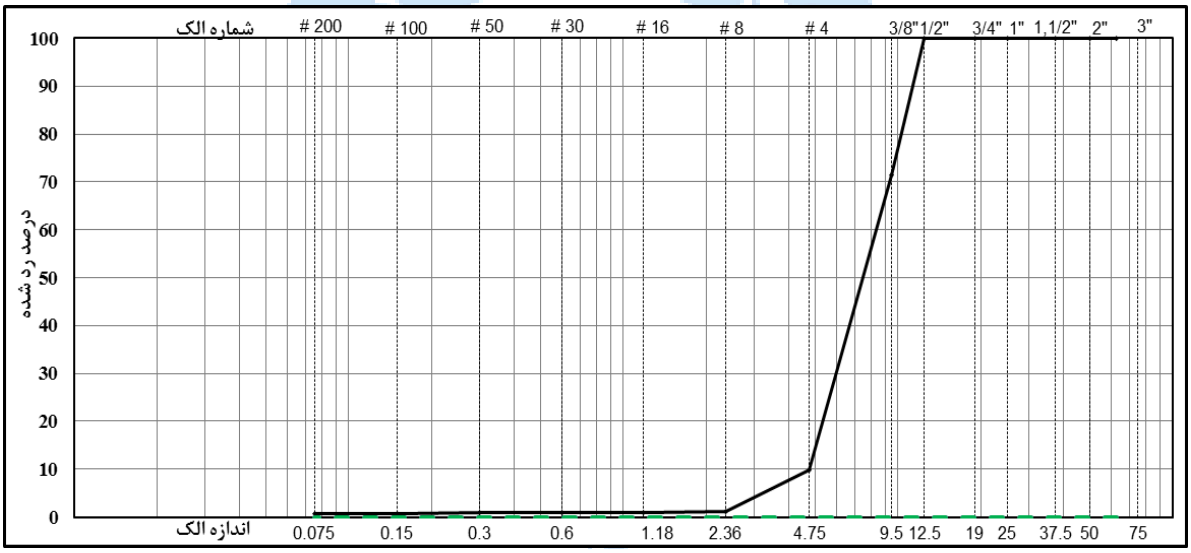
2-روش آزمایش

2-1- مصالح

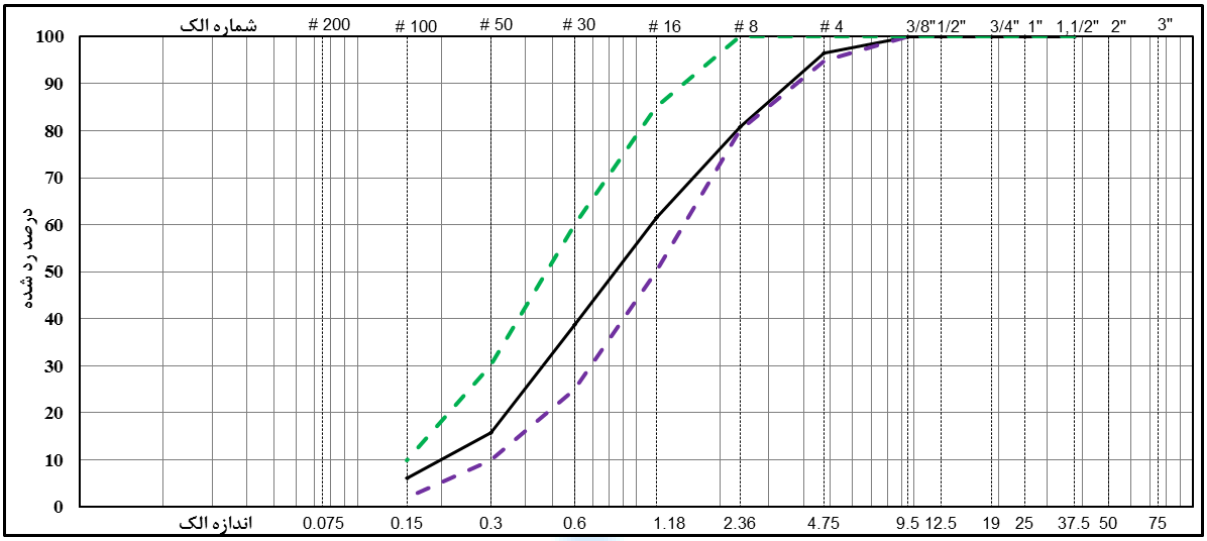
در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ 2 کارخانه سیمان سامان کرمانشاه با مقاومت فشاری 28 روزه 52 MPa، وزن مخصوص 3120 kg/m^3 و سطح ویژه (بلین) 3200 cm^2/gr که مطابق با استاندارد ASTM C150 [25] تولید شده است، استفاده شد. همچنین

[2] Altalabani
[3] Zeng

به‌منظور تقویت مخلوط‌های بتنی از میکرو سیلیکا کارخانه فرو آلیاژ ایران که مطابق با استاندارد ASTM C1240 [26] و همچنین پودر سنگ به‌عنوان ماده مکمل سیمان استفاده شد. جدول 1 مشخصات شیمیایی سیمان و میکرو سیلیکا نشان داده شده است که شامل ترکیبات، درصد سیمان و درصد میکرو سیلیکا می‌باشد. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این مقاله از نوع شن طبیعی با حداکثر اندازه mm 12/5 به‌عنوان سنگ‌دانه درشت و ماسه طبیعی با حداکثر اندازه mm 4/75 به‌عنوان سنگ‌دانه ریز است. چگالی شن و ماسه طبق آزمایش استاندارد ASTM C136 [27] انجام شده است. همچنین به‌منظور دستیابی به وزن مخصوص کمتر در نمونه‌های بتن، از سبکدانه‌های لیکا و پرلیت در طرح اختلاط بتن استفاده شد. دانه بندی شن و ماسه مطابق استاندارد ASTM C330 [28] بدست آمد. در جدول 2 مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها ارائه شده است. لیکا و پرلیت نیز مطابق استاندارد ASTM C330 [28]دانه بندی شدند. به‌منظور بهبود و مقایسه خواص مکانیکی بتن سبک فاقد الیاف و حاوی الیاف، از مقادیر مختلف الیاف پلیمری با نام تجاری KORTTA WAVE به طول 55 mm و الیاف بازالت به طول 12 mm استفاده شد. جدول 3 مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌ها را نشان می‌دهد. به‌منظور حفظ کارایی مطلوب و کاهش مقدار آب، از یک ابر روان کننده و کاهنده آب بر پایه پلی کربوکسیلات اتر که مطابق با استاندارد ASTM C1017 [29]ساخته شده است استفاده شد. در شکل 1 الف و ب نمودارهای دانه بندی مربوط به شن و ماسه آورده شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر طبق آزمایش‌های صورت گرفته بدست آمده و در متن مقاله آورده شده است. این مشخصات شامل مشخصات شیمیایی سیمان و میکرو سیلیکا، مشخصات فیزیکی و مکانیکی شن، ماسه، لیکا، پرلیت، مشخصات فیزیکی، مشخصات مکانیکی الیاف پلیمری و الیاف بازالت که در جداول 1 تا 3 آورده شده است.



الف: نمودار دانه‌بندی شن



ب: نمودار دانه‌بندی ماسه

شکل 1: دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده در تحقیق حاضر

جدول 1: مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیکا

ترکیب	سیمان (درصد)	میکرو سیلیکا (درصد)
SiO_2	20/7±0/3	95-90
CaO	65±0/5	0/5 -1
Al_2O_3	5/2±0/2	0/6 -1/2
Fe_2O_3	4/0±6/2	1/2 -1/8
Na_2O	0/0±15/2	-
MgO	1/8±0/2	0/6 -1/2
So_3	2/2±0/4	-
K_2O	0/5±0/05	-
C	-	0/8 -2
Cl	-	0/05 -0/07
C_3S	59/47	-
C_2S	14/48	-
C_3A	6	-
C_4AF	14	-
Free CaO	1/3±0/2	-

جدول 2: مشخصات فیزیکی و مکانیکی شن، ماسه، لیکا و پرلیت

خصوصیات	درشت‌دانه (شن)	ریزدانه (ماسه)	پرلیت	لیکا
سایز (میلمیتر)	12-6	6-0	1-5	10-4
چگالی توده (کیلوگرم بر مترمکعب)	2720	2713	400	370
چگالی خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)	2659	2585	360	320
مدول نرمی	6/14	3/00	-	-
جذب آب (درصد)	0/79	1/8	7	18
ضریب نرمی	-	3/00	-	-
هم ارز ماسه‌ای	-	79	-	-

جدول 3: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلیمری و الیاف بازالت

الیاف	طول (میلیمتر)	قطر (میکرومتر)	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	جذب آب (درصد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
پلیمری	55	200	275	700-450	7000-3500	0	910
بازالت	12	18/5	64/9	3200-2800	92000-82000	10-8	2800

بدلیل خصوصیات ذاتی الیاف جذب آب در الیاف پلیمری صفر می باشد.

شکل 2. الیاف مورد استفاده در تحقیق حاضر

شکل 2. الیاف مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. از دو نوع الیاف پلیمری و بازالت در تحقیق حاضر استفاده شده است. شکل 3. میکروسیلیکای مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

شکل 3: میکروسیلیکای مورد استفاده در تحقیق حاضر

شکل 4: سنگ‌دانه لیکای مورد استفاده در تحقیق حاضر

لیکا به معنای دانه رس منبسط شده است. خاک رس را با مواد تشکیل‌دهنده بلوک در دمای 1200 سانتی‌گراد قرار می‌دهند. وقتی خاک رس به این دما می‌رسد گازهایی از آن خارج می‌شود که باعث می‌شود بلوک به حالت منبسط در بیاید. منبسط شدن دانه‌ها منجر به مقاوم شدن و سبک بودن بلوک‌های لیکا شده است. در نهایت تبدیل به پوکه صنعتی لیکا می‌شود. در این تحقیق از لیکا و پرلیت استفاده شده است. در شکل 4. تصویر لیکای مورد استفاده نشان داده شده است.

2-2- طرح اختلاط

در این تحقیق تعداد 10 طرح اختلاط مطابق با آیین نامه ACI 211 [30] برای نمونه‌های فاقد الیاف طراحی شد که در این گروه مقادیر مصالح به‌منظور رسیدن به طرح اختلاط بهینه متغیر است. همچنین در این گروه یک طرح اختلاط مربوط به بتن مرجع (بتن با وزن معمولی) می‌باشد. در مرحله بعد و برای گروه دوم طرح اختلاط، تعداد 20 طرح اختلاط حاوی مقادیر ٪0/25، ٪0/5، ٪0/75، 1٪25، 1٪5، 1٪75، 2٪1، 2٪25 و ٪2/5 الیاف بازالت و پلیمری و 1 طرح اختلاط برای بتن سبک فاقد الیاف طراحی شد. با این تفاوت که در گروه طرح اختلاط های حاوی الیاف، مقادیر تمامی مصالح ثابت بوده و فقط مقادیر الیاف‌ها متغیر بود. علت این امر بررسی تأثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن سبک و همچنین کاهش هزینه‌های ساخت بتن سبک سازه‌ای است. در جدول 4 و 5 طرح اختلاط نمونه‌های فاقد الیاف و نمونه‌ها حاوی الیاف‌های ذکر شده ارائه شده است.

جدول 4: طرح اختلاط‌های گروه اول (نمونه بتن با وزن نرمال و نمونه‌های سبک فاقد الیاف)

شماره طرح اختلاط	سیمان(کیلوگرم بر مترمکعب)	میکروسیلیکا (کیلوگرم بر مترمکعب)	پورد سنگ(کیلوگرم بر مترمکعب)	سنگدانه(کیلوگرم بر متر مکعب)	ماسه (کیلوگرم بر مترمکعب)	لیکا+پرلیت(کیلوگرم بر مترمکعب)	آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	فوق روان کننده (کیلوگرم بر مترمکعب)
NW-Ref	400	40	-	900	900	-	140	9
LW1	400	40	55	350	570	295/8	120	9
LW2	400	40	55	350	500	350/5	120	9
LW3	400	40	53	340	550	268/3	140	9
LW4	400	0/4	53	340	485	339	140	9
LW5	400	40	51	330	535	245/3	160	9
LW6	400	40	55	350	570	521/9	120	9
LW7	400	40	55	350	498	295/3	120	9
LW8	400	40	53	340	551	243/8	140	9
LW9	400	40	53	340	482	286	140	9

جدول 5: طرح اختلاط‌های گروه دوم (نمونه سبک فاقد الیاف و نمونه‌های سبک حاوی مقادیر مختلف الیاف پلیمری و الیاف بازالت)

شماره طرح اختلاط	سیمان(کیلوگرم بر مترمکعب)	میکروسیلیکا (کیلوگرم بر مترمکعب)	سنگدانه(کیلوگرم بر متر مکعب)	ماسه (کیلوگرم بر مترمکعب)	لیکا(کیلوگرم بر مترمکعب)	آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	فوق روان کننده (کیلوگرم بر مترمکعب)	الیاف پلیمری (درصد)	الیاف بازالت (درصد)
LW-C	460	69	240	650	220	201	4/25	-	-
LW-$PF_{0.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	0/25	-
LW-$PF_{0.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	0/5	-
LW-$PF_{0.75\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	0/75	-
LW-$PF_{1\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	1	-
LW-$PF_{1.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	1/25	-
LW-$PF_{1.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	1/5	-
LW-$PF_{1.75\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	1/75	-
LW-$PF_{2\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	2	-
LW-$PF_{2.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	2/25	-
LW-$PF_{2.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	2/5	-
LW-$BF_{0.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	0/25
LW-$BF_{0.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	0/5
LW-$BF_{0.75\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	0/75
LW-$BF_{1\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	1
LW-$BF_{1.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	1/25
LW-$BF_{1.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	1/5
LW-$BF_{1.75\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	1/75
LW-$BF_{2\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	2
LW-$BF_{2.25\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	2/25
LW-$BF_{2.5\%}$	460	69	240	650	220	201	4/25	-	2/5

3-2- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در تمامی طرح‌های اختلاط، ابتدا مصالح خشک مانند سنگ‌دانه‌ها، لیکا، پرلیت، سیمان و میکرو سیلیکا به‌صورت مرحله‌ای به محفظه مخلوط کن اضافه شدند و عمل اختلاط خشک صورت گرفت. سپس آب و فوق روان‌کننده در دو مرحله به مخلوط خشک اضافه

شد. برای طرح اختلاط‌های حاوی الیاف، به‌منظور جلوگیری از کلوخه‌شدن و به هم پیوستن الیاف‌ها، در مرحله آخر و طی چند مرحله الیاف ها بصورت خشک به مخلوط بتن اضافه شدند و عمل اختلاط تا بدست‌آمدن یک مخلوط یک‌دست و قابل‌قبول ادامه یافت. سپس فرایند بتن‌ریزی در قالب‌ها در سه مرحله انجام شد. در هر مرحله 1/3 حجم قالب پر شده و به‌وسیله چکش لاستیکی تعداد 25 ضربه به بدنه قالب و به‌وسیله تخماق فولادی 25 ضربه به بتن داخل قالب به‌منظور متراکم‌کردن و خروج حباب‌های هوا ضربه وارد شد. بعد از بتن‌ریزی سطح نمونه‌ها کپینگ شده و نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در محیط آزمایشگاه ثابت نگه داشته شدند. بعد از 24 ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها برای عمل‌آوری به حوضچه عمل‌آوری انتقال یافتند و به مدت 28 روز در حوضچه به‌وسیله آب مطابق استاندارد ASTM C192 [31] عمل-آوری شدند. شکل 5. حوضچه عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

شکل 5: حوضچه عمل آوری نمونه‌های ساخته شده

3- نتایج تحقیق

3-1- وزن مخصوص بتن سبک

مطابق استاندارد ASTM C330 [28] و ACI 213R [32] بتن سبک سازه‌ای ضمن داشتن مقاومت فشاری بالاتر از 17 MPa وزن مخصوص کمتر از 1900 kg/m^3 دارد. در جدول 6 وزن مخصوص نمونه‌های بتن سبک ساخته شده ارائه شده است. باتوجه‌به نتایج ارائه شده مشخصات که استفاده از سبکدانه‌های لیکا و پرلیت بجای بخشی از سنگ‌دانه‌های با وزن معمولی، به دلیل وزن مخصوص کم این مصالح، باعث کاهش چگالی بتن می‌شود. در گروه اول و دوم طرح اختلاط‌های این مقاله، وزن مخصوص تمامی نمونه‌ها (به‌جز نمونه مرجع در طرح اختلاط‌های فاقد الیاف) در محدوده استاندارد بتن سبک بوده و کمتر از 1900 kg/m^3 است. بااین‌حال در نمونه‌های حاوی الیاف پلیمری و بازالت، وزن مخصوص نمونه‌ها تا ٪9 بیشتر از نمونه مرجع همان گروه است که این به دلیل پر کردن فضاهای خالی ساختار بتن و متراکم‌تر شدن ماتریس بتن سبک بوده که باعث می‌شود به میزان ناچیز وزن مخصوص بیشتر بشود.

جدول 6: وزن مخصوص نمونه‌های گروه اول و دوم

نام طرح اختلاط	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	نام طرح اختلاط	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
NW-Ref	2405	LW-C	1721
LW1	1845	LW-$PF_{0.25\%}$	1733
LW2	1825	LW-$PF_{0.5\%}$	1791
LW3	1830	LW-$PF_{0.75\%}$	1793
LW4	1800	LW-$PF_{1\%}$	1830
LW5	1788	LW-$PF_{1.25\%}$	1863
LW6	1755	LW-$PF_{1.5\%}$	1850
LW7	1735	LW-$PF_{1.75\%}$	1876
LW8	1745	LW-$PF_{2\%}$	1899
LW9	1712	LW-$PF_{2.25\%}$	1900
		LW-$PF_{2.5\%}$	1905
		LW-$BF_{0.25\%}$	1730
		LW-$BF_{0.5\%}$	1739
		LW-$BF_{0.75\%}$	1746
		LW-$BF_{1\%}$	1752
		LW-$BF_{1.25\%}$	1767
		LW-$BF_{1.5\%}$	1773
		LW-$BF_{1.75\%}$	1790
		LW-$BF_{2\%}$	1798
		LW-$BF_{2.25\%}$	1825
		LW-$BF_{2.5\%}$	1831

2-3- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری به‌عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت بتن مطابق با استاندارد ASTM C39-30 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300mm انجام شده است. در گروه اول طرح اختلاط که فاقد الیاف هستند، استفاده از مقادیر مختلف سبکدانه‌های لیکا و پرلیت، باعث کاهش چشمگیر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (بتن با وزن معمولی) در سن ۲۸ روز شده است. هرچقدر مقدار مصالح سبک‌دانه در طرح اختلاط بیشتر باشد، مقاومت فشاری به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت که وزن مخصوص با مقاومت فشاری رابطه مستقیم دارد. به این معنی که با کاهش وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری آن نیز کاهش می‌یابد. کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه LW9 است که حاوی ٪15 پرلیت و ٪50 لیکا است. این نمونه وزن مخصوص کمتری از نمونه‌های دیگر دارد و به طبع آن مقاومت فشاری آن کمتر از سایر نمونه‌های موجود در طرح اختلاط گروه اول است.

در مقابل، در طرح اختلاط‌های گروه دوم که حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و بازالت هستند، مقاومت فشاری به میزان قابل‌قبول از نمونه‌های فاقد الیاف و همچنین نمونه‌های مرجع در هر دو گروه اول و دوم بیشتر است. افزودن ٪1 الیاف پلیمری به مخلوط بتن سبک بهترین تأثیر را در بهبود مقاومت فشاری داشته و آن را به میزان ٪24/4 نسبت به نمونه مرجع گروه دوم (نمونه سبک فاقد الیاف) و به میزان ٪71/32 نسبت به نمونه شماره LW1 که دارای بیشترین مقاومت فشاری در گروه اول طرح اختلاط در بین نمونه‌های بتن سبک است افزایش می‌دهد که مقدار چشمگیری است. در مقایسه مقاومت فشاری نمونه بتن سبک حاوی ٪1 الیاف پلیمری با نمونه مرجع گروه اول که بتن با وزن معمولی است، مقاومت فشاری بتن سبک حاوی ٪1 الیاف پلیمری، به مقدار ٪6 کمتر از نمونه بتن با وزن

معمولی است. درحالی‌که وزن مخصوص آن به مقدار ٪24 کمتر از بتن معمولی است. پس به دلیل کاهش وزن قابل‌قبول می‌توان از مقدار اختلاف ناچیز مقاومت فشاری بتن سبک نسبت به بتن با وزن معمولی چشم‌پوشی کرد.

شکل‌های 6 تا 9 به ترتیب شکست نمونه‌های بتن با وزن معمولی، بتن سبک فاقد الیاف، نمونه بتن سبک حاوی ٪1 الیاف پلیمری و نمونه بتن سبک حاوی ٪1/75 الیاف بازالت بعد از آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های نام برده شده، نمونه بتن سبک که فاقد الیاف است (LW-Ref) بعد از اعمال بار فشاری بیشترین خرابی و گسیختگی را داشته است و در هنگام آزمایش مقاومت فشاری، به‌طور ناگهانی دچار خرابی و شکست شد. در این نمونه، به دلیل استفاده از مصالح سبک وزن که ساختار ترد و شکننده‌ای دارند و همچنین تخلخل بیشتر بتن سبک نسبت به نمونه بتن با وزن نرمال (NW-Ref)، تحمل تنش و بار فشاری کمتر بوده و خرابی و شکست نسبت به نمونه با وزن نرمال بیشتر است. اما در بتن با وزن نرمال، به دلیل استفاده از سنگ‌دانه‌های معمولی که دارای مقاومت بیشتری نسبت به سبکدانه‌های لیکا و پرلیت هستند، تحمل بار فشاری و مقاومت در برابر خراب شدگی بیشتر از بتن سبک است.

شکل 6: شکست نمونه بتن با وزن نرمال (NW-Ref) بعد از اعمال بار فشاری

شکل 7: شکست نمونه بتن سبک فاقد الیاف (LW-C) بعد از اعمال بار فشاری

همان‌طور که در شکل‌های 6 و 7 مشخص است، نمونه بتن سبکی که حاوی ٪1 الیاف پلیمری است ($LW\text{-}PF_{1\%}$)، به مقدار قابل‌توجهی دچار خرابی و شکست کمتری نسبت به نمونه‌های NW-Ref، LW-Ref، $LW\text{-}BF_{1.75\%}$ شد و در این نمونه هیچ‌گونه شکست و خرابی ناگهانی در هنگام انجام آزمایش مقاومت فشاری و اعمال نیرو رخ نداد. دلیل این امر را می‌توان مکانیسم پل زدن الیاف‌های پلیمری در دهانه ترک‌های موجود و جلوگیری از رشد ترک‌ها، بهبود رفتار بعد از ترک‌خوردگی و همچنین ظرفیت بالای جذب انرژی الیاف پلیمری ذکر کرد که باعث شد مقاومت نمونه بتن سبک در برابر خرابی از همه‌ی نمونه‌ها بیشتر شود. نمونه‌ای که حاوی مقدار ٪1/75 الیاف بازالت است، به مقدار ناچیز نسبت به نمونه سبک فاقد الیاف دچار خرابی شد که دلیل آن را می‌توان ظاهر ظریف و قطر کم الیاف بازالت ذکر کرد.

شکل 8: شکست نمونه بتن سبک حاوی ٪1 الیاف پلیمری (PF1%) بعد از اعمال بار فشاری

شکل 9: شکست نمونه حاوی ٪1/75 الیاف بازالت (BF1.75%) بعد از اعمال بار فشاری

از طرف دیگر، استفاده از مقدار بهینه الیاف پلیمری، باعث می‌شود که حجم مصالح مصرفی مانند شن، ماسه، لیکا و فوق روان-کننده کاهش‌یافته و مصالحی مانند پرلیت و پودر سنگ از طرح اختلاط حذف شده و با مقدار کمتری از مصالح به مقاومت بالاتر از دیگر نمونه‌ها رسید که این خود باعث صرفه‌جویی در مصرف مصالح، کاهش هزینه، عملکرد بهتر در خواص مکانیکی و آسیب کمتر به محیط-زیست می‌شود.

3-3- مقاومت کششی

از دیگر خواص مکانیکی بتن که برای ارزیابی مقاومت بتن از آن استفاده می‌شود، آزمایش مقاومت کششی می‌باشد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C496 [34] بر روی نمونه‌های با قطر 150 میلی‌متر و ارتفاع 300 میلی‌متر انجام شد. مشابه نتایج به‌دست آمده در بحث مقاومت فشاری، استفاده از مصالح سبک‌دانه به دلیل ترد و شکننده بودن، ساختار فضایی و ایجاد فضای خالی و تخلخل بیشتر در ساختار بتن، باعث تأثیر منفی در مقاومت کششی شده و آن را نسبت به بتن با وزن معمولی به مقدار زیاد کاهش می‌دهد. در این مقاله کمترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه شماره LW9 است. در این نمونه مقاومت کششی به مقدار ٪36/13 نسبت به نمونه با وزن معمولی کاهش‌یافته است. در مقابل در گروهی که حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و الیاف بازالت است، مقاومت کششی به میزان قابل‌توجه از نمونه‌های سبک فاقد الیاف بیشتر می‌باشد. بهترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه‌ای است که حاوی ٪1 الیاف پلیمری است. در این نمونه مقاومت کششی به مقدار ٪66/12 نسبت به نمونه مرجع همان گروه طرح اختلاط و به میزان ٪14/65 نسبت به نمونه مرجع گروه اول (بتن با وزن معمولی) بیشتر است که مقدار قابل‌توجهی است. همچنین در طرح اختلاط گروه اول، بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه شماره 6 می‌باشد، که در نمونه حاوی ٪1 الیاف پلیمری مقاومت کششی به مقدار ٪34/6 نسبت به نمونه شماره LW1 بیشتر است که مقدار قابل‌توجهی است. دلیل تأثیر مثبت الیاف در بهبود مقاومت کششی بتن سبک را می‌توان مکانیسم پل زدن الیاف‌ها در دهانه ترک‌های ناشی از منقبض شدن بتن که در مراحل اول هیدراتاسیون به وجود آمده‌اند و همچنین جلوگیری از ازدیاد عرض

دهانه ترک‌های ناشی از بارگذاری دانست که باعث بهبود رفتار بعد از ترک‌خوردگی بتن سبک شده آن را از یک ماده شکننده به یک ماده منعطف‌تر تبدیل می‌کند که دارای ظرفیت کششی بالاتری است.

در شکل‌های 10 تا 13 گسیختگی نمونه‌های بتن با وزن نرمال (NW-Ref)، بتن سبک فاقد الیاف (LW-C)، بتن سبک حاوی 1% الیاف پلیمری ($LW\text{-}PF_{1\%}$) و بتن سبک حاوی 1/75٪ الیاف بازالت ($LW\text{-}BF_{1.75\%}$) بعد از آزمایش مقاومت کششی نشان داده شده است. همان‌طور که از اشکال نشان داده شده مشخص است، گسیختگی ناشی از بارگذاری کششی در نمونه‌ای که حاوی مقادیر ذکر شده مصالح سبک اما فاقد الیاف است (LW-C)، به مقدار چشمگیری از نمونه‌های NW-Ref، $LW\text{-}PF_{1\%}$ و $LW\text{-}BF_{1.75\%}$ بیشتر است. دلیل این امر می‌توان استفاده از مصالح سبک بجای بخشی از سنگ‌دانه‌های معمولی دانست که باعث می‌شود بتن سبک نسبت به بتن معمولی ساختار شکننده‌تری داشته باشد و بیشتر دچار گسیختگی و خرابی شود. همچنین دلیل دیگر را می‌توان تخلخل و فضای خالی بیشتر بتن سبک نسبت به بتن معمولی بیان کرد که پدید آمدن ترک‌ها در ماتریس بتن سبک از این فضاهای خالی شروع شده و باعث می‌شود که مقاومت در برابر گسیختگی بتن سبک از بتن معمولی کمتر باشد.

شکل 10:: گسیختگی نمونه NW-Ref بعد از آزمایش مقاومت کششی

شکل 11: گسیختگی نمونه LW-Ref بعد از آزمایش مقاومت کششی

افزودن مقدار 1٪ الیاف پلیمری به مخلوط بتن سبک، بیشترین تأثیر را در مقاومت در برابر گسیختگی بتن سبک دارد. به طوریکه با توجه به شکل 15، نتیجه گیری می‌شود گسیختگی نمونه‌ای که حاوی 1٪ الیاف پلیمری است، به مقدار چشمگیر کمتر از سایر نمونه‌ها بوده یک ترک بسیار ریز در آن به دلیل اعمال بار کششی به وجود آمده است. دلیل این امر را می‌توان پل زدن الیاف‌ها در دهانه ترک‌ها و جلوگیری از ازدیاد عرض ترک به‌وسیله مکانیسم پل زدن الیاف پلیمری در دهانه ترک دانست که باعث می‌شود ظرفیت کششی و مقاومت در برابر ترک خوردگی بتن سبک افزایش یافته و بتن سبک از یک ماده ترد و شکننده به یک ماده با انعطاف بیشتر تبدیل شود که دارای ظرفیت کششی و تحمل بار کششی بالایی است. همچنین در نمونه $LW\text{-}BF_{1.75\%}$ که حاوی مقدار 1/75٪ الیاف بازالت است، مقاومت در برابر ترک خوردگی هم از نمونه NW-Ref و هم از نمونه LW-C بیشتر است، اما از نمونه‌ای که حاوی 1٪ الیاف پلیمری است کمتر است.

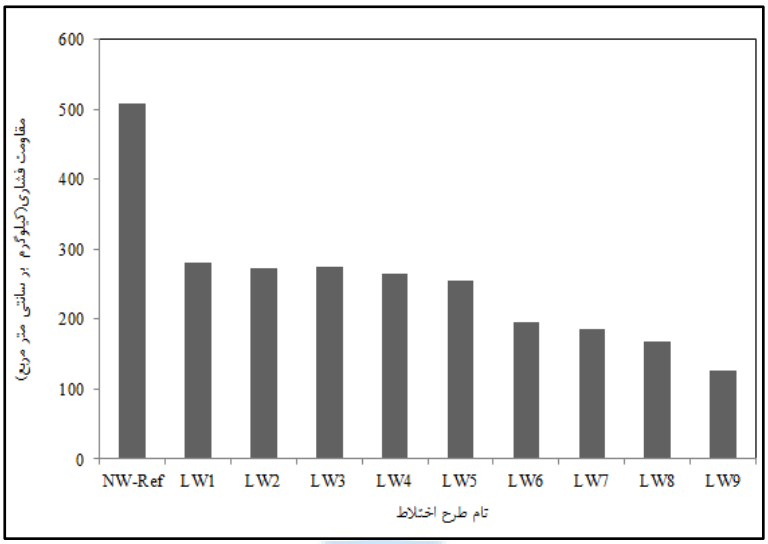
دلیل این امر را می‌توان تحمل کششی بالاتر الیاف پلیمری نسبت به الیاف بازالت و همچنین طول بیشتر الیاف پلیمری از الیاف بازالت ذکر کرد. با این حال باید گفت که استفاده از مقادیر بالای هر نوع الیاف باعث به وجود آمدن ضعف در مقاومت کششی، مقاومت در برابر ترک خوردگی و گسیختگی می‌شود و آن را نسبت به نمونه‌های مرجع کاهش می‌دهد.

شکل 12: گسیختگی نمونه LW-P1% بعد از آزمایش مقاومت کششی

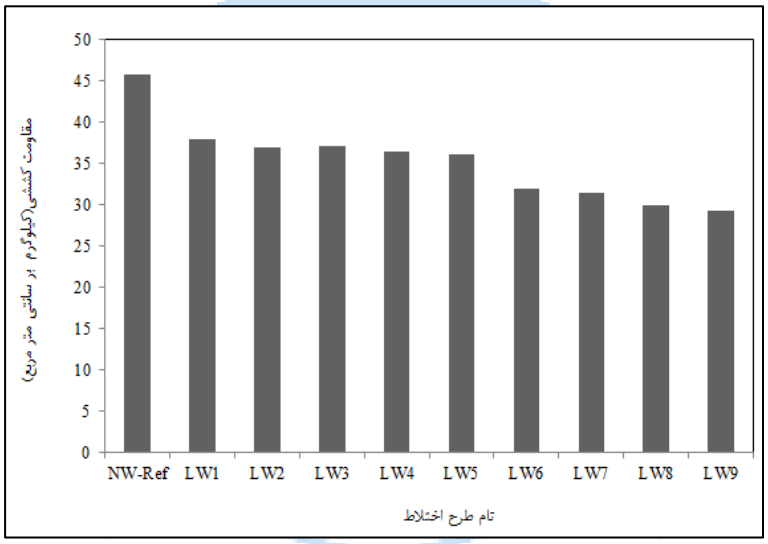
شکل 13: گسیختگی نمونه LW-B1.75% بعد از آزمایش مقاومت کششی

4-3- مدول الاستیسیته

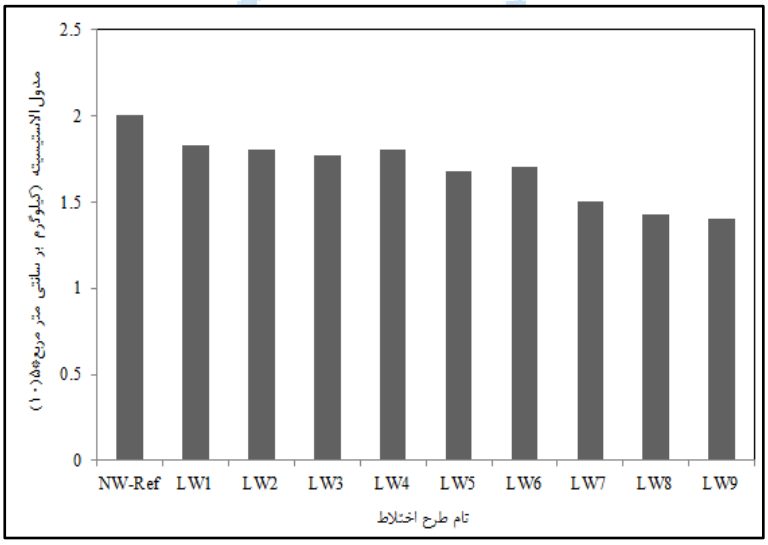
مدول الاستیسیته خاصیتی از بتن است که توانایی ایستادگی در برابر تغییر شکل به‌ازای تنش وارد شده را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، مدول الاستیسیته بتن نشان‌دهنده شکل‌پذیری و سختی بتن است که مطابق با استاندارد ASTM C469 [35] اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در شکل های 13 تا 18 نمایان است، در طرح اختلاط‌های گروه اول، استفاده از مقادیر مختلف سبکدانه‌های لیکا+پرلیت در طرح اختلاط بتن، باعث تأثیر منفی در مدول الاستیسیته شده و آن را نسبت به نمونه مرجع که بتن با وزن معمولی است کاهش می‌دهد. در این گروه، کمترین مدول الاستیسیته مربوط به نمونه شماره LW9 بوده که در این نمونه مدول الاستیسیته 28 روزه به مقدار 30٪ کمتر از نمونه مرجع است. علت تأثیر منفی استفاده از مصالح سبک بر مدول الاستیسیته را می‌توان تحمل کمتر بتن سبک در برابر تنش‌های اعمال شده به دلیل وجود فضاهای خالی مقاومت کمتر مصالح سبک در برابر تنش‌های اعمالی و ترد و شکننده بودن آن بیان کرد که باعث می‌شود شکل‌پذیری و سختی بتن سبک نسبت به بتن معمولی کمتر و در نتیجه مدول الاستیسیته بتن سبک از بتن معمولی کمتر باشد.



شکل 13: مقاومت فشاری نمونه‌های گروه اول طرح اختلاط در سن 28 روز

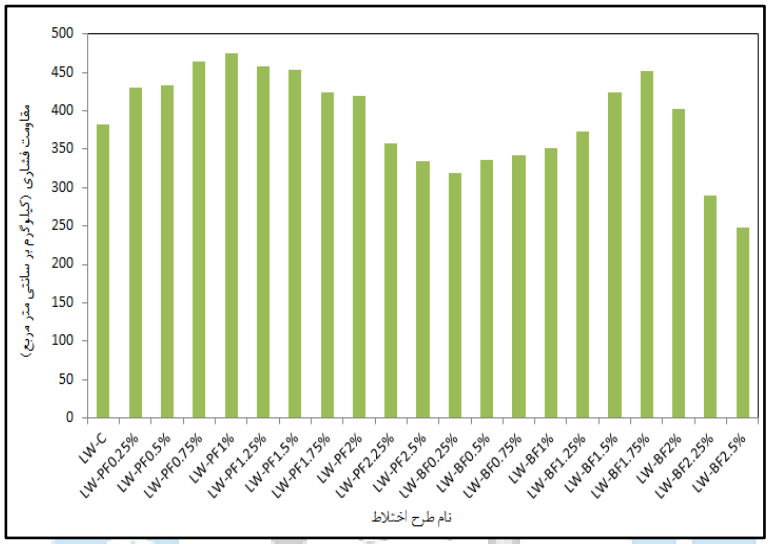


شکل 14: مقاومت کششی نمونه‌های گروه اول طرح اختلاط در سن 28 روز

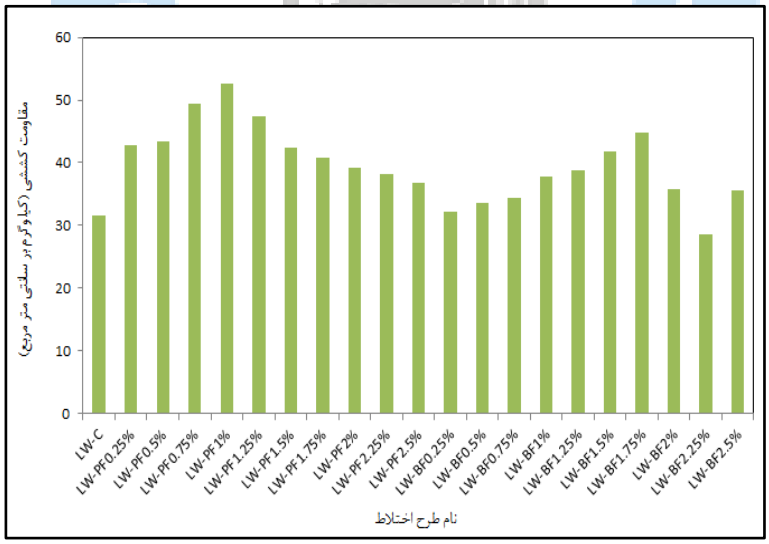


شکل 15: مدول الاستیسیته نمونه‌های گروه اول طرح اختلاط در سن 28 روز

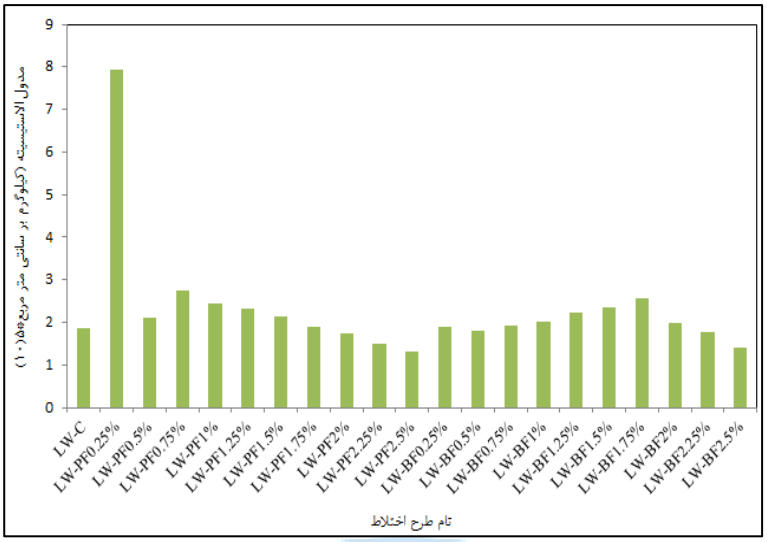
در مقابل، در گروه دوم طرح اختلاط که حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و بازالت است، به دلیل تأثیر مثبت الیاف‌ها در بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی از طریق پل زدن الیاف‌ها در دهانه ترک‌ها و همچنین افزایش ظرفیت شکل‌پذیری و ظرفیت نهایی، مدول الاستیسیته از نمونه‌های بتن سبک فاقد الیاف و نمونه مرجع گروه دوم بیشتر است. بیشترین مدول الاستیسیته در بین نمونه‌های بتن سبک، مربوط به نمونه‌ای است که حاوی ٪1 الیاف پلیمری است. در این نمونه مدول الاستیسیته به مقدار ٪48/64 نسبت به نمونه مرجع گروه دوم و همچنین به مقدار ٪37/5 از نمونه مرجع (بتن با وزن معمولی) در طرح اختلاط گروه اول بیشتر است که مقدار قابل‌قبولی است.



شکل 16: مقاومت فشاری نمونه‌های گروه دوم طرح اختلاط در سن 28 روز



شکل 17: مقاومت کششی نمونه‌های گروه دوم طرح اختلاط در سن 28 روز



شکل 18: مدول الاستیسیته نمونه‌های گروه دوم طرح اختلاط در سن 28 روز

5-3- تأثیرات استفاده از الیاف بر صرفه جویی در مصرف مصالح، کاهش هزینه‌های ساخت

همان‌طور که از جدول‌های طرح اختلاط گروه اول (طرح اختلاط نمونه‌های سبک فاقد الیاف) و گروه دوم (طرح اختلاط نمونه‌های سبک حاوی مقادیر مختلف الیاف پلیمری و الیاف بازالت) و همچنین نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته مشخص است، نتیجه‌گیری می‌شود که در طرح اختلاط‌هایی که حاوی الیاف پلیمری و بازالت هستند، با مقدار کمتری از مصالح مورد استفاده می‌توان به خواص مکانیکی بسیار بهتری نسبت به نمونه‌های سبک فاقد الیاف و حتی نمونه بتن با وزن معمولی رسید. به‌عنوان مصالح در گروه طرح اختلاط‌های فاقد الیاف، از میان نمونه‌های سبک بهترین خواص مکانیکی مربوط به نمونه شماره 6 است. در این نمونه وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته 28 روزه به ترتیب برابر $1800kg/m^3$، $280kg/cm^2$، $38\ kg/cm^2$ و 1/84GPa می‌باشد. اما در گروه دوم طرح اختلاط، بهترین نتایج مربوط نمونه $P_{1\%}$ است. در این نمونه وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر $1830\ kg/m^3$، $475/7\ kg/m^3$، $52/51\ kg/m^3$ و می‌باشد که نتایج به مقدار قابل‌قبول نسبت به دیگر نمونه‌ها بالاتر است. در حالی‌که این در صورتی است که در نمونه حاوی 1٪ الیاف پلیمری است، مقدار لیکا، شن و فوق روان‌کننده بسیار کمتر از نمونه شماره 6 بوده و مصالحی مانند پرلیت و پودر سنگ از طرح اختلاط آن حذف شده است که این خود باعث صرفه‌جویی در مصرف مصالح، کاهش هزینه ساخت بتن سبک می‌شود.

4- بحث و نتیجه گیری

در مقاله حاضر، ترکیبی از دو نوع الیاف با مقادیر پلیمری و بازالت به‌عنوان نوآوری تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر استفاده از سبک‌دانه‌های لیکا و پرلیت بر خواص مکانیکی بتن سبک بررسی شد. در این مقاله خواص مکانیکی بتن با وزن معمولی به‌عنوان بتن مرجع، بتن سبک فاقد الیاف و بتن سبک حاوی مقادیر مختلف الیاف پلیمری و بازالت باهم مقایسه شد. در گروه اول طرح اختلاط که فاقد الیاف بود، تعداد 10 طرح اختلاط طراحی شد که 1 طرح اختلاط آن مربوط به نمونه مرجع (بتن با وزن معمولی) است و 9 طرح اختلاط آن مربوط به نمونه‌های بتن سبک با مقادیر مختلف مصالح به‌منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه است. همچنین برای گروه دوم طرح اختلاط، تعداد 21 طرح اختلاط طراحی شد که 1 طرح اختلاط مربوط به نمونه سبک فاقد الیاف و 10 طرح اختلاط مربوط به نمونه سبک حاوی مقادیر ذکر شده الیاف پلیمری و 10 طرح اختلاط مربوط به نمونه‌های سبک حاوی مقادیر ذکر شده الیاف بازالت است. در گروه دوم طرح اختلاط مقادیر تمامی مصالح ثابت و فقط مقادیر الیاف متغیر بود که علت این امر بررسی تأثیرات الیاف بر

خواص مکانیکی بتن سبک در شرایط یکسان می‌باشد. بعد از انجام آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نتایج زیر حاصل شد:

1) استفاده از الیاف پلیمری و بازالت تأثیر مثبت قابل‌قبولی در بهبود خواص مکانیکی بتن سبک دارد. در این مقاله الیاف پلیمری، ضمن تهیه آسان و قیمت کم بهترین تأثیر را در بهبود مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن سبک داشت بطوری‌که خواص ذکر شده را نسبت به بتن با وزن معمولی و بتن سبک فاقد الیاف به مقدار قابل‌قبول افزایش داد.
2) با افزایش مقدار سیمان و میکرو سیلیکا، تا حدودی می‌توان به مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بهتری دست‌یافت. اما باید توجه داشت که به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست و همچنین کاهش هزینه‌های ساخت، مقدار مصرف سیمان و میکرو سیلیکا به مقدار زیاد نباشد.
3) استفاده از مقادیر مختلف مصالح سبک باعث کاهش چگالی بتن سبک شده و وزن مخصوص بتن را به میزان قابل‌قبول کاهش می‌دهد. اما باید گفت که وزن مخصوص با مقاومت و سفتی بتن رابطه مستقیم دارد. به این معنی که با کاهش وزن مخصوص مقدار مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد.
4) استفاده از مقادیر بهینه الیاف پلیمری و بازالت، باعث می‌شود که خرابی و شکست نمونه بعد از اعمال بار فشاری نسبت به نمونه سبک فاقد الیاف کمتر بوده و نمونه دچار خرابی ناگهانی نشود. از میان نمونه‌های بررسی شده در این مقاله، نمونه LW-PF1% که حاوی 1٪ الیاف پلیمری است بهترین عملکرد را در برابر خرابی و شکست داشت.
5) استفاده از مقادیر بهینه الیاف پلیمری و بازالت، بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت کششی از خود نشان داد، بطوری‌که در نمونه‌ای که حاوی 1٪ الیاف پلیمری است، گسیختگی بعد از اعمال بار کششی به مقدار قابل‌توجهی کمتر از سایر نمونه‌های بررسی شده در این مقاله بوده که علت آن را می‌توان بالابردن ظرفیت کششی و مقاومت در برابر گسیختگی بتن سبک به دلیل استفاده از الیاف پلیمری دانست.
6) استفاده از مقادیر بالای انواع الیاف باعث تأثیر منفی در مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته شده که دلیل آن را می‌توان به هم پیوستن و کلوخه‌شدن الیاف‌ها دانست که مانع از تراکم مناسب مخلوط بتن شده ساختار بتن پوک شده و باعث کاهش خواص مکانیکی ذکر شده می‌شود.
7) استفاده از الیاف باعث کاهش مقدار مصالح مصرفی و حتی حذف پودر سنگ و پرلیت شد که این خود باعث می‌شود که در مصرف مصالح و هزینه‌های ساخت بتن سبک صرفه‌جویی شود.
8) استفاده از الیاف ترکیبی برای نمونه‌های با سن 28 روزه نسبت به نمونه مرجع باعث افزایش 19 درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های با الیاف 1 درصدی می‌شود. در نمونه‌های با الیاف ترکیبی برای نمونه با 1.75 درصد افزایش 18 درصدی مقاومت فشاری می‌شود.
9) استفاده از الیاف بر مقامت خمشی بیشترین مقدار در نمونه های با 1 درصد و به نسبت نمونه مرجع 57 درصد افزایش یافته است.

تضاد منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که مقاله حاضر هیچ تضاد منافعی ندارند.

5-مراجع

[1] Rashad AM. (2016) A synopsis about perlite as building material–A best practice guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 121:338-353.
[2] Rashad AM. (2016). Vermiculite as a construction material–A short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 125:53-62.
[3] 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.

[4] Adesina A. (2021). Overview of the influence of waste materials on the thermal conductivity of cementitious composites. Cleaner Engineering and Technology, 2:100046.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] Bogas, J. A., & Gomes, T. (2015). Mechanical and durability behaviour of structural lightweight concrete produced with volcanic scoria. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(3), 705-717.
[10] Aghamohammadzadeh, F., Afshin, H., & Nekooei, M. (2019). Experimental Evaluation of Relationship between Shear Deformation and Pinching in Lightweight-aggregate Reinforced Concrete Beams. KSCE Journal of Civil Engineering, 23(1), 173-179. DOI 10.1007/s12205-018-0555-z
[11] Salim, S. (2020). Fracture and Permeability Properties of Artificial Fly Ash and Slagaggregate Concretes at Different Water-to-Cement Ratios. Journal of Material Science and Technology Research, 7, 11-29.
[12] Khoshvatan, M., & Pouraminia, M. (2021). The Effects of Additives to Lightweight Aggregate on the Mechanical Properties of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Civil And Environmental Engineering Reports, 31(1), 139-160. https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0010
[13] 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.
[14] 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.
[15] 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.
[16] 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.
[17] 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.
[18] Poongodi K, Murthi P. (2020). Impact strength enhancement of banana fibre reinforced lightweight self-compacting concrete. Materials Today: Proceedings, 27:1203-1209.
[19] 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.
[20] 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.
[21] Zeng Y, Sun P, Tang A, et al. Shear performance of lightweight aggregate concrete with and without chopped fiber reinforced. Construction and Building Materials, 263:120187.
[25] ASTM C150. (2015). Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials.
[26] ASTM C1240-15. (2015). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. American Society for Testing and Materials.
[27] ASTM C136. (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials.
[28] ASTM C330. (2014). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. American Society for Testing and Materials.
[29] ASTM C1017. (2013). Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. American Society for Testing and Materials.
[30] ACI 211-98. (2004). Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. American Concrete Inestitute.
[31] ASTM C192. (2015). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. American Society for Testing and Materials.
[32] ACI 213R-87. (2014). Guide for structural Lightweight-aggregagte concrete. American Concrete Institute (ACI), Farmington, Hills, Michigan.

[33] ASTM C39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.
[34] ASTM C496. (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.
[35] ASTM C469. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. American Society for Testing and Materials.