

Investigation of effective parameters on compressive strength, specific electrical resistance and water absorption of lightweight pervious concrete

Shahriar Gholamin Noveirsar, Morteza Jamshidi*, Rahmat Madandoust

1- P.h.D candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT

Pervious concrete is a special type of lightweight concrete with high porosity that can be used in concrete pavements in areas where high compressive strength is not required. Due to their high porosity, pervious concrete pavements have a lower thermal conductivity coefficient than impermeable concrete pavements, which leads to the environmental advantage of reducing the heat island phenomenon in urban areas. In this study, structural LECA with a volumetric weight of (750 kg/m³) and a fixed water-to-cement ratio (W/C = 0.3) was used to make lightweight pervious concrete, and the effect of different of lightweight aggregate to cement ratios (A /C) includes 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3 on physical properties (dry density, total porosity, Infiltration rate, thermal conductivity coefficient) and mechanical (compressive strength) of the samples at the age of 28 days were investigated. By increasing the A/C ratio from 1.5 to 3, the volume of cement paste decreased from 30.9% to 15.4% in the samples, and the dry density values ranged from 965.1 to 1255.6 kg/m³ (23.1% decrease), total porosity in the range from 22.3% up to 39.1% (16.9% increase), Infiltration rate in the range from 4.9 to 14.2 mm/s (189.8% increase), thermal conductivity coefficient in the range of 0.34 to 0.53 W/m.K (35.9% decrease) and compressive strength in The range of 3.6 to 12.2 (MPa) (70.5% decrease) were recorded. The results of this research showed the improvement of the physical properties and the decrease of the mechanical properties of lightweight pervious concrete containing LECA.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 January 2023

Revise Date: 24 February 2023

Accept Date: 07 March 2023

Keywords:

lightweight pervious concrete
Specific electrical resistance
compressive strength
water absorption

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370702.2976>

*Corresponding author: Morteza Jamshidi
Email address: m.jamshidi@iauc.ac.ir

بررسی اثر نسبت سبکدانه به سیمان بر روی ویژگیهای بتن متخلخل سبک حاوی لیکا

شهریار غلامین نوویسر^۱، مرتضی جمشیدی^{۲*}، رحمت مدن دوست^۳

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

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

بتن متخلخل یک نوع خاص از بتن سبک با تخلخل بالاست که از آن می‌توان در روسازیهای بتنی در مناطقی که به مقاومت فشاری بالا نیاز نیست، استفاده کرد. روسازیهای بتنی متخلخل به علت تخلخل بالایشان، دارای ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به روسازیهای بتنی نفوذ ناپذیر می‌باشند که منجر به مزیت محیط زیستی کاهش پدیده جزیره گرمایی در مناطق شهری می‌شود. در این پژوهش از لیکای سازه‌ای با وزن حجمی 750 kg/m^3 و نسبت آب به سیمان ثابت ($W/C = 0.3$)، برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده شد و اثر نسبتهای مختلف سبکدانه به سیمان (A/C) شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵ بر روی ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری، ضریب هدایت حرارتی) و مکانیکی (مقاومت فشاری) نمونه‌ها در سن ۲۸ روز، مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، حجم خمیر سیمان از ۳۰/۹٪ به ۱۵/۴٪ در نمونه‌ها کاهش یافت و مقادیر چگالی خشک در بازه ۹۶۵/۱ تا $1255/6 \text{ kg/m}^3$ (۲۳/۱٪ کاهش)، تخلخل کل در بازه ۲۲/۳٪ تا ۳۹/۱٪ (۱۶/۹٪ افزایش)، نرخ نفوذ پذیری در بازه ۴/۹ تا $14/2 \text{ s}$ (۱۸۹/۸٪ افزایش)، ضریب هدایت حرارتی در بازه ۰/۳۴ تا $0/53 (W/m.K)$ (۳۵/۹٪ کاهش) و مقاومت فشاری در بازه ۳/۶ تا $12/2 (MPa)$ (۷۰/۵٪ کاهش) ثبت شدند. نتایج این پژوهش بهبود ویژگیهای فیزیکی و افت ویژگیهای مکانیکی بتن متخلخل سبک حاوی لیکا را نشان دادند.

کلمات کلیدی: بتن متخلخل سبک، هدایت حرارتی، لیکا، نسبت سبکدانه به سیمان، نرخ نفوذ پذیری

شناخته دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370702.2976	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.370702.2976	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	۱۴۰۱/۱۲/۱۶	۱۴۰۱/۱۲/۱۶	۱۴۰۱/۱۲/۰۵	۱۴۰۱/۱۰/۱۲
مرتضی جمشیدی m.jamshidi@iauc.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

اثر منفی محیط زیستی روسازی بتنی متداول به عنوان یک مصالح نفوذ ناپذیر برای آب و هوا، منجر به ابداع نوع جدیدی از بتن به نام بتن متخلخل شده است. این نوع از روسازیهایی عبور جریان آب از داخلشان را دارند و از فواید محیط زیستی آن می توان به کاهش رواناب ناشی از سیلاب و احیای آبهای زیرزمینی اشاره کرد [۱]. بتن متخلخل در واقع نوعی ویژه از بتن سبک محسوب می شود که از سیمان، درشت دانه، درصد محدودی از ریزدانه (یا فاقد آن)، افزودنی های مختلف شیمیایی، پوزولانی و آب تشکیل شده است [۲]. حذف ریزدانه یا وجود مقدار کم آن در بتن متخلخل، منجر به ساختار منفذی بزرگ به هم پیوسته می شود [۳]. بنابراین ویژگیهای بتن متخلخل مانند چگالی، ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی کاهش می یابد [۴، ۵]. در تحقیقات مختلف، چگالی خشک، تخلخل حجمی و مقاومت فشاری بتن متخلخل به ترتیب در بازه 1600 تا 2000 kg/m^3 ، 10 تا 35 درصد و $3/5$ تا 28 مگاپاسگال گزارش شده است [۱، ۶].

یکی دیگر از مزایای محیط زیستی بتن متخلخل، کاهش پدیده جزیره گرمایی در مناطق شهری^۱ (UHI) می باشد. در روسازیهایی نفوذ ناپذیر، گرما در لایه های سطحی حفظ و سپس این گرما در هنگام عصر آزاد می شود [۷]، در نتیجه دمای محیط در محل افزایش می یابد. این پدیده اثر جزیره گرمایی در مناطق شهری (UHI) نامیده می شود که باعث رنجش گرمایی مردم شهر و همچنین منجر به مصرف بیشتر الکتریسیته برای خنک کردن می شود [۸]. با توضیحات داده شده، بتن متخلخل را می توان به عنوان یک مصالح دوستدار محیط زیست در نظر گرفت و در کاربردهای روسازی از آن استفاده کرد. اغلب از بتن متخلخل در روسازی جاده های با ترافیک سبک، جاده های درجه پایین، شانه راهها، کوچه ها، پیاده روها، مسیر دو چرخه سواری، پارکینگها، میدانها، زمینهای بازی تنیس، سیستم های پایدارسازی شیب، جاییکه مقاومت فشاری مهم نباشد، استفاده می شود [۹-۱۱، ۱۵]. سبک دانه ها به دو گروه طبیعی (مانند پومیس) و مصنوعی (مانند سبکدانه رس منبسط شده (لیکا)) طبقه بندی می شوند. سبکدانه های مصنوعی می توانند با استفاده از مواد خام طبیعی یا محصولات جانبی تولید شوند [۱۲].

لیکا از رس خمیری مخصوص بدون آهک یا مقدار خیلی کم آن تولید می شود. خاک رس در دماهای بسیار زیاد تقریباً در حدود $1300-1100$ درجه سانتیگراد سوزانده می شود. در مدت حرارت دادن، گاز داخل گلوله ها آزاد و در حین خنک شدن در آن محبوس می شود. محصول نهایی موادی به شکل گلوله های سرامیکی، معمولاً با ساختار داخلی منفذی پیوسته سبک وزن و مقاومت خردشدگی بالا می باشد. لیکا یک ماده خنثی سبک با PH حدود ۷ است و حاوی مواد مضر نمی باشد، در آب آسیب نمی بیند، غیر قابل احتراق، غیر قابل تجزیه زیستی، تجزیه ناپذیر تحت شرایط شدید محیطی، عایق عالی حرارتی، مقاوم در برابر آتش و عایق صوت می باشد. لیکا یک ماده پر کاربرد در صنعت ساخت و ساز از جمله تولید بتن سبک، بلوکهای سبک وزن و غیره [۱۳] به علت هزینه تولید پایین و پایداری شیمیایی عالی می باشد [۱۴]. لیکا به علت دارا بودن مقاومت بالاتر نسبت به سبکدانه های متداول، رایج می باشد [۱۵] و استفاده از آن در ساخت بتن متخلخل سبک، منجر به دست یافتن هر دو مزیت بتن سبک و بتن متخلخل خواهد شد. از طرفی تعداد تحقیقات معتبر انجام شده راجع به ویژگیهای بتن متخلخل سبک کم می باشد. زائتانگ^۲ و همکاران [۱۶] در پژوهشی از سبکدانه های درشت دیاتومیت، پومیس و بتن هوادار اتوکلاو بازیافتی برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها کاهش ۳ تا ۴ برابری چگالی خشک و ضریب هدایت حرارتی را نسبت به بتن های متخلخل با سنگدانه های طبیعی نشان داد. چینداپراسیرت^۳ و همکاران [۱۷] از سبکدانه های بازیافتی بدست آمده از بلوک بتن اتوکلاو برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند. آنها در تحقیقشان اثرات افزودن ماسه ریز دانه و خاکستر بادی با کلسیم بالا را بر روی ویژگیهای مکانیکی و حرارتی بتن متخلخل سبک مورد بررسی قرار دادند. افزودن ماسه ریزدانه و خاکستر بادی، باعث بهبود ویژگیهای مکانیکی، مقاومت سایشی، ضریب هدایت حرارتی و کاهش درصد تخلخل کل و ضریب نفوذ پذیری شد.

1. Urban heat island

2. Zaetang

2. Chindaprasirt

خانججی^۴ و همکاران [۱۸] مشخصات بتن متخلخل سبک حاوی پوکه ناشی از روغن گیری هسته خرما^۵ (OPKS) را مورد بررسی قرار دادند. آنها در پژوهششان از جایگزینی سنگ آهک درشت دانه با (OPKS) استفاده کردند. نتایج نشان داد که جایگزینی (OPKS) منجر به کاهش چگالی خشک، مقاومت فشاری و کششی و افزایش تخلخل کل و ضریب نفوذپذیری شد. اوزنور اوز^۶ [۱۹] در تحقیقی، از سبک دانه پومیس اسیدی به عنوان درشت دانه در ساخت بتن متخلخل استفاده کرد. اودر پژوهشش با جایگزین کردن به ترتیب ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ حجم سنگ آهک طبیعی به صورت درشت دانه در اندازه ۱۰ تا ۱۲ میلیمتر با همان اندازه سبکدانه پومیس اسیدی، مقاومت‌های فشاری، کششی شکافت، خمشی، سایشی و نفوذپذیری آب را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق او نشان داد که در بتن متخلخل حاوی پومیس اسیدی، با افزایش تراز جایگزینی سنگدانه طبیعی با پومیس اسیدی، مقاومت‌های فشاری، کششی شکافت و خمشی کاهش ولی نفوذپذیری آب و مقاومت سایشی صرف نظر از تراز جایگزینی، افزایش یافتند.

لیو^۷ و همکاران [۲۰] از ساق برگهای گیاه وحشی استرکولیا فوتیدا^۸ که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری یافت می شود، برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند. آنها گزارش کردند که ساق برگه، شکل پذیری بتن متخلخل را فراهم ساختند در حالیکه چگالی بتن متخلخل کاهش یافت. کاپلان^۹ و همکاران [۲۱] برای ساخت بتن متخلخل سبک، از درشت دانه‌های بازیافتی بدست آمده از بتن-های ضایعاتی سازه‌های قدیمی استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها آشکار ساخت که استفاده از بتن‌های ضایعاتی ساختمانهای قدیمی برای ساخت بتن متخلخل سبک منجر به تولید بتن متخلخل سبک با چگالی و مقاومت فشاری پایین ولی با درصد تخلخل کل و ضریب نفوذ پذیری بالا می‌شود. استفاده از سبکدانه‌ها در ساخت بتن‌های ویژه دارای سابقه پژوهشی فراوانی می‌باشد. صابری و همکاران [۲۲] از پوکه معدنی و بنتونیت برای ساخت بتن سبک پلاستیک حاوی الیافهای فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه استفاده کردند و مقاومت‌های فشاری و کششی آنها را تحت حرارت بالا مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین پاچیده و توفیق [۲۳] در پژوهشی ویژگیهای مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) بتن خود تراکم سبک ساخته شده با لیکا حاوی الیافهای بازیافتی فنری فلزی، فولادی و پلی پروپیلن را در معرض حرارت بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که استفاده از فنرهای فلزی بازیافتی در بتن خودتراکم سبک، منجر به بهبود خواص مکانیکی و کاهش هزینه شده است.

در این پژوهش از لیکای سازه‌ای برای ساخت بتن متخلخل استفاده شده است و با ثابت نگه داشتن وزن حجمی لیکای درشت‌دانه و نسبت آب به سیمان، با کاهش مقدار وزن حجمی سیمان، نسبت A/C افزایش یافت که منجر به افزایش درصد تخلخل کل شد. حداقل و حداکثر نسبت A/C طوری انتخاب شدند که مقادیر نرخ نفوذ پذیری و مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بازه توصیه شده ACI 522 [۲] قرار داشته باشند، سپس با انتخاب گامهای یکسان بین مقادیر حداقل و حداکثر نسبت A/C ، اثر نسبت A/C شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵ بر روی ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، درصد تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری، ضریب هدایت حرارتی) و مکانیکی (مقاومت فشاری) بتن‌های متخلخل سبک در سن ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین طرح اختلاط بهینه و روابط بین پارامتر نسبت A/C با ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی ارائه شده است. شکل (۱) فرآیندهای اتخاذ شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

3. Khankhaje

4. oil palm kernel shell

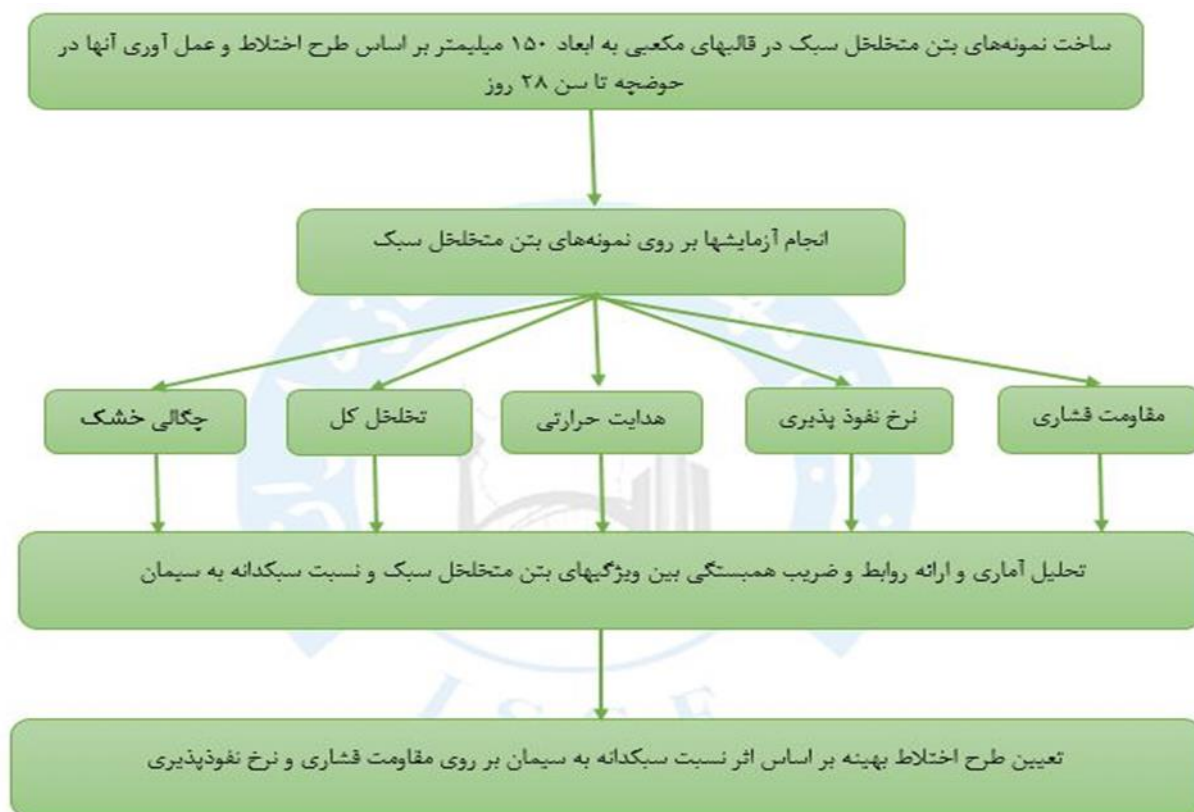
5. ÖZnure Öz

6. Liu

7. sterculia foetida petiole

8. Kaplan

شکل ۱: نمایش روندهای آزمایشگاهی.

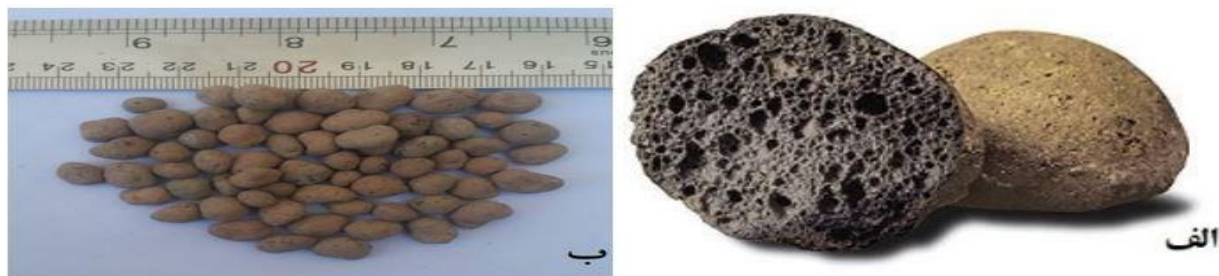


۲- مصالح و آماده سازی نمونه ها

۲-۱- مصالح

در این تحقیق، از لیکای سازه‌ای به عنوان درشت‌دانه استفاده شده است. لیکا به علت دارا بودن ساختار داخلی منفذی پیوسته و متخلخل (شکل ۲ - الف)، جذب آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های با وزن نرمال دارد. بنابراین به منظور حفظ نسبت آب به سیمان طرح اختلاط و جلوگیری از جذب آب توسط لیکاه‌ها، قبل از مخلوط شدن، لیکاه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)^۱، آماده شده بودند. لیکای مورد استفاده برای ساخت بتن متخلخل سبک، ساخت کارخانه لیکای ساوه، در اندازه ذرات ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر با حداکثر اندازه ۹/۵ میلی‌متر (شکل ۲ - ب) بود. در این پژوهش، مطابق آزمایشهای انجام شده بر اساس استاندارد ASTM C127-15 [۲۴] در حالت SSD، چگالی ویژه ۱/۳۵ و جذب آب ۲۴ ساعته، ۹/۵٪ و بر اساس استاندارد ASTM C29/C29-16 [۲۵]، چگالی خشک میله نخورده ۶۳۷ kg/m³، برای لیکا محاسبه شد. همچنین از سیمان پرتلند تیپ ۲ ساخت کارخانه هگمتان همدان با چگالی ویژه ۳/۱۵ و نرمی بلین ۲۹۱۰ cm²/gr [۲۶] و آب آشامیدنی شهر رشت، برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. در جدول (۱) ترکیبات شیمیایی سیمان و لیکای به کار برده شده در این پژوهش آورده شده است. سلولهای خالی در جدول (۱)، ترکیبات شیمیایی است که در سیمان وجود نداشت.

¹ . Saturated surface dry



شکل ۲: (الف) : منافذ به هم پیوسته و حفره های پر از هوا در داخل لیکا (ب) : لیکای سازه ای درشت دانه ۹/۵-۴/۷۵ میلی متر.

جدول ۱: درصد ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ [۲۶] و لیکا [۲۷].

ترکیبات %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
سیمان	۲۱/۲۷	۴/۹۵	۴/۰۳	۶۲/۹۵	۱/۵۵	-	-	-	۲/۲۶	۰/۴۹	۰/۶۵	۲/۱۱
لیکا	۶۶/۰۵	۱۶/۵۷	۷/۱	۲/۴۶	۱/۹۹	۰/۷۸	۰/۲۱	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۶۹	۲/۶۹	۰/۸۴

۲-۲ - طرح اختلاط

به منظور بررسی اثرات مقادیر مختلف نسبتهای A/C بر روی چگالی خشک، درصد تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری، ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری بتن متخلخل سبک، طرح اختلاط با شش مقدار مختلف نسبت A/C شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵ ساخته شد. در هر شش طرح اختلاط، نسبت آب به سیمان برای دستیابی به حداکثر نرخ نفوذپذیری و مقاومت فشاری [۲۸] برابر مقدار ثابت ۰/۳ و لیکا برابر با ۷۵۰ kg/m³ در حالت SSD در نظر گرفته شدند. به علت اینکه طرح اختلاط فاقد ریزدانه و پوزولان بود، استفاده از فوق روان کننده باعث ایجاد شیره بتن و در نتیجه مسدود شدن حفرات باز در انتهای نمونه‌های بتن متخلخل سبک می‌شد، از این رو در طرح اختلاط از فوق روان کننده استفاده نشده است. طرح اختلاط این پژوهش در جدول (۲) خلاصه شده است و اسامی بتن‌ها از نوع سبک دانه و مقدار نسبت A/C گرفته شده اند. به عنوان مثال، ۱-۵ L به بتن متخلخل سبک حاوی لیکا و نسبت A/C برابر با ۱/۵ اشاره دارد که به عنوان بتن متخلخل سبک شاهد در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: طرح اختلاط بتن متخلخل سبک.

A/C	W/C	سیمان (kg/m ³)	لیکا (kg/m ³)	طرح
۱/۵	۰/۳	۵۰۰	۷۵۰	L - ۱/۵ (شاهد)
۱/۸	۰/۳	۴۱۶/۶۷	۷۵۰	L - ۱/۸
۲/۱	۰/۳	۳۵۷/۱۴	۷۵۰	L - ۲/۱
۲/۴	۰/۳	۳۱۲/۵	۷۵۰	L - ۲/۴
۲/۷	۰/۳	۲۷۷/۷۸	۷۵۰	L - ۲/۷

۳	۰/۳	۲۵۰	۷۵۰	L-۳
---	-----	-----	-----	-----

۲-۳ - آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش از قالب مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر برای ساخت و قالب گیری نمونه ها طبق جدول (۲)، تحت شرایط آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM C192/C192M-15 [۲۹] استفاده شد. جهت ساخت مخلوط تازه، اجزای مخلوط خشک شامل سیمان و لیکا به صورت درشت دانه به حالت SSD، به مدت ۳ دقیقه در مخلوط کن با یکدیگر مخلوط شدند. آب به تدریج در مدت یک دقیقه به مخلوط خشک اضافه شده و برای کسب مخلوطی یکنواخت، به مدت ۳ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت. به منظور دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری و درصد تخلخل مناسب، طبق روش استفاده شده در پژوهش خانجانی وهمکاران [۱۸]، به ازای هر ۵ سانتیمتر ارتفاع، بتن متخلخل با ۲۵ ضربه به وسیله میله کوبی متراکم شد. سپس نمونه‌ها به منظور جلوگیری از تبخیر آب مخلوط تازه، به مدت ۲۴ ساعت درون قالب با یک ورق پلاستیکی پوشانده و متعاقباً جهت عمل آوری، پس از خروج از قالب در حوضچه آب با شرایط اشباع در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد تا سن آزمایش نگهداری شدند.

۳- روشهای آزمایش

۳-۱ - چگالی

نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر در سن ۲۸ روز در داخل اون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، وزن و ابعاد شان اندازه گیری شدند و چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک سخت شده بر مبنای روش ارایه شده در استاندارد ASTM C 1754 [۳۰] تعیین شد.

۳-۲ - تخلخل کل

تخلخل کل بتن متخلخل سبک سخت شده، شامل تخلخل باز و بسته برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر در سن ۲۸ روز بر مبنای روش ارایه شده در استاندارد ASTM C 1754 [۳۰] محاسبه شد. ابتدا با اندازه گیری ابعاد نمونه‌ها حجم شان (V) تعیین شد. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه ور شدند تا به حالت اشباع در آیند. سپس وزن غوطه وری (w_1) توسط ترازوی ارشمیدس قرائت شد. در انتها وزن خشک نمونه ها (w_2) پس از قرار گیری در داخل اون به مدت حداقل ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد. درصد تخلخل کل نمونه‌ها طبق رابطه (۱) تعیین شد:

$$P = \left[1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w V} \right) \right] \times 100\% \quad (1)$$

که در آن P و ρ_w به ترتیب درصد تخلخل کل بتن متخلخل سبک و چگالی آب هستند.

۳-۳ - نرخ نفوذ پذیری

نرخ نفوذ پذیری آب یکی از ویژگیهای بسیار مهم بتن متخلخل به منظور ارزیابی امکان سنجی استفاده از آن در روسازی متخلخل [۳۱] و همچنین برای کاربردهای مدیریت سیلاب می‌باشد [۳۲]. در این پژوهش، آزمایش نرخ نفوذ پذیری بتن متخلخل سبک سخت شده در سن ۲۸ روز بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر به روش بار افتان بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد ASTM C1701 [۳۳] انجام گرفت. نرخ نفوذ پذیری نمونه‌ها به وسیله لوله پلاستیکی توخالی که در

محل اتصال بتن متخلخل سبک و لوله، برای جلوگیری از نشت آب، آب بند شده (شکل ۳) انجام شد. مقدار آب برای اندازه گیری نرخ نفوذ پذیری، بر مبنای قطر لوله پلاستیکی توخالی به کار برده شده در این پژوهش، تعیین شد. به علت اینکه در استاندارد ASTM C1701 [۳۳] قطر لوله ۳۰۰ میلی‌متر و در این پژوهش ۸۵ میلی‌متر بود، حجم آب با آزمایش اصلی سازگار و ۱ لیتر در نظر گرفته شد. در ابتدا نمونه‌ها با همان مقدار آب از مایش نرخ نفوذ پذیری (۱ لیتر) پیش خیس شدند تا نمونه‌ها آب را جذب نکنند و فقط آب از درون بتن متخلخل سبک عبور کند. نرخ نفوذ پذیری برای بتن‌های متخلخل سبک بر مبنای رابطه (۲) محاسبه شد:

$$I = \frac{4V}{D^2 \cdot \pi t} \quad (2)$$

که در آن I نرخ نفوذ پذیری (cm/s)، V حجم آب نفوذ کرده در داخل بتن متخلخل سبک (cm³)، D قطر داخلی لوله نفوذ پذیری (cm) و t زمان لازم برای نفوذ پذیری حجم آب مشخص شده در داخل بتن متخلخل سبک بر حسب ثانیه (s) می‌باشد.



شکل ۳: آماده سازی نمونه برای آزمایش نرخ نفوذ پذیری آب.

۳-۴ - هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی بتن متخلخل سبک سخت شده بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد ASTM C518-15 [۳۴] تعیین شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز در داخل اون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، آنها به صورت جداگانه در دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی مخصوص تک نمونه قرار داده شدند. در دستگاه مورد نظر از یک برنامه نرم افزاری برای کنترل کالیبراسیون و آزمایش استفاده شد. توالی کالیبراسیون با استفاده از یک نمونه مرجع که توسط سازنده دستگاه قبل از اجرای آزمایش آماده شده بود، صورت گرفت. طبق توصیه سازنده دستگاه، از عایق حرارتی مناسب برای مطابقت با شرایط مورد نیاز استاندارد استفاده شد (شکل ۴). ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها طبق رابطه (۳) محاسبه شد:

$$\lambda = S \cdot E \cdot \left(\frac{L}{\Delta T} \right) \quad (3)$$

که در آن λ ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)، S ضریب کالیبراسیون مبدل شار حرارتی (W/m²) / V، E خروجی مبدل شار حرارتی (V)، L فاصله بین صفحه سرد و گرم کار گذاشته شده در مدت آزمایش (m)، ΔT اختلاف دما دو طرف نمونه (K) می‌باشد.



شکل ۴: دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی بتن متخلخل سبک.

۳-۵ - مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن متخلخل سبک سخت شده بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد BS EN 12390-3 [۳۵] انجام گرفت. نمونه‌ها در سن ۲۸ روز از حوضچه آب خارج و سپس با پارچه خشک و آماده آزمایش شدند. پس از قرارگیری نمونه در داخل دستگاه جک بتن شکن، نرخ بار اعمالی روی ۰/۲ مگا پاسگال بر ثانیه تنظیم شد و پس از شکست نمونه با تقسیم حداکثر نیروی وارده بر حسب نیوتن، بر سطح نمونه بر حسب میلی‌متر مربع، مقاومت فشاری بر حسب مگا پاسگال به دست آمد. نتیجه گزارش شده، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه است.

۴ - تحلیل نتایج و بحث

در جدول (۳) به صورت خلاصه، نتایج میانگین و انحراف معیار آزمایشهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری، ضریب هدایت حرارتی) و مکانیکی (مقاومت فشاری) نمونه‌های بتن متخلخل سبک حاوی لیکا به نمایش در آمده است. همچنین برای درک بهتر و مقایسه نتایج آزمایشهای طرحهای مختلف با طرح شاهد، درصد مقادیر نسبی هر طرح برای هر آزمایش نیز گزارش شده است.

جدول ۳: نتایج میانگین آزمایشها در سن ۲۸ روز.

نوع آزمایش	طرح	حجم خمیر سیمان	تعداد نمونه	میانگین	درصد مقادیر نسبی	انحراف معیار
چگالی خشک (Kg / m ³)	L-۱/۵ (شاهد)	۳۰/۹٪	۳	۱۲۵۵/۶	۱۰۰٪	۴/۱
	L-۱/۸	۲۵/۷٪	۳	۱۱۴۶/۱	۹۱/۳٪	۴/۱
	L-۲/۱	۲۲/۱٪	۳	۱۰۶۷/۲	۸۵٪	۴/۴۹
	L-۲/۴	۱۹/۱۳٪	۳	۱۰۳۶/۳	۸۲/۵٪	۶/۲۹
	L-۲/۷	۱۷/۱۲٪	۳	۹۷۸/۸	۷۷/۹٪	۶/۰۹
	L-۳	۱۵/۱۴٪	۳	۹۶۵/۱	۷۶/۹٪	۵/۷۲
تخلخل کل	L-۱/۵ (شاهد)	۳۰/۹٪	۳	۲۲/۳٪	۱۰۰٪	۰/۷۵
	L-۱/۸	۲۵/۱۷٪	۳	۲۴/۹٪	۱۱۱/۷٪	۰/۵۶
	L-۲/۱	۲۲/۱٪	۳	۲۹/۷٪	۱۱۳/۲٪	۰/۸۸
	L-۲/۴	۱۹/۱۳٪	۳	۳۵/۸٪	۱۶۰/۱٪	۱/۴
	L-۲/۷	۱۷/۱۲٪	۳	۳۸/۲٪	۱۷۱/۳٪	۰/۱
	L-۳	۱۵/۱۴٪	۳	۳۹/۱٪	۱۷۵/۳٪	۰/۳۳
نرخ نفوذ پذیری (mm / s)	L-۱/۵ (شاهد)	۳۰/۹٪	۳	۴/۹	۱۰۰٪	۰/۲۳
	L-۱/۸	۲۵/۱۷٪	۳	۶/۲	۱۲۶/۵٪	۰/۲۶
	L-۲/۱	۲۲/۱٪	۳	۷/۱	۱۴۴/۹٪	۰/۱۶
	L-۲/۴	۱۹/۱۳٪	۳	۹	۱۸۳/۷٪	۰/۴۹
	L-۲/۷	۱۷/۱۲٪	۳	۱۱/۲	۲۲۸/۶٪	۰/۴۶
	L-۳	۱۵/۱۴٪	۳	۱۴/۲	۲۸۹/۸٪	۰/۷۲
ضریب هدایت حرارتی (W /m.K)	L-۱/۵ (شاهد)	۳۰/۹٪	۳	۰/۵۳	۱۰۰٪	۰/۰۲۶
	L-۱/۸	۲۵/۱۷٪	۳	۰/۵	۹۴/۳٪	۰/۰۱
	L-۲/۱	۲۲/۱٪	۳	۰/۴۵	۸۴/۹٪	۰/۰۱
	L-۲/۴	۱۹/۱۳٪	۳	۰/۴۲	۷۹/۲٪	۰/۰۱۷
	L-۲/۷	۱۷/۱۲٪	۳	۰/۳۹	۷۳/۶٪	۰/۰۱۷
	L-۳	۱۵/۱۴٪	۳	۰/۳۴	۶۴/۱٪	۰/۰۲۶
مقاومت فشاری (MPa)	L-۱/۵ (شاهد)	۳۰/۹٪	۳	۱۲/۲	۱۰۰٪	۰/۶۷
	L-۱/۸	۲۵/۱۷٪	۳	۸/۹	۷۲/۹٪	۰/۳
	L-۲/۱	۲۲/۱٪	۳	۶/۹	۵۶/۶٪	۰/۲۲
	L-۲/۴	۱۹/۱۳٪	۳	۵/۴	۴۴/۳٪	۰/۲۴
	L-۲/۷	۱۷/۱۲٪	۳	۴/۹	۴۰/۲٪	۰/۱۷
	L-۳	۱۵/۱۴٪	۳	۳/۶	۲۹/۵٪	۰/۱۷

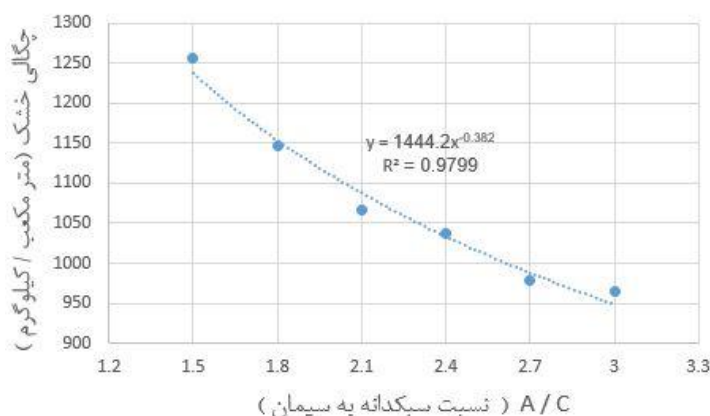
۱-۴ - چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک

همانطور که در جدول (۳) دیده می‌شود، با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک کاهش پیدا کرد و با توجه به ثابت بودن وزن واحد حجم درشت‌دانه لیکا و نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط، علت کاهش چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک در این پژوهش، کاهش مقدار سیمان از ۵۰۰ به ۲۵۰ kg/m³ [۳۶] بود. حداقل و حداکثر چگالی خشک به ترتیب در طرح‌های ۳- L (۹۶۵/۱ kg/m³) و L-۱/۵ (۱۲۵۵/۶ kg/m³) اندازه گیری شدند و طرح ۳- L بیشترین کاهش چگالی خشک (۲۳/۱٪) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد. به علت چگالی کمتر لیکای درشت‌دانه نسبت به سنگدانه‌های طبیعی و مقدار تخلخل بالای بتن‌های متخلخل [۱۷]

چگالی خشک همه بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش حدود ۲ تا ۲/۵ برابر از چگالی خشک بتن‌های معمولی (2400 kg/m^3) کمتر بودند.

نتایج حداقل و حداکثر چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک این تحقیق در مقایسه با بتن‌های متخلخل سبک پژوهش‌های زائتانگ و همکاران (۵۵۸ تا 775 kg/m^3) [۱۶] به ترتیب ۷۳٪ و ۶۲٪ بیشتر، چینداپراسیرت و همکاران (۷۷۵ تا 900 kg/m^3) [۱۷]، ۲۴/۵٪ و ۳۹/۵٪ بیشتر، خانجی و همکاران (۱۳۱۴ تا 1777 kg/m^3) [۱۸]، ۲۶/۶٪ و ۲۹/۳٪ کمتر، اوزنور اوز (۱۲۰۶/۸ تا 6 kg/m^3) تا ۱۸۸۶/۱ [۱۹]، ۲۰٪ و ۳۳/۵٪ کمتر، لیو و همکاران (۱۰۷۹ تا 1307 kg/m^3) [۲۰]، ۱۰/۶٪ و ۳/۹٪ کمتر، کاپلان و همکاران (۱۰۸۰ تا 1160 kg/m^3) [۲۱]، ۱۰/۶٪ کمتر و ۸/۲٪ بیشتر است. سینگ و موروگان [۳۷] در پژوهششان گزارش کردند که تغییر ویژگیهای سنگدانه‌ها تاثیر مهمی بر روی چگالی بتن متخلخل داشتند. همچنین استریدر و همکاران [۳۸] روش تراکم را بر روی چگالی بتن متخلخل موثر دانستند. آنها گزارش کردند که هر چقدر سنگدانه‌ها تیز گوشه تر و سطح آنها زبرتر بودند، تراز تراکم کاهش یافت که منجر به کاهش چگالی بتن متخلخل شد. در پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶] چگالی خشک بتن متخلخل سبک (775 kg/m^3) مربوط به طرح حاوی سبکدانه بتن هوادار اتوکلاو بازیافتی به شکل تیز گوشه با چگالی ظاهری خشک میله نخورده 361 kg/m^3 ، سیمان 448 kg/m^3 و حجم خمیر سیمان ۲۵٪ در نمونه بود در حالیکه در این پژوهش با سیمان 250 kg/m^3 و حجم خمیر سیمان کمتر (۱۵/۴٪)، به علت بالاتر بودن چگالی ظاهری خشک میله نخورده لیکا (637 kg/m^3) نسبت به سبکدانه بتن هوادار اتوکلاو بازیافتی، چگالی خشک بتن متخلخل این پژوهش ۲۴/۵٪ بالاتر ثبت شد. ملاحظه می‌شود با وجود اینکه مقدار سیمان و حجم خمیر سیمان به ترتیب در این پژوهش ۴۴/۲٪ و ۱۰٪ نسبت به پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶] کمتر بودند، با این وجود چگالی خشک بتن متخلخل این پژوهش بالاتر بود. این مثال به روشنی نشان می‌دهد هنگامیکه چگالی سنگدانه‌ها تفاوت زیادی با یکدیگر دارند، موثرترین عامل بر روی چگالی بتن متخلخل، چگالی سنگدانه می‌باشد. در شکل (۵) نمودار رابطه قوایی بین چگالی خشک و نسبت‌های A/C برای بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9799$) قوی است که نشان دهنده دقت بالای رابطه همبستگی قوایی و همچنین قابلیت اعتماد نتایج تجربی در این آزمایش می‌باشد. معادله تجربی رابطه بین چگالی خشک (D) بر حسب kg/m^3 و نسبت‌های A/C برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۴) بیان شود:

$$D = 1444.2 \left(\frac{A}{C} \right)^{-0.382} \quad R^2 = 0.9799 \quad (4)$$

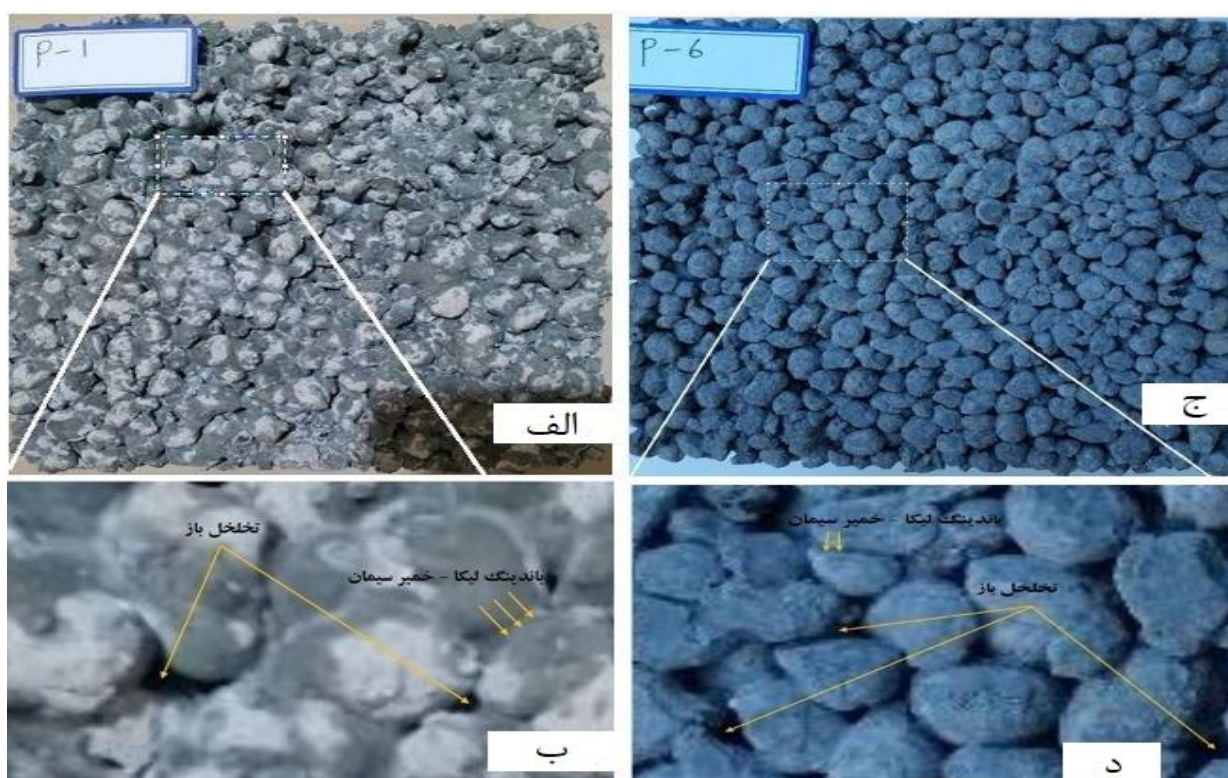


شکل ۵: رابطه میانگین چگالی خشک با نسبت A/C.

۲-۴- تخلخل کل

تخلخل کل یک عامل مهم در تعیین مقاومت [۳۹] و همچنین ویژگیهای فیزیکی (نفوذ پذیری، هدایت حرارتی) [۴۰] بتن‌های متخلخل می‌باشد. در بتن‌های متخلخل، عموماً هرچه درصد تخلخل کل کمتر باشد، مقاومت فشاری بالاتر خواهد بود [۴۱]. با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، به علت ثابت بودن وزن حجمی لیکا و نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط بتن های متخلخل سبک، با کاهش مقدار سیمان، مقدار درصد حجمی خمیر سیمان در داخل نمونه ها از ۳۰/۹٪ به ۱۵/۴٪ کاهش یافت که منجر به افزایش اندازه حفرات باز در داخل نمونه (شکل ۶- الف و ۶- ج) و در نتیجه افزایش درصد تخلخل کل در بتن متخلخل سبک شد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود حداقل و حداکثر درصد تخلخل کل برعکس چگالی خشک، به ترتیب در طرحهای L-۱/۵ (۲۲/۳٪) و L-۳ (۳۹/۱٪) ثبت شدند و طرح L-۳ به علت دارا بودن کمترین درصد حجمی خمیر سیمان (۱۵/۴٪)، بیشترین افزایش تخلخل کل (۱۶/۸٪) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد.

نتایج حداقل و حداکثر تخلخل کل بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در مقایسه با مقادیر مشابه آنها در بتن‌های متخلخل سبک پژوهشهای زانتانگ و همکاران (۱۵/۵٪ تا ۳۱/۸٪) [۱۶] به ترتیب ۶/۸٪ و ۷/۳٪ بیشتر، چینداسیرت و همکاران (۱۴/۸٪ تا ۲۳/۷٪) [۱۷]، ۷/۵٪ و ۱۵/۴٪ بیشتر، خانجایی و همکاران (۱۹٪ تا ۲۹٪) [۱۸]، ۳/۳٪ و ۱۰/۱٪ بیشتر، اوزنور اوز (۱۶/۲٪ تا ۲۸/۵٪) [۱۹]، ۶/۱٪ و ۱۰/۶٪ بیشتر، لیو و همکاران (۴۰٪ تا ۵۳٪) [۲۰]، ۱۷/۷٪ و ۱۳/۹٪ درصد کمتر، کاپلان و همکاران (۵۹٪ تا ۶۳٪) [۲۱]، ۳۶/۷٪ و ۲۳/۹٪ کمتر است.



شکل ۶: مقایسه ظاهری بین نمای فوقانی و باندینگ لیکا - خمیر سیمان برای نمونه های مکعبی مخلوطهای

$A/C = 1/5$ (الف، ب) و $A/C = 3$ (ج، د).

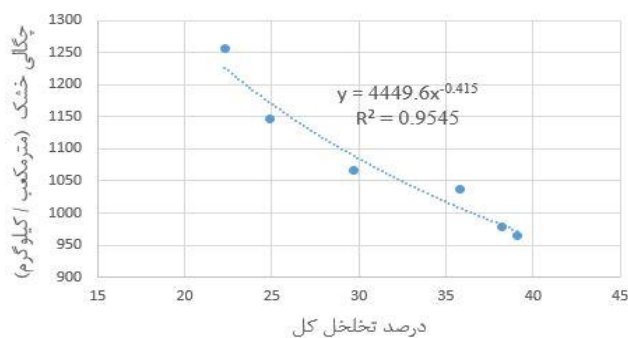
شکل، اندازه، ویژگی فیزیکی سنگدانه‌ها، انرژی تراکم، افزودنیها برای بهبود خواص رئولوژیکی و کارایی، نوع و اندازه قالب برای ساخت بتن متخلخل، از عوامل موثر بر روی تخلخل می‌باشند [۳۸]. با در نظر گرفتن تمام عوامل موثر بر روی تخلخل بتن متخلخل می‌توان علل تفاوت تخلخل کل در بتن‌های متخلخل را مشخص کرد. در پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶]، حداقل تخلخل کل (۱۵/۵٪) مربوط به بتن متخلخل سبک حاوی سبکدانه دیاتومیت به شکل کمی گرد گوشه، در اندازه ۹/۵-۴/۸ میلی‌متر با حجم ۵۶/۱٪، چگالی ظاهری خشک میله نخورده 3 kg/m^3 ، ۳۴۶، سیمان 3 kg/m^3 ، ۴۴۸، حجم خمیر سیمان ۲۵٪ و فوق روان کننده ۱/۲۵٪ وزن سیمان بود. در این پژوهش حداقل تخلخل کل (۲۲/۳٪) مربوط به طرح L-۱/۵ (شاهد) با سیمان 3 kg/m^3 ۵۰۰ و حجم خمیر سیمان (۳۰/۹٪) بود. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این پژوهش با وجود یکسان بودن اندازه سبکدانه‌ها (۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر) و درصد حجمی سبکدانه در نمونه (۵۵/۶٪)، گرد گوشه بودن لیکا و بالاتر بودن مقدار سیمان (3 kg/m^3 ، ۵۲)، حجم خمیر سیمان (۵/۹٪)، چگالی ظاهری خشک میله نخورده (3 kg/m^3 ، ۲۹۱) و پایین تر بودن نسبت حجم سبکدانه به حجم خمیر سیمان (در این پژوهش ۱/۸ و در پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶]، ۲/۴ می‌باشد)، انتظار می‌رفت که درصد تخلخل کل این پژوهش از درصد تخلخل کل پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶]، کمتر باشد ولی نتایج، عکس این پیش‌بینی را نشان داد. کمتر بودن تخلخل کل به مقدار ۶/۸٪ در پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶] نسبت به این پژوهش را می‌توان به استفاده از فوق روان کننده در طرح اختلاط به منظور بهبود ویژگیهای بتن متخلخل تازه مانند کارایی بهتر و روند بهتر قالب‌گیری بتن متخلخل دانست که منجر به کاهش تخلخل در نمونه شده است. از طرفی در پژوهشهای زائتانگ و همکاران [۱۶] و چینداپراسیرت و همکاران [۱۷] از نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر برای محاسبه تخلخل کل استفاده شده است که در این نوع از قالبها، دستیابی به تخلخل هدف نسبت به نمونه‌های منشوری سخت تر است [۳۸].

هنگامیکه نمونه‌ها به صورت منشوری باشند و در طرح اختلاط بتن متخلخل از فوق روان کننده استفاده نشده باشد، ویژگیهای فیزیکی سنگدانه و مقدار خمیر سیمان موثرترین عاملها بر روی تخلخل می‌باشند. در پژوهش کاپلان و همکاران [۲۱]، درشت دانه‌های بازیافتی، از بتن ضایعاتی با مقاومت پایین با نسبت W/C بالا (۰/۸ - ۰/۷) تهیه شده بودند و از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای اندازه‌گیری تخلخل کل استفاده شده است. با وجود اینکه حجم خمیر سیمان (۳۰/۶٪) در پژوهش کاپلان و همکاران [۲۱] با حجم خمیر سیمان (۳۰/۹٪) در این پژوهش تقریباً یکسان بود، ولی در پژوهش کاپلان و همکاران [۲۱]، تخلخل کل ۶۳٪ و در این پژوهش تخلخل کل ۲۲/۳٪ گزارش شده است. به علت اینکه تخلخل لیکا خیلی کمتر از تخلخل سبکدانه‌های استفاده شده در پژوهش کاپلان و همکاران [۲۱] بود، تخلخل کل دو پژوهش تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر داشتند. افزایش تخلخل کل منجر به کاهش چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک در این پژوهش شد که با نتایج پژوهش زائتانگ و همکاران [۱۶] مطابقت داشت.

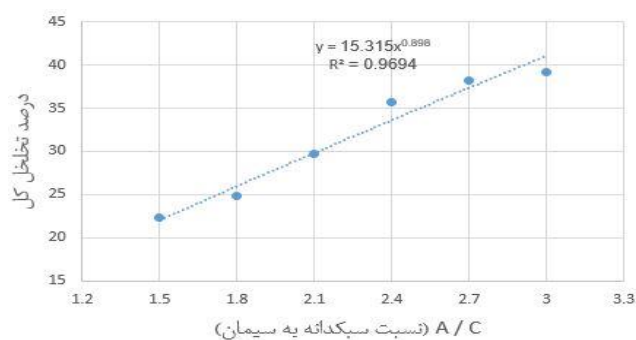
در شکل (۷) نمودار رابطه قوایی بین درصد تخلخل کل و نسبتهای A/C با ضریب همبستگی بالا ($R^2 = 0.9694$) و در شکل (۸) نمودار رابطه قوایی بین درصد تخلخل کل و چگالی خشک با ضریب همبستگی قوی ($R^2 = 0.9545$) برای بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. معادله تجربی رابطه بین درصد تخلخل کل p، نسبتهای A/C و چگالی خشک (D) برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکا در این پژوهش می‌توانند به ترتیب طبق معادلات (۵) و (۶) بیان شوند:

$$P = 15.315 \left(\frac{A}{C}\right)^{0.898} \quad R^2 = 0.9694 \quad (5)$$

$$D = 4449.6(P)^{-0.415} \quad R^2 = 0.9545 \quad (6)$$



شکل ۸: رابطه چگالی خشک با تخلخل کل.

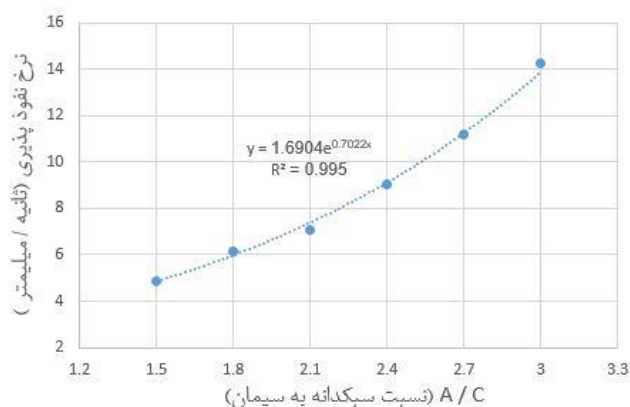


شکل ۷: رابطه تخلخل کل با نسبت A / C.

۳-۴- نرخ نفوذ پذیری

با افزایش نسبت A / C از ۱/۵ تا ۳، همانند تحلیل بخش ۲-۴، درصد تخلخل کل در درون بتن‌های متخلخل سبک افزایش یافت که منجر به افزایش نرخ نفوذ پذیری در بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش شد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، حداقل و حداکثر نرخ نفوذپذیری در بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش همانند مقادیر درصد تخلخل کل آنها، در طرح‌های L-۱/۵ (۴/۹ mm/s) و L-۳ (۱۴/۲ mm/s) ثابت شدند و حداکثر افزایش نرخ نفوذپذیری نسبت به مقدار آن در نمونه شاهد، مربوط به طرح L-۳ با مقدار mm/s ۹/۳ (افزایش ۱۸۹/۸٪) می‌باشد که به علت افزایش ۱۶/۸٪ تخلخل کل طرح L-۳ نسبت به نمونه شاهد است. بنابراین نرخ نفوذپذیری تمام بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در محدوده توصیه شده توسط ACI 522 [۲] قرار داشتند. طبق شکل (۹) نمودارنمایی معادله تجربی رابطه بین نرخ نفوذ پذیری (I) برحسب mm/s با نسبت A/C برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۷) بیان شود:

$$I = 1.6904(e)^{0.7022(\frac{A}{C})} \quad R^2 = 0.995 \quad (7)$$



شکل ۹: رابطه نرخ نفوذپذیری با نسبت A / C.

در پژوهشهای کاپلان و همکاران [۲۱]، رانگلو^۱ و همکاران [۳۲]، ملاسکین^۲ و همکاران [۴۲]، استریدر^۳ و همکاران [۳۸]، نرخ نفوذ پذیری آب با مقدار درصد تخلخل کل سنجیده شده است. بنابراین برای پیش بینی و همچنین مقایسه نرخ نفوذ پذیری این پژوهش با مقادیر مشابه آنها در پژوهشهای [۲۱، ۳۲، ۳۸، ۴۲] به وسیله درصد تخلخل کل، رابطه نمایی بین نرخ نفوذ پذیری و درصد تخلخل کل با ضریب همبستگی بالا ($R^2 = 0.9385$) در شکل (۱۰) ارائه شده است. معادله تجربی رابطه بین نرخ نفوذ پذیری (I) بر حسب mm/s با درصد تخلخل کل (P) برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۸) بیان شود:

$$I = 1.4985(e)^{0.0537P} \quad R^2 = 0.9385 \quad (8)$$

نتایج حداقل و حداکثر نرخ نفوذ پذیری بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در مقایسه با مقادیر مشابه آنها در بتن‌های متخلخل پژوهشهای کاپلان و همکاران (۲۰/۲ تا ۳۲/۳ mm/s) [۲۱] به ترتیب ۷۵/۸٪ و ۵۵/۹٪ کمتر، رانگلو و همکاران (۹/۲ تا ۱۸/۷ mm/s) [۳۲]، ۴۶/۹٪ و ۲۳/۹٪ کمتر، ملاسکین و همکاران (۲۰/۸ تا ۲۷/۸ mm/s) [۴۲]، ۷۶/۵٪ و ۴۸/۸٪ کمتر، استریدر و همکاران (۲/۷ تا ۵/۲ mm/s) [۳۸]، ۸۴/۵٪ و ۱۷۵/۲٪ بیشتر است. مقادیر درصد تخلخل کل همراه با نرخ نفوذ پذیری (P, I) در پژوهشهای کاپلان و همکاران (۲۰/۲، ۵۹٪) [۲۱]، رانگلو و همکاران (۱۸/۷، ۲۶٪) [۳۲]، ملاسکین و همکاران (۲۷/۸، ۲۷٪) [۴۲]، استریدر و همکاران (۵/۲، ۱۹/۶٪) [۳۸] می‌باشد در حالیکه در این پژوهش به وسیله پیش بینی معادله (۱۱) به ترتیب (۳۵/۶، ۵۹٪) (۷۶/۳٪ بیشتر)، (۲۶، ۶۷/۶٪ کمتر)، (۲۷، ۶/۴ mm/s) (۲۷٪ کمتر) و (۱۹/۶، ۴/۳ mm/s) (۱۷٪ کمتر) است.

درصد تخلخل کل بالاتر در بتن‌های متخلخل در محل، به علت جذب آب بیشتر (که مجموع جذب آب سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و عبور آب از داخل بتن متخلخل است) منجر به کاهش بیشتر روان آبهای سطحی می‌شود. هنگامیکه هدف تعیین نرخ نفوذ پذیری آب از داخل بتن متخلخل است، درصد تخلخل کل معیار دقیقی برای ارزیابی نرخ نفوذ پذیری آب نمی‌باشد زیرا درصد تخلخل کل مجموع تخلخل باز و بسته بتن متخلخل می‌باشد و ممکن است دو بتن متخلخل با سنگدانه‌های مختلف، درصد تخلخل کل یکسانی داشته باشند ولی درصد تخلخل باز آنها که معیار نفوذ پذیری است، تفاوت زیادی با یکدیگر داشته باشند. این حالت هنگامیکه مقدار درصد تخلخل سنگدانه‌ها در بتن‌های متخلخل تفاوت زیادی با یکدیگر داشته باشند رخ می‌دهد. بنابراین برای مقایسه صحیح نرخ نفوذ پذیری بتن‌های متخلخل مختلف با یکدیگر باید از معیار تخلخل باز استفاده شود. به علت تفاوت بودن وزن واحد حجم سنگدانه‌ها و همچنین مقدار خمیر سیمان در انواع بتن‌های متخلخل، معیار نسبت V_A / V_P (نسبت حجم سنگدانه به حجم خمیر سیمان) به صورت تئوری معیار قابل قبولی برای مقایسه حفرات باز و در نتیجه نرخ نفوذ پذیری در انواع بتن‌های متخلخل با یکدیگر می‌باشد و هرچه این نسبت کمتر باشد درصد تخلخل باز نیز کمتر است.

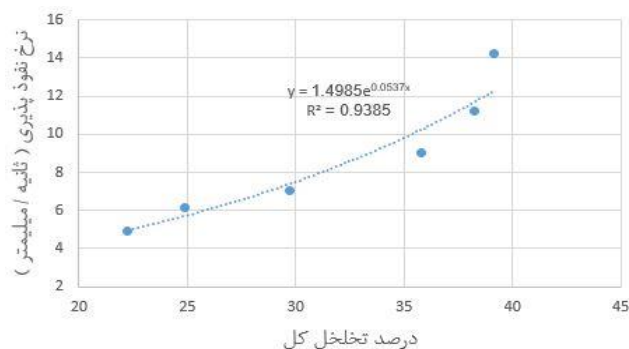
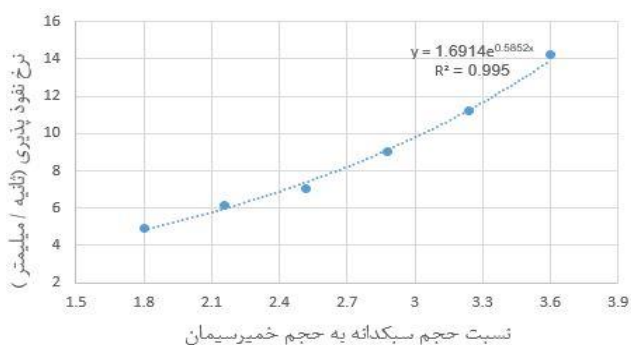
در شکل (۱۱) نمودار رابطه نمایی بین نرخ نفوذ پذیری و نسبت V_A / V_P با ضریب همبستگی بالا ($R^2 = 0.995$) ارائه شده است. معادله تجربی رابطه بین نرخ نفوذ پذیری (I) بر حسب mm/s با نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۹) بیان شود:

$$I = 1.6914(e)^{0.5852(\frac{V_A}{V_P})} \quad R^2 = 0.995 \quad (9)$$

¹. Rangelov

². Malaiskiene

³. Strieder



مقادیر $(\frac{V_A}{V_p}, P)$ در پژوهشهای کاپلان و همکاران (۲۱) (۲/۱۸، ۰.۵۹٪)، رانگلو و همکاران (۲۶) (۲/۲۸، ۰.۳۲٪)، ملاسکین و همکاران (۲۷) (۳/۰۷، ۰.۲۷٪)، استریدر و همکاران (۱۹/۶، ۰.۱۹۶٪) (۳۸) می باشد. با استفاده از معادله (۹)، نرخ نفوذ پذیری در این پژوهش در نسبتهای $\frac{V_A}{V_p}$ شامل ۱/۹۶، ۳/۰۷، ۲/۲۸، ۲/۱۸ به ترتیب برابر با ۵/۳۱، ۱۰/۲، ۶/۴۲، ۶/۰۶ mm/s است که در مقایسه با پژوهشهای کاپلان و همکاران (۲۱) [۲۱] ۷۰٪ کمتر، رانگلو و همکاران (۳۲) [۳۲] ۶۵/۷٪ کمتر، ملاسکین و همکاران (۴۲) [۴۲] ۶۳/۳٪ کمتر، استریدر و همکاران (۳۸) [۳۸] ۲/۷٪ بیشتر است. همانطور که مشاهده می شود نرخ نفوذ پذیری این پژوهش در مقایسه با پژوهش کاپلان و همکاران (۲۱) [۲۱] با معیارهای درصد تخلخل کل و نسبت $\frac{V_A}{V_p}$ به ترتیب ۷۶/۳٪ بیشتر و ۷۰٪ کمتر، پژوهش استریدر و همکاران (۳۸) [۳۸] به ترتیب ۱۷٪ کمتر و ۲/۷٪ بیشتر است که منجر به نتایج کاملاً متضاد شده است. اختلاف شدید در تخلخل سبکدانه‌های پژوهش کاپلان و همکاران (۲۱) [۲۱] نسبت به تخلخل لیکا در این پژوهش، علت اصلی نتایج متضاد نرخ نفوذ پذیری در این دو پژوهش است. آب بند نبودن محل اتصال لوله نفوذ پذیری به بتن متخلخل، پیش خیس نبودن نمونه هنگام آزمایش نرخ نفوذ پذیری و سرعت بالادریختن آب به داخل لوله نفوذ پذیری باعث ایجاد خطا و ثبت نرخ نفوذ پذیری بالا در بتن متخلخل می‌شوند که این عوامل می‌توانند دلیل بالاتر بودن نرخ نفوذ پذیری پژوهشهای کاپلان و همکاران (۲۱) [۲۱]، رانگلو و همکاران (۳۲) [۳۲] و ملاسکین و همکاران (۴۲) [۴۲] نسبت به این پژوهش باشند.

۴-۴- هدایت حرارتی

با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، مقدار خمیر سیمان کاهش در نتیجه حفرات باز پر شده از هوا در داخل نمونه افزایش یافت که منجر به کاهش ضریب هدایت حرارتی در نمونه‌ها شد. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، حداقل و حداکثر ضریب هدایت حرارتی در بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش به ترتیب در $L-3$ (0.134 W/m.K) و $L-1/5$ (0.153 W/m.K) ثبت شدند و طرح $L-3$ که دارای بالاترین درصد تخلخل کل و کمترین چگالی خشک بود، بیشترین درصد کاهش ضریب هدایت حرارتی را نسبت به نمونه شاهد (کاهش ۳۶/۵٪) داشت و به عنوان عایق ترین بتن متخلخل سبک این پژوهش ثبت شد.

نتایج حداقل و حداکثر ضریب هدایت حرارتی بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در مقایسه با مقادیر مشابه آنها در بتن‌های متخلخل سبک پژوهشهای زائتانگ و همکاران (۱۶) (۰/۱۶ تا 0.255 W/m.K) [۱۶] به ترتیب ۱۱۰/۶٪ و ۱۱۲/۴٪ بیشتر، چینداپراسیرت و همکاران (۱۵) (۰/۱۵ تا 0.27 W/m.K) [۱۷]، ۱۲۴/۷٪ و ۹۶/۷٪ بیشتر، در مقایسه با بتن متخلخل با سنگدانه های بتن باز یافتی پژوهش زائتانگ و همکاران (۷۸) (۰/۷۸ تا 0.99 W/m.K) [۹] به ترتیب ۵۶/۸٪ و ۴۶/۴٪ کمتر، در مقایسه با بتن متخلخل پر مقاومت پژوهش شن^۱ و همکاران (۶۱) (۰/۶۱ تا 1.28 W/m.K) [۴۰] به ترتیب ۴۴/۷٪ و ۵۸/۵٪ کمتر و در مقایسه با بتن نفوذناپذیر پر مقاومت پژوهش عبدالحکیم^۲ و همکاران

1. Shen

2. El-Hakim

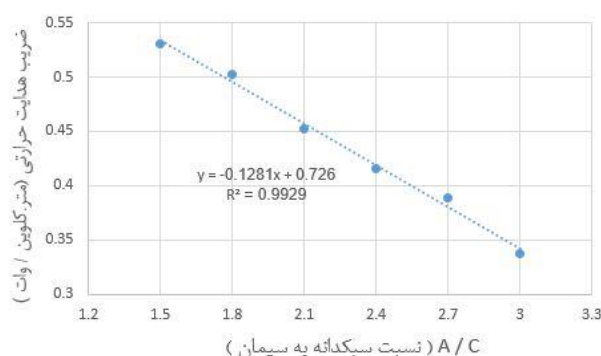
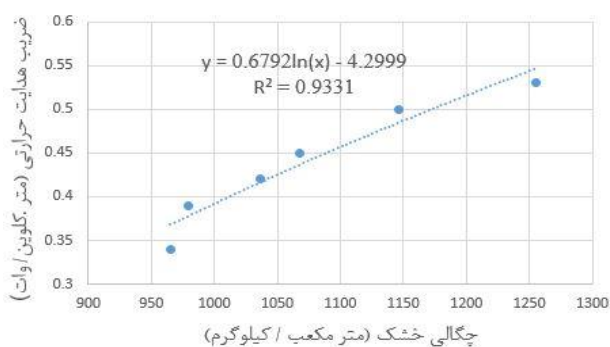
[۴۳] (۱/۶۳ تا ۲/۱۱ W / m.K) به ترتیب ۷۹/۳٪ و ۷۴/۹٪ کمتر است. وانگ و همکاران [۴۴]، در پژوهششان گزارش کردند برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان (۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴) در بتن‌های نفوذپذیر، رابطه سهمی شکل بین ضریب هدایت حرارتی و ضریب نفوذپذیری آب وجود دارد که برای نسبت آب به سیمان ۰/۳، ضریب همبستگی بالاست. آنها دریافتند که برای نسبت‌های آب به سیمان مختلف، با افزایش ضریب نفوذپذیری آب تا ۲۰ mm/s، ضریب هدایت حرارتی نیز به صورت پایدار تغییر کرد ولی وقتی ضریب نفوذپذیری آب بالاتر از ۲۰ mm/s بود، به علت اینکه گرما در مصالح متراکم به طور موثر و در مصالح متخلخل به طور غیر موثر انتقال می‌یابد، ضریب هدایت حرارتی به طور چشمگیری کاهش یافت. سبکدانه‌ها به علت اینکه در درونشان حفرات هوای بیشتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی وجود دارد، ضریب هدایت حرارتی را نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، بیشتر کاهش می‌دهند و نقش بسیار مهمی در کاهش ضریب هدایت حرارتی در انواع بتن‌ها دارند. به طور کلی تفاوت در تخلخل سنگدانه‌ها و مقدار خمیر سیمان در بتن‌های پژوهش‌های مختلف که منجر به تفاوت چگالی خشک بتن‌ها می‌شود، علت اصلی تفاوت ضریب هدایت حرارتی انواع بتن‌ها می‌باشد. به عنوان مثال در پژوهش چندپراسیرت و همکاران [۱۷] که از سبکدانه‌های بازیافتی بدست آمده از بلوک بتن اتوکلاو با چگالی خشک میله نخورده ۳۰۰ kg/m³ برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده شده است، ضریب هدایت حرارتی ۰/۱۵ W/m.K مربوط به نمونه با حجم خمیر سیمان ۲۱/۷٪ و چگالی خشک ۷۷۵ kg/m³ می‌باشد در حالیکه در این پژوهش کمترین ضریب هدایت حرارتی ۰/۳۴ W / m.K مربوط به نمونه با حجم خمیر سیمان ۱۵/۴٪ و چگالی خشک ۹۶۵/۱ kg/m³ بود. با وجود اینکه حجم خمیر سیمان در پژوهش حاضر کمتر بود ولی به علت بالاتر بودن چگالی خشک میله نخورده لیکا نسبت به سبکدانه بازیافتی و در نتیجه بالاتر بودن چگالی خشک بتن متخلخل سبک، ضریب هدایت حرارتی بالاتری در این پژوهش ثبت شد. مقادیر ضریب هدایت حرارتی این پژوهش در مقایسه با مقادیر آنها در پژوهش‌های [۹، ۱۶، ۱۷، ۴۰، ۴۳] نشان داد که افزایش چگالی خشک بتن متخلخل، منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود که سازگار با نتایج پژوهش‌های زائتانگ و همکاران [۱۶] و چندپراسیرت و همکاران [۱۷] است. در شکل (۱۲) نمودار رابطه خطی بین ضریب هدایت حرارتی و نسبت‌های A/C با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9929$) بسیار قوی و در شکل (۱۳) نمودار رابطه لگاریتمی بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. معادلات تجربی رابطه بین ضریب هدایت حرارتی (λ) بر حسب (W/mK) با نسبت‌های A/C و چگالی خشک (D) بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای به ترتیب می‌توانند طبق معادلات (۱۰) و (۱۱) بیان شوند:

$$\lambda = -0.1281\left(\frac{A}{C}\right) + 0.726$$

$$R^2 = 0.9929 \quad (10)$$

$$\lambda = 0.6792 \ln(D) - 4.2999$$

$$R^2 = 0.9333 \quad (11)$$



شکل ۱۳: رابطه میانگین ضریب هدایت حرارتی با چگالی خشک.

شکل ۱۲: رابطه میانگین ضریب هدایت حرارتی با نسبت A / C

۴-۴ - مقاومت فشاری

هنگامیکه نسبت A/C از ۱/۵ به ۳ افزایش یافت، حجم خمیر سیمان از ۳۰/۹٪ به ۱۵/۴٪ در نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. از طرفی بتن متخلخل به بتن با اسلامپ کم و یا حتی صفر مشهور است [۴۵] و طرح L-۱/۵ با وجود دارا بودن بیشترین حجم خمیر سیمان، جریان اسلامپ کمی نسبت به بتن‌های معمولی داشت. با کاهش حجم خمیر سیمان، جریان اسلامپ در نمونه‌ها به شدت کاهش یافت و هنگامیکه جریان اسلامپ کم باشد، خمیر سیمان تازه، توانایی پر کردن فضای خالی بین سبکدانه‌ها را ندارد، در نتیجه تعداد و حجم حفرات در داخل بتن متخلخل سبک افزایش یافت [۴۶، ۴۷] که منجر به کاهش ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ و افزایش تخلخل باز و ضعیف شدن اتصال بین لیکا‌های درشت دانه شد (شکل ۶-ب و ۶-د). بنابراین همانطور که شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه از (MPa) ۱۲/۲ به (MPa) ۳/۶ کاهش یافت. توجه به این نکته ضروری است که برخلاف بتن‌های با سنگدانه نرمال، در بتن‌های سبک، ضعیف‌ترین فاز به جای ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ)، سبکدانه می‌باشد. به عبارت دیگر ویژگیهای سبکدانه نقش اصلی را در تعیین مقاومت بتن‌های سبک ایفا می‌کنند [۴۸] و همانند بتن‌های سبک، در بتن‌های متخلخل سبک به علت تخلخل و مقاومت پایین سبکدانه، ضعیف‌ترین فاز، سبکدانه می‌باشد در نتیجه هنگامیکه بتن متخلخل سبک تحت بار محوری فشاری قرار بگیرد، از روی سبکدانه گسیخته می‌شود. بنابراین جایگزینی پوزولان با سیمان، افزودن الیافها و فنرهای فلزی به خمیر سیمان که در بتن‌های معمولی گزارش شده است باعث بهبود قابل ملاحظه ویژگیهای مکانیکی بتن می‌شود [۴۹]. در بتن متخلخل سبک باعث بهبود مقاومت فشاری نمی‌شود. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش درصد مقاومت فشاری (۷۰/۵٪) نسبت به نمونه شاهد در طرح L-۳ می‌باشد که دارای بیشترین درصد تخلخل و کمترین ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ و چگالی خشک بود. طبق ACI 213 [۱۲] بتن‌های متخلخل سبک L-۲/۱، L-۲/۴، L-۲/۷، L-۳، در رده بتن‌های عایق و L-۱/۵ و L-۱/۸ در رده بتن‌های نیمه سازه‌ای (پرکننده) طبقه بندی می‌شوند.

برای مقایسه صحیح مقاومت فشاری بتن‌های مختلف با یکدیگر، اولاً نوع و ابعاد نمونه‌ها باید یکسان باشند و ثانیاً از مقاومت فشاری ویژه (نسبت مقاومت فشاری به چگالی خشک بتن) به جای مقاومت فشاری استفاده شود. از این روش در پژوهش لبو و همکاران [۲۰] برای مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک استفاده شده است. در شکل (۱۴) به ترتیب نمودار رابطه قوایی بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نمودار رابطه لگاریتمی بین مقاومت فشاری ویژه ۲۸ روزه با نسبت A/C برای بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۴) دیده می‌شود با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، مقاومت فشاری ویژه ۲۸ روزه از ۹/۷ (kPa.m³/kg) به ۳/۷ (kPa.m³/kg) کاهش یافت. روند یکسان کاهش مقاومت فشاری و مقاومت فشاری ویژه در بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش بیانگر این موضوع است که روند کاهش مقاومت فشاری متناسب با کاهش چگالی خشک می‌باشد. با توجه به یکسان بودن وزن واحد حجم درشت دانه لیکا و نسبت آب به سیمان در تمام نمونه‌ها، مقدار سیمان عامل تعیین کننده مقاومت فشاری در بتن‌های متخلخل این پژوهش می‌باشد. معادلات تجربی رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (F_c) بر حسب (MPa) و همچنین مقاومت فشاری ویژه ۲۸ روزه (f_c) بر حسب (kPa.m³/kg) با نسبت A/C برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند به ترتیب با معادلات ۱۲ و ۱۳ بیان شوند:

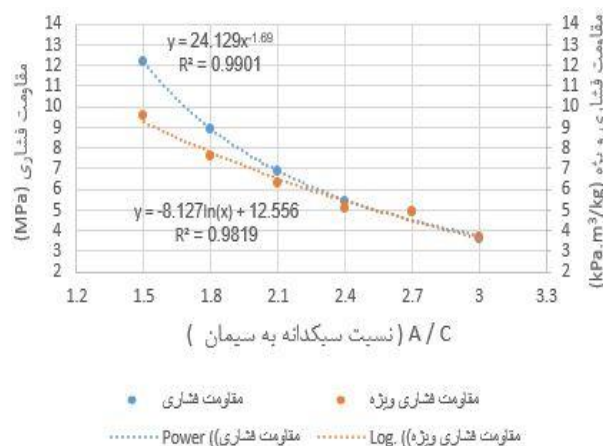
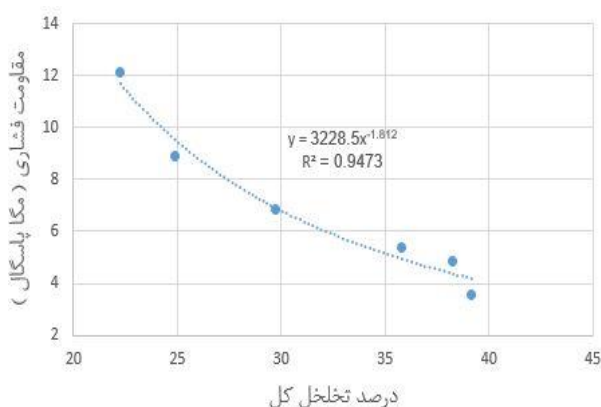
$$F_c = 24.129 \left(\frac{A}{C}\right)^{-1.69} \quad R^2 = 0.9901 \quad (12)$$

$$f_c = -8.127 \ln\left(\frac{A}{C}\right) + 12.556 \quad R^2 = 0.9819 \quad (13)$$

به علت اینکه تخلخل کل یک عامل مهم در تعیین مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل می‌باشد [۳۹] و در تمام پژوهش‌های انجام شده راجع به بتن متخلخل سبک، رابطه بین مقاومت فشاری و تخلخل کل ارائه شده است [۲۱-۱۶]. در این مطالعه نیز رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و تخلخل کل در شکل (۱۵) به نمایش در آمده است. معادله تجربی رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (F_c) بر حسب (Mpa) با درصد تخلخل کل (P) برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند با معادله (۱۴) بیان شود:

$$F_c = 3228.5(P)^{-1.82}$$

$$R^2 = 0.9437 \quad (14)$$



شکل ۱۵: رابطه میانگین مقاومت فشاری با درصد تخلخل کل.

شکل ۱۴: رابطه میانگین مقاومت فشاری و مقاومت فشاری ویژه با نسبت A/C.

نتایج حداقل و حداکثر درصد تخلخل کل و مقاومت فشاری ۲۸ روزه (P, F_c) در پژوهش‌های نگین^۱ و همکاران [۴۵] به ترتیب (۱۶/۴۴MPa، ۳۱/۸٪) و (۱۰/۷۱MPa، ۳۴/۹٪)، اوزنر اوز [۱۹] به ترتیب (۱۵/۲۱MPa، ۱۹٪) و (۳/۸۵MPa، ۲۸/۵٪) و سینگ^۲ و همکاران [۳۷] به ترتیب (۳۰/۲۱MPa، ۱۶/۴٪) و (۲۷/۰۲MPa، ۲۲/۳٪) می‌باشد در حالیکه با استفاده از معادله (۱۴) به ازای درصد تخلخل‌های یکسان با پژوهش‌های نگین و همکاران [۴۵] به ترتیب (۶/۱۲MPa، ۳۱/۸٪) و (۵/۱۷MPa، ۳۴/۹٪)، اوزنر اوز [۱۹] به ترتیب (۱۵/۵۵MPa، ۱۹٪) و (۷/۴۶MPa، ۲۸/۵٪) و سینگ و همکاران [۳۷] به ترتیب (۲۰/۳۸MPa، ۱۶/۴٪) و (۱۱/۶۴MPa، ۲۲/۳٪)، مقاومت فشاری برای این پژوهش پیش بینی می‌شود که نسبت به حداقل و حداکثر مقاومت فشاری پژوهش‌های نگین و همکاران [۴۵] به ترتیب ۵۱/۷٪ و ۶۲/۸٪ کمتر، اوزنر اوز [۱۹] به ترتیب ۹۳/۸٪ و ۲/۲٪ بیشتر، سینگ و همکاران [۳۷] به ترتیب ۵۶/۹٪ و ۳۲/۵٪ کمتر است.

در پژوهش نگین و همکاران [۳۶] به علت بالاتر بودن مقاومت سنگدانه طبیعی نسبت به لیکا، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به این پژوهش گزارش شد از طرفی به علت جایگزینی ۴۰٪ سنگدانه طبیعی با سنگدانه فرآوری شده از صدف دریایی که مقاومت کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارد، مقاومت فشاری آن افزایش کمتری نسبت به مقاومت فشاری این پژوهش داشت. در پژوهش اوزنر اوز [۱۹] مقدار درصد تخلخل کل و مقدار متناظر نسبت حجم سبکدانه به حجم خمیر سیمان ($V_A/V_P, P$)، (۲/۶۲، ۱۹٪) و (۳/۶۷، ۲۸/۵٪) می‌باشد در حالیکه در این پژوهش به ازای تخلخل‌های کل ۱۹٪ و ۲۸/۵٪، نسبت‌های V_A/V_P به ترتیب کمتر از ۱/۸ و ۲/۵۲ است که بیانگر تخلخل باز کمتر و افزایش ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و افزایش ناحیه باندینگ نسبت به پژوهش اوزنر اوز [۱۹] است. بنابراین می‌توان انتظار داشت بتن متخلخل سبک حاوی لیکا در این پژوهش نسبت به بتن متخلخل با سنگدانه طبیعی (تخلخل کل ۱۹٪) و بتن متخلخل با سنگدانه طبیعی و حاوی ۵۰٪ سبکدانه پومیس (تخلخل کل ۲۸/۵٪) در پژوهش اوزنر اوز [۱۹] مقاومت فشاری بالاتری

¹. Nguyen

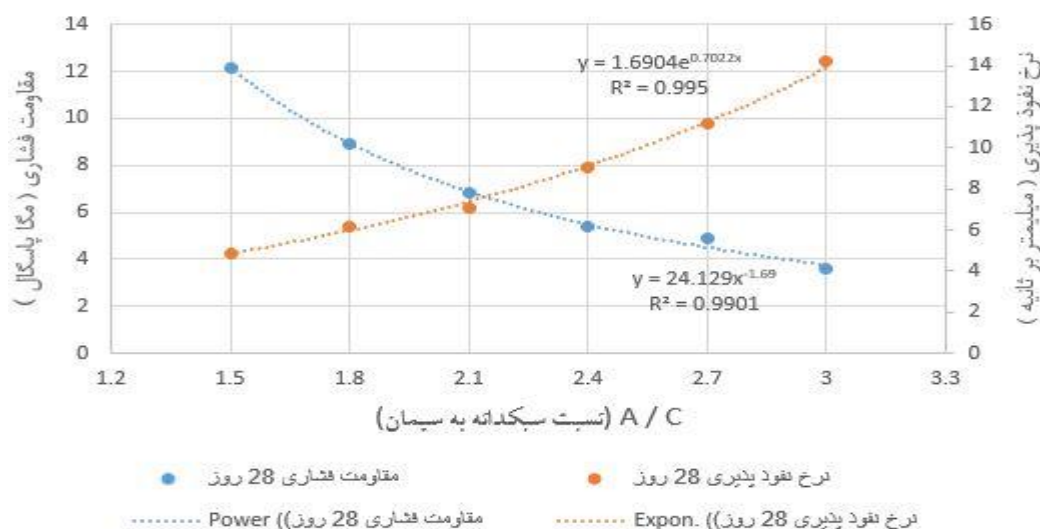
². Singh

داشته باشد. در پژوهش سینگ و همکاران [۳۷] در هر دو تخلخل کل ۱۶/۴٪ (مربوط به بتن متخلخل با سنگدانه طبیعی ۱۲/۵ میلی متر حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن) و ۲۲/۳٪ (مربوط به بتن متخلخل با سنگدانه طبیعی ۲۰ میلی متر)، نسبت $V_A/V_P = 1/956$ بود، با وجود پایین تر بودن نسبت V_A/V_P در تخلخل های ۱۶/۴٪ و ۲۲/۳٪، به علت بالاتر بودن مقاومت سنگدانه طبیعی نسبت به لیکا، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به این پژوهش ثبت کرد.

نتایج حداقل و حداکثر مقاومت فشاری ویژه بتن های متخلخل سبک این تحقیق در مقایسه با پژوهشهای نگوین و همکاران [۴۵] ($kPa \cdot m^3 / kg$) (۸/۸ - ۶/۰۲) به ترتیب ۳۸/۴٪ کمتر و ۱۰٪ بیشتر، اوزنوز اوز [۱۹] ($kPa \cdot m^3 / kg$) (۳/۱۹ - ۸/۰۶) به ترتیب ۱۶/۳٪ و ۲۰٪ بیشتر، سینگ و همکاران [۳۷] ($kPa \cdot m^3 / kg$) (۱۵/۰۳ - ۱۶/۳۵) به ترتیب ۷۵/۳٪ و ۴۰/۸٪ کمتر است. لازم به ذکر است به علت اینکه در پژوهشهای انجام شده بر روی بتن های متخلخل سبک حاوی سبکدانه [۲۱-۱۶] از نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی متر استفاده نشده بود از سایر پژوهشهای بتن متخلخل که چگالی خشک آنها کمتر از $2000 \text{ Kg} / m^3$ بود و در رده بتن های سبک طبقه بندی می شدند، برای مقایسه استفاده شده است.

۴-۶ - طرح اختلاط بهینه

در بتن متخلخل برای دستیابی به تعادل بین دو ویژگی مطلوب اما ناسازگار با یکدیگر، مقاومت فشاری و نرخ نفوذ پذیری می توانند برای الزامات ویژه در محل مناسب باشند [۳۷]. در بعضی از پژوهشهای انجام شده قبلی راجع به بتن های متخلخل از این روش برای تعیین طرح اختلاط بهینه استفاده شده است [۲۱، ۵۰]. همانطور که در بخشهای ۳-۴ و ۴-۴ اشاره شد، با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳ نرخ نفوذ پذیری افزایش و مقاومت فشاری کاهش یافت. بنابراین محل تلاقی نمودارهای آنها بر مبنای نسبت $A/C = 210693$ همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می شود، به عنوان طرح اختلاط بهینه بتن های متخلخل سبک این پژوهش می باشد که حتی با کمی چشم پوشی می توان مخلوط $L-2/1$ را به عنوان طرح بهینه در نظر گرفت. در طرح اختلاط بهینه، مقادیر نرخ نفوذ پذیری و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن متخلخل سبک حداکثر مقدار خود را دارند و تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز به ترتیب طبق معادلات ۵، ۷ و ۱۲ به ترتیب ۲۹/۴٪، $7/23 \text{ mm/s}$ و $7/06 \text{ MPa}$ پیش بینی می شوند که در بازه توصیه شده توسط ACI 522 [۲] قرار می گیرند. بتن های متخلخل سبک ساخته شده با لیکا در این پژوهش به علت مقاومت فشاری پایین، برای کاربردهای سازه ای مناسب نمی باشند اما برای کاربردهای دیگر نظیر پیاده روها، مسیرهای عابر پیاده، پارکینگها و مناطق با ترافیک سبک مناسب می باشند [۹].



شکل ۱۷: طرح اختلاط بهینه بر مبنای اثر نسبت A/C بر روی مقاومت فشاری و نرخ نفوذ پذیری.

۵ - نتیجه گیری

در این پژوهش از لیکای سازه‌ای برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده شد و اثر نسبت‌های مختلف سبکدانه به سیمان (A/C) شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵ بر روی ویژگی‌های فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب هدایت حرارتی) و مکانیکی (مقاومت فشاری) نمونه‌ها در سن ۲۸ روز، مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳ مهمترین نتایج این تحقیق به صورت خلاصه شده شامل موارد زیر می‌باشند:

(۱) چگالی خشک بتن‌های متخلخل سبک کاهش یافت و مقادیرشان در بازه $1255/6 \text{ kg/m}^3 - 965/1 \text{ kg/m}^3$ ثبت شدند. بیشترین درصد کاهش چگالی خشک نسبت به بتن متخلخل شاهد ۲۳/۱٪ ثبت شد که مربوط به طرح L-۳ بود. چگالی خشک همه بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش حدود ۲ تا ۲/۵ برابر از چگالی خشک بتن‌های معمولی (2400 kg/m^3) کمتر بودند.

(۲) حجم خمیر سیمان در نمونه‌ها از ۳۰/۹٪ به ۱۵/۴٪ کاهش یافت که منجر به افزایش تخلخل باز و در نتیجه افزایش درصد تخلخل کل شد. درصد تخلخل کل بتن‌های متخلخل سبک در بازه ۳۹/۱٪ - ۲۲/۳٪ قرار داشتند و بیشترین افزایش درصد تخلخل کل نسبت به نمونه شاهد ۱۶/۸٪ ثبت شد که به طرح L-۳ تعلق داشت.

(۳) نرخ نفوذ پذیری در نمونه‌ها افزایش یافت. حداقل و حداکثر نرخ نفوذپذیری در بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش همانند مقادیر درصد تخلخل کل آنها، در طرح‌های L-۱/۵ ($4/9 \text{ mm/s}$) و L-۳ ($14/2 \text{ mm/s}$) اندازه گیری شد، بنابراین نرخ نفوذپذیری تمام بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در محدوده توصیه شده توسط ACI 522 [۲] قرار داشتند.

(۴) به علت افزایش درصد تخلخل کل در بتن‌های متخلخل سبک ضریب هدایت حرارتی از ۰/۵۳ به $0/34 \text{ W/m.K}$ کاهش (۳۶/۵٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد) یافت. ضریب هدایت حرارتی بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای در این پژوهش در مقایسه با بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با سبکدانه‌های طبیعی (پومیس، دیاتومیت) و سبکدانه‌های بازیافتی بتن هوادار اتوکلاو، تقریباً بیش از ۲ برابر بیشتر، نسبت به بتن متخلخل ساخته شده با سنگدانه بتن بازیافتی، تقریباً ۲ برابر کمتر و نسبت به بتن پرمقاومت نفوذ ناپذیر حدود ۴ تا ۵ برابر کمتر بود.

(۵) مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های متخلخل سبک از ۱۲/۲ (طرح L-۱/۵) به ۳/۶ MPa (طرح L-۳) کاهش یافت. کاهش شدید (۷۰/۵٪) مقاومت فشاری نمونه‌ها به علت کاهش ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ و افزایش تخلخل باز و ضعیف شدن اتصال بین لیکاهای درشت دانه بود. طبق ACI 213 [۱۲] بتن‌های متخلخل سبک L-۲/۱، L-۲/۴، L-۲/۷، L-۳ در رده بتن‌های عایق و L-۱/۵ و L-۱/۸ در رده بتن‌های نیمه سازه‌ای (پرکننده) طبقه بندی می‌شوند.

(۶) از تلاقی نمودارهای نرخ نفوذ پذیری و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز بر مبنای نسبت A/C، طرح اختلاط بهینه بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش با نسبت A/C، تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز به ترتیب ۰/۶۹۳، ۲/۲۹/۴، $7/23 \text{ mm/s}$ و $7/06 \text{ MPa}$ بدست آمد که مقادیرشان در بازه توصیه شده توسط ACI 522 [۲] قرار داشتند. بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکا در این پژوهش به علت مقاومت فشاری پایین، برای کاربردهای سازه‌ای مناسب نمی‌باشند اما برای کاربردهای دیگر نظیر پیاده‌روها، مسیرهای عابر پیاده، پارکینگها و مناطق با ترافیک سبک مناسب می‌باشند [۹].

مراجع

- [1] Tennis, P., Leming, M.L., Akers, D.J.(2004). *Pervious concrete pavements*, Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association, Skokie, IL and Silver Springer, MD, 1- 5.
- [2] American Concrete Institute, ACI Committee 522. (2010). *Pervious concrete*. Detroit.

- [3] Zhang, J., Huang, Y., Ma, G., sun, J., Nener, B.(2020). A metaheuristic-optimized multi-output model for predicting multiple properties of pervious concrete. *Construction and Building material*, 249, 20 July, 118803.
- [4] Sata, V., Wongsas, A., Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 42, 33-39.
- [5] Yeih, W., Fu, T., Chang, J., Huang, R. (2015). Properties of pervious concrete made air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, 93, 737-745.
- [6] Singh, A., Sampath, P.V., Biligiri, K.P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging material characterization, and environmental aspects. *Construction and Building Materials*, 261, 20 November, 120491.
- [7] Takebayashi, H., Moriyama, M. (2012). Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigati-on. *Advances in materials science and engineering*, 2012, 17 May, 523051.
- [8] Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., Mavrogiani, A. (2012). London's urban heat island : Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and buildings*, 47, 302-311.
- [9] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsas, A., Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15- 21.
- [10] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., İpek, S. (2014). Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19- 24.
- [11] Scholz, M., Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42 (11) 3830-3836.
- [12] American Concrete Institute, ACI Committee 213R. (2003). *Guid for structural lightweight-aggregate concrete*. Farmington Hills, MI.
- [13] Rashad, A.M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material-An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757- 775.
- [14] Pla, C., Abril, A.J.T., Abellan, J.V., Benavente, D. (2018). Influence of microstructure on fluid transport and mechanical properties in structural concrete produced with lightweight clay aggregates. *Construction and Building Materials*, 171, 388-396.
- [15] Madadi, A., Naddaf, H.E., Shadnia, R., Zhang, L. (2018). Characterization of ferrocement slab panels containing lightweight expanded clay aggregate using digital image correlation technique. *Construction and Building Materials*, -180, 464-476.
- [16] Zaetang, Y., Wongsas, A., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2013). Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585-591.
- [17] Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., Sujumnongtokul, P., Sata, V. (2015). Mechanical and thermal properties of recycling lightweight pervious concrete. *Arabian Journal for Science and engineering*, 40(2), 443-450.
- [18] Khankhaje, E., Salim, M.R., Mirza, J., Hussin, M.W. (2016). Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 126, 151- 160.
- [19] Öznure Öz, H. (2018). Properties of pervious concrete partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 166, 601- 609.
- [20] Liu, R., Xiao, H., Pang, S.D., Geng, J., Yang, H. (2020). Application of sterculia foetida petiole wastes in lightweight pervious concrete. *Journal of cleaner production*, 246, 10 February, 118972.
- [21] Kaplan, G., Gulcan, A., Cagdas, B., Bayraktar, O.y. (2021). The impact of recycled coarse aggregates obtained from waste concretes on lightweight pervious concrete properties. *Environmental science and Pollution Research*, 28, 17369-17394.
- [22] Khalily, M., Saberi, V., Saberi, H., Mansouri, V., Sadeghi, A., Pachide, G. (2022). An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8 (12), 284-307.
- [23] Pachide, G., Toufigh, V. (2021). Strength of SCLC recycle springs and fibers concrete subject to high temperatures. *Structural Concrete*, 23(1), 285-299.
- [24] American society for Testing and Materials, ASTM C127-15. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. U. S . A, 5P.

- [25] American society for Testing and Materials, ASTM C29/C29-16.(2016). *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. U. S . A, 5P.
- [26] <https://WWW.hegmatancement.com>.
- [27] <https://leca.ir>
- [28] Zhang, J., Huang, Y., Ma, G., sun, J., Nener, B.(2020). A metaheuristic-optimized multi-output model for predicting multiple properties of pervious concrete. *Construction and Building material*, 249, 20 July,118803.
- [29] American society for Testing and Materials, ASTM C192/C192M-15. (2015). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. U.S. A , 8P.
- [30] American society for Testing and Materials, ASTM C1754/C1754M-12. (2012). *Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete*. U.S. A , 3P.
- [31] Aravind, N., Abdulrehman, T.I.(2021). A review and sequel experimental analysis on physical and mechanical properties of permeable concrete for pavement construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 09 Jun , 1936519.
- [32] Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L., Englund, K.(2016).Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 875-885.
- [33] American society for Testing and Materials, ASTM C1701/C1701M.(2017). *Standard Test Method for Infiltration rate of in place pervious concrete*. U.S . A, 3P.
- [34] American society for Testing and Materials, ASTM C 518-15.(2015). *Standard Test Method for Steady- State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*.U. S. A,15P.
- [35] BRITISH STANDARD , BS EN 12390-3.(2002). *Testing hardened concrete –Part 3: Compressive strength of test specimens*. Britain,18P.
- [36] Liu, T., Wang, Z., Zou, D., Zhou, A., Du,J.(2019). Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and concrete research*,122,72-82.
- [37] Singh, B.S., Murugan, M.(2020). Effect of aggregate size on properties of polypropylene and glass fiber- reinforced pervious concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6),2034-2048.
- [38] Strieder, H.L., Dutra,V.F.P., Graeff, A.G.,Nunez, W.P., Merten, F.R.M.(2022). Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*,315.10 January,125384
- [39] Zhong, R., Wille, K.(2016). Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70,130-138.
- [40] Shen,P., Zheng,H., Lu,J.,Poon,C,S.(2021). Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength pervious concrete. *Resources , Conservation and Recycling*,174,November,105736.
- [41] Gholhaki, M., Pachideh, G., Moshatgh, A.(2019). Performance of Porous Pavement Containing Different Types of Pozzolans *International Journal of Engineering*, 32 (9), 1277-1283.
- [42] Malaiskiene,J.,Kizinievic,O.,Sarkauskas,A.(2020).The impact of coarse aggregate content on infiltration rate, structure and other physical and mechanical properties of pervious concrete. *European journal of Environmental and Civil Engineering*,24,569-582.
- [43] El-Hakim, R., Elgendy, G., El-Badawy,. Amin,M.(2021). Performance evaluation of steel slag high performance concrete for sustainable pavements. *International Journal of Pavement Engineering*,6 may, 1922908.
- [44] Wang, H., Zhang, A., Shi, F., Liu, J., Cao, P., Du, T., Gu, H.(2020). Development of relationships between permeability coefficient and electrical and thermal conductivity of recycled aggregates permeable cement concrete. *Construction and Building Materials*,254. 10 September,119247.
- [45] Nguyen, D.H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L., Baraud, F.(2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*, 49,151-160.
- [46] Lian, C., Zhuge, Y.(2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 24, 2664-2671.
- [47] Choi, H., Choi, H., Lim, M., Inoue, M., Kitagaki, R., Noguchi, T.(2016). Evaluation on the Mechanical Performance of Low-Quality Recycled Aggregate Through Interface Enhancement Between Cement Matrix and Coarse Aggregate by Surface Modification Technology. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, 87-97.
- [48] Nahhab, A., Ketab, A.(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 steel fibers. *Construction*

and Building Materials, 233. 10February, 117922.

- [49] Pachideh, G., Gholhaki, M. (2021). An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, 22(1), 550-565.
- [50] Ibrahim, H.A., Razak, H.A. (2016). Effect of palm oil cleancer in corporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 115, 70-77.