

Investigation of Effective Parameters on Compressive Strength, Specific Electrical Resistance and Water Absorption of Lightweight Pervious Concrete

Shahriar Gholamin Noveirsar

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

Morteza Jamshidi*

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

Rahmat Madandoust

Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
m.jamshidi@iauc.ac.ir

Keywords:

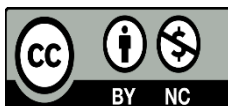
lightweight
pervious concrete,
Specific electrical
resistance,
compressive
strength,
water absorption

Abstract

Pervious concrete is a special type of lightweight concrete with low or even zero slump, which consists of cement, coarse aggregate, a limited percentage of fine aggregate (or no fine aggregate), various chemical and pozzolanic additives. In this article, structural LECA with a volumetric weight of 750 kg/m^3 and a fixed water-to-cement ratio ($W/C = 0.3$) was used to make lightweight pervious concrete and the effect of different ratios of lightweight aggregate to cement (A/C) including 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3, total porosity and volume percentage of cement paste on compressive strength, specific electrical resistance and percentage of water absorption of lightweight pervious concrete aged 28 days were investigated. With the increase of A/C ratio from 1.5 to 3, the volume of cement paste decreased from 30.873% to 15.436% in the samples and the total porosity increased from 21.64% to 38.08%, which led to a decrease. Specific electrical resistance decreased from $11.45 \Omega.m$ to $6.841 \Omega.m$, compressive strength decreased from 13.27 MPa to 4.37 MPa, and water absorption increased from 11.185% to 12.695% in lightweight pervious concrete samples. The results of this research showed the improvement of physical properties and the decrease of mechanical properties and durability of lightweight pervious concrete containing LECA.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



بررسی پارامترهای موثر بر مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی ویژه و جذب آب بتن متخلخل سبک

شهریار غلامین نوویسر

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

مرتضی جمشیدی*

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

رحمت مدندوست

استادگروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

m.jamshidi@iauc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۰ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۲ فروردین ۱۴۰۲

چکیده

بتن متخلخل نوعی ویژه از بتن سبک با اسلامپ کم یا حتی صفر شناخته می‌شود که از سیمان، درشت دانه، درصد محدودی از ریز دانه (یا فاقد ریزدانه)، افزودنی‌های مختلف شیمیایی و پوزولانی تشکیل شده است. در این مقاله 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 شده و اثر نسبت‌های مختلف سبکدانه به سیمان (A/C) شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵، تخلخل کل و درصد حجمی خمیر سیمان بر روی مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی ویژه و درصد جذب آب بتن متخلخل سبک در سن ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، حجم خمیر سیمان از $30/873\%$ به $15/436\%$ در نمونه‌ها کاهش و تخلخل کل از $21/64\%$ به $38/08\%$ افزایش یافت که منجر به کاهش مقاومت الکتریکی ویژه از $11/45 \Omega.m$ به $6/841 \Omega.m$ ، کاهش مقاومت فشاری از $13/27 \text{ Mpa}$ به $4/37 \text{ Mpa}$ و افزایش جذب آب از $11/185\%$ به $12/695\%$ در نمونه‌های بتن متخلخل سبک شد. نتایج این پژوهش بهبود ویژگی‌های فیزیکی و افت ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن متخلخل سبک حاوی لیکا را نشان دادند.

کلید واژگان: بتن متخلخل سبک، مقاومت الکتریکی ویژه، مقاومت فشاری، جذب آب

۱- مقدمه

بتن متخلخل نوعی ویژه از بتن سبک با اسلامپ کم یا حتی صفر شناخته می‌شود [۱] که از سیمان، درشت‌دانه، درصد محدودی از ریزدانه (یا فاقد ریزدانه)، افزودنی‌های مختلف شیمیایی و پوزولانی تشکیل شده است- [۲]. بتن متخلخل به علت تخلخل زیاد، جریان آب را از درون خود با نرخ بالا عبور می‌دهد و دارای مزایای زیست محیطی مانند کاهش روان آب سطحی در روزهای بارانی و شارژ دوباره سفره‌های آب زیرزمینی است. بنابراین بتن متخلخل مصالح دوستدار محیط زیست است و از کاربردهای آن می‌توان به استفاده در روسازیهای بتنی با حجم ترافیک کم، جاده‌ها، کوچه‌ها، پیاده‌روها، سطوح پارکینگ روباز، گذرگاههای کم آب، زمین‌های تنیس، به عنوان زیراساس برای روسازیهای بتنی متداول، پاسیوها، صخره‌های مصنوعی، پایدار سازی شیبها، آستر سازی چاه، شبکه‌درختان در پیاده‌روها، فونداسیون/ کفها برای گلخانه‌ها، محل تخم ریزی ماهیها، مراکز تفریحی آبی، باغ وحشها، سازه‌های هیدرولیکی، عرشه‌های استخر شنا، زهکشهای لبه پیاده‌روها، دیواره‌های دریایی، موانع صوتی و دیوارها (از جمله دیوارهای باربر) می‌توان اشاره کرد [۳]. لیکا یک سبکدانه مصنوعی صنعتی است [۴] که استفاده از آن در ساخت بتن به علت مقاومت بالاتر نسبت به سایر سبکدانه‌ها، رایج می‌باشد [۵]. لیکا عایق صوت و حرارت است [۶] و استفاده از آن در ساخت بتن متخلخل منجر به دستیابی به هر دو مزیت بتن سبک و بتن متخلخل خواهد شد [۷]. پژوهشهای انجام شده در مورد بتن‌های متخلخل سبک نسبت به پژوهشهای انجام‌شده در مورد بتن‌های متخلخل با سنگدانه طبیعی بسیار کم می‌باشد. [۸] Zaetang et al در پژوهشی از سبکدانه‌های درشت دیاتومیت، پومیس و بتن هوادار اتوکلاو بازیافتی برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند و ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب نفوذ پذیری آب، ضریب هدایت حرارتی)، مکانیکی (مقاومت فشاری و مقاومت کششی شکافت) و دوام (مقاومت سایشی سطح) را مورد بررسی قرار دادند. Chindapasirt et al [۹] از سبکدانه‌های بازیافتی بدست آمده از بلوک بتن اتوکلاو برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند. آنها در تحقیقشان اثرات افزودن ماسه ریزدانه و خاکستر بادی با کلسیم بالا را بر روی ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب نفوذ پذیری آب، ضریب هدایت حرارتی)، مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی شکافت) و دوام (مقاومت سایشی سطح) بتن متخلخل سبک آزمایش کردند. [۱۰] Khankhaje et al بتن متخلخل سبک حاوی پوکه ناشی از روغن‌گیری هسته خرما^۱ (OPKS) را ساختند. آنها در پژوهششان از جایگزینی سنگ آهک درشت‌دانه با (OPKS) استفاده کردند و ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک و تر، تخلخل خشک و تر، ضریب

نفوذ پذیری آب)، مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت) را مورد بررسی قرار دادند. [۱۱] Öznur Öz در تحقیقی، از سبکدانه پومیس اسیدی به عنوان درشت‌دانه در ساخت بتن متخلخل استفاده کرد. او در پژوهشش با جایگزین کردن به ترتیب ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ حجم سنگ آهک طبیعی به صورت درشت‌دانه در اندازه ۱۰ تا ۱۲ میلیمتر با همان اندازه سبکدانه پومیس اسیدی، ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب نفوذ پذیری آب)، مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی) و دوام (مقاومت سایشی سطح) بتن متخلخل سبک را مورد ارزیابی قرار داد. [۱۲] Liu et al از ساق‌برگهای گیاه وحشی *Sterculia foetida* که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری یافت می‌شود، برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده کردند. آنها ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب نفوذ پذیری آب)، مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی) بتن متخلخل سبک را مورد آزمایش قرار دادند. [۱۳] Kaplan et al برای ساخت بتن متخلخل سبک، از درشت‌دانه‌های بازیافتی بدست آمده از بتن‌های ضایعاتی سازه‌های قدیمی استفاده کردند. در پژوهش آنها ویژگیهای فیزیکی (چگالی خشک و تر، تخلخل کل، نرخ نفوذ پذیری آب)، مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت) و دوام (مقاومت سایشی سطح) را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پژوهششان را گزارش کردند. در این پژوهش از لیکای سازه‌ای برای ساخت بتن متخلخل سبک استفاده شده است و با ثابت نگه داشتن وزن حجمی لیکای درشت‌دانه و نسبت آب به سیمان، با کاهش مقدار وزن حجمی سیمان در مخلوط، نسبت A/C (نسبت سبکدانه به سیمان) افزایش یافت که منجر به افزایش درصد تخلخل کل شد. حداقل و حداکثر نسبت A/C طوری انتخاب شد که مقدار درصد تخلخل کل در سن ۲۸ روز در بازه توصیه شده ACI 522 [۲] قرار داشته باشد، 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 درصد تخلخل کل، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی ویژه و درصد جذب آب بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفت و میانگین نتایج ۳ نمونه گزارش شد.

۲- مصالح و آماده سازی نمونه‌ها

۲-۱- مصالح

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ ۲ ساخت کارخانه هگمتان همدان با چگالی ویژه ۳/۱۵ و نرمی بلین $2910 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ، آب آشامیدنی شهر رشت و لیکای سازه‌ای به صورت درشت‌دانه در اندازه ذرات ۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر با حداکثر اندازه ۹/۵ میلیمتر، ساخت کارخانه لیکای ساوه استفاده شده است. لیکا به علت دارا بودن ساختارمنفذی پیوسته و متخلخل،

¹. oil palm kernel shell

در حالت SSD، چگالی ویژه ۱/۳۵ و جذب آب ۲۴ ساعته، ۹/۴۸٪ و بر اساس استاندارد ASTM C29/C29-16 [۱۴]، چگالی خشک میله نخورده 637 kg/m^3 ، برای لیکا محاسبه شد. در جدول (۱) مشخصات شیمیایی سیمان و لیکای به کار برده شده در این پژوهش آورده شده است.

جذب آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های با وزن نرمال دارد، بنابراین به منظور حفظ نسبت آب به سیمان نسبت اختلاط و جلوگیری از جذب آب توسط سبک‌دانه‌ها، قبل از مخلوط شدن، سبک‌دانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) آماده شده بودند. مطابق آزمایش‌های انجام شده بر اساس استاندارد ASTM C127-15 [۱۳]

جدول ۱ - درصد ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ (۲) و لیکا

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

درشت‌دانه 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 [Khankhaje et al ۱۰]، 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 عمل‌آوری، پس از خروج از قالب در حوضچه آب با شرایط اشباع در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد تا سن آزمایش نگهداری شدند. شکل (۱) نمونه‌های بتن متخلخل سبک را پس از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه برای انجام آزمایشات در این پژوهش نشان می‌دهد.

۲-۲ - نسبت‌های اختلاط

به منظور بررسی اثرات مقادیر مختلف نسبت‌های A/C بر روی درصد تخلخل کل، مقاومت الکتریکی ویژه، مقاومت فشاری، درصد جذب آب بتن متخلخل سبک، مخلوطها با شش مقدار مختلف نسبت A/C شامل ۳، ۲/۷، ۲/۴، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۵ ساخته شدند. در هر شش مخلوط، نسبت آب به سیمان برای دستیابی به حداکثر نرخ نفوذپذیری و مقاومت فشاری [۱۵] برابر مقدار ثابت ۰/۳ و لیکا برابر با 750 kg/m^3 در حالت SSD در نظر گرفته شدند. نسبت‌های اختلاط در جدول (۲) خلاصه شده اند. اسامی بتن‌ها از نوع سبک دانه و مقدار نسبت A/C گرفته شده اند. به عنوان مثال، L-۱/۵ 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 شد.

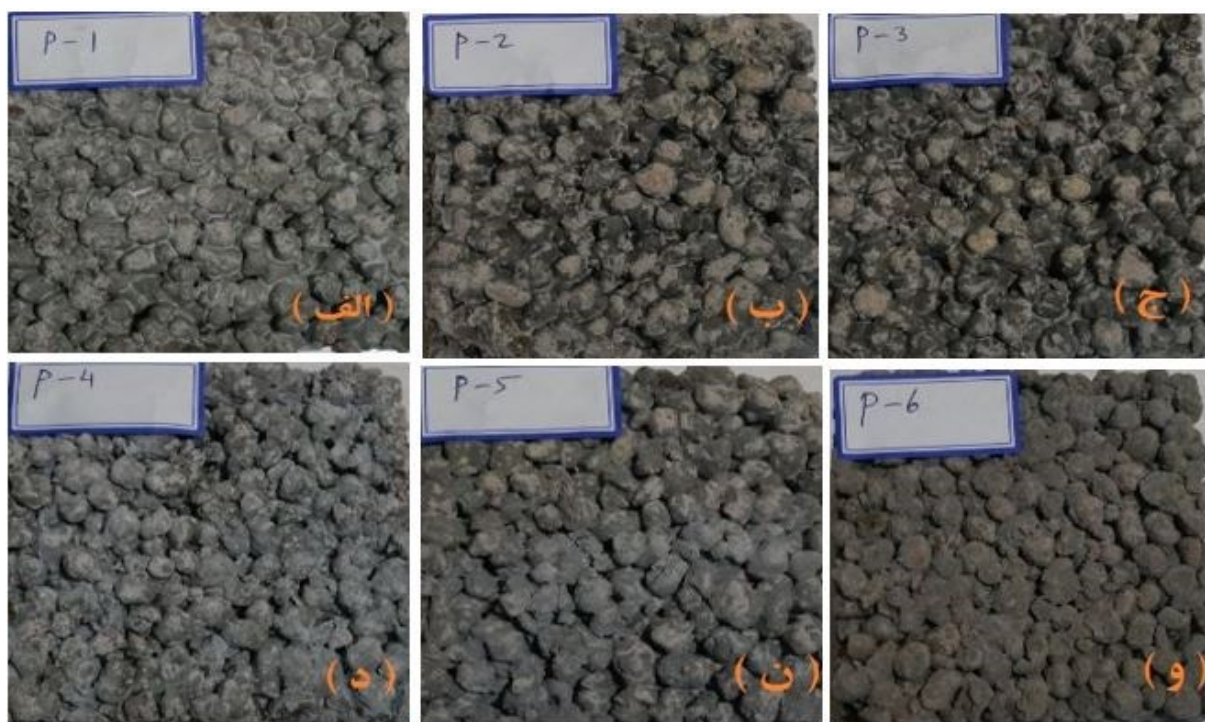
۲-۳ - آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از قالب مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای ساخت و قالب‌گیری نمونه‌ها طبق جدول (۲)، تحت شرایط آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM C192/C192M-15 [۱۶] استفاده شد. جهت ساخت مخلوط تازه، اجزای مخلوط خشک شامل سیمان و لیکا به صورت

2. Saturated surface dry

جدول ۲ - نسبت‌های اختلاط بتن‌های متخلخل سبک (kg/m^3)

A/C	W/C	سیمان	لیکا	مخلوط
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

شکل ۱ - نمای ظاهری فوقانی نمونه‌های بتن متخلخل سبک ساخته شده با لیکا (الف) $A/C=1/5$ ، (ب) $A/C=1/8$ ، (ج) $A/C=2/1$ ، (د) $A/C=2/4$

(ن) $A/C=2/7$ ، (و) $A/C=3$

۳- روشهای آزمایش

۳-۱- تخلخل کل

درصد تخلخل کل بتن متخلخل سبک سخت شده که شامل تخلخل باز و بسته است، برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد ASTM C 1754 [۱۷] محاسبه شد. ابتدا با اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها، حجم شان (V) تعیین شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه ور شدند تا به حالت اشباع درآیند. سپس وزن غوطه‌وری (W₁) توسط ترازوی ارشمیدس قرائت شد. در انتها وزن خشک نمونه‌ها (W₂) پس از قرارگیری در داخل اون به مدت حداقل ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. درصد تخلخل کل نمونه‌ها طبق رابطه (۱) تعیین شد:

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

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

۳-۲- مقاومت الکتریکی ویژه

از روش به کار گرفته شده در پژوهشهای Neithalath and weiss [۱۸] و Neithalath and Sumanasooriya [۱۹] در این تحقیق برای آماده‌سازی نمونه بتن متخلخل در آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری صحیح مقاومت الکتریکی ویژه بتن متخلخل، ابتدا نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز از حوضچه‌های عمل‌آوری بیرون آورده و نمونه‌ها به صورت اشباع با سطح خشک برای آزمایش آماده شدند. سپس برای نگهداری الکترولیت، دورتا دور نمونه‌های مکعبی با غشاء لاتکسی محصور شد. به منظور اطمینان از اتصال نمونه با الکترود، در انتهای نمونه، فوم متخلخل و سپس الکترود آلومینیومی قرارداده شد و برای جلوگیری از نشت الکترولیت از کف نمونه، دور تا دور نمونه با چسب سیلیکونی آب‌بند شد. محلول کلرید سدیم با غلظت ۳ درصد از قسمت فوقانی نمونه در داخل نمونه تا پر شدن آن ریخته شد. سپس همانند کف نمونه، در بالای نمونه نیز فوم متخلخل و الکترود آلومینیومی قرار داده شد (شکل ۲). در این پژوهش صفحات آلومینیومی به عنوان الکترود توسط

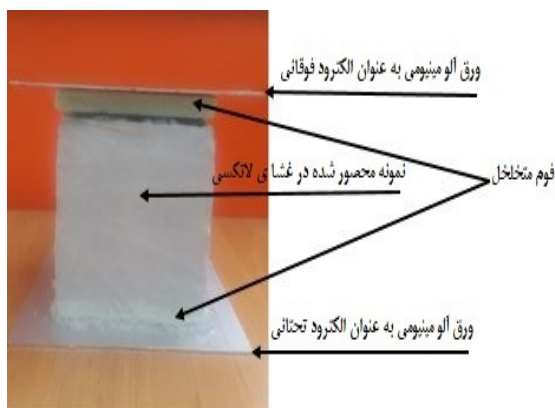
دوشاخه سوسماری به مولد اتصال پیدا کردند و با اعمال ولتاژ ۶ ولت به دو الکترود، جریان عبوری از نمونه اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه (۲)، مقاومت الکتریکی ویژه هر نمونه اندازه‌گیری شد. مقدار میانگین سه نمونه به عنوان مقاومت الکتریکی ویژه گزارش شده است.

$$\rho = \frac{V A}{I L} \quad (2)$$

که در آن V ولتاژ برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر، A مساحت بالا و پایین نمونه برحسب متر مربع، L طول نمونه برحسب متر، ρ مقاومت الکتریکی ویژه برحسب اهم متر می‌باشد.

۳-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن متخلخل سبک سخت شده بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد BS EN 12390-3 [۲۰] انجام گرفت. نمونه‌ها در سن ۲۸ روز از حوضچه آب خارج و سپس با پارچه خشک و آماده آزمایش شدند. پس از قرارگیری

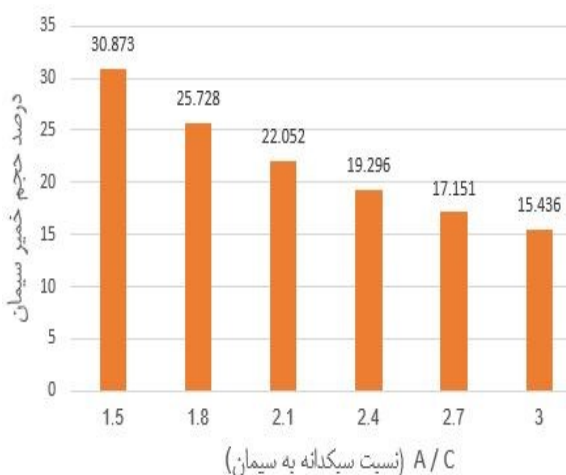


شکل ۲- آماده‌سازی نمونه بتن متخلخل سبک برای آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه

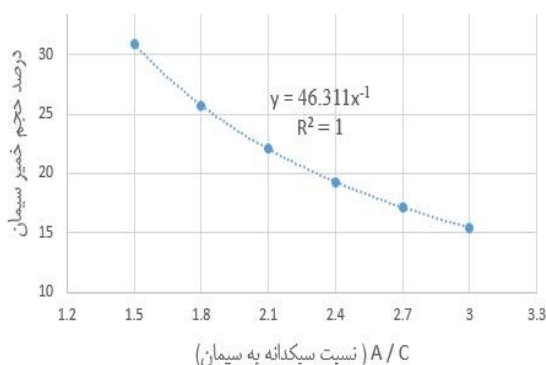
نمونه در داخل دستگاه جک بتن شکن، نرخ بار اعمالی روی ۰/۲ مگا پاسگال بر ثانیه تنظیم شد و پس از شکست نمونه با تقسیم حداکثر نیروی وارده برحسب نیوتن، بر سطح نمونه بر حسب میلی‌متر مربع،

و مخلوط ۳-۱ به علت داشتن کمترین درصد حجمی خمیر سیمان (۱۵/۴۳۶٪)، بیشترین افزایش تخلخل کل (۱۶/۴۴٪) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد.

شکل، اندازه، ویژگیهای 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 [۲۲]. در پژوهشهای Zaetang et al (۱۵/۵٪ تا ۳۱/۸٪) [۸]، Chindaprasirt et al (۱۴/۸٪ تا ۲۳/۷٪) [۹]، Khankhaje et al (۱۹٪ تا ۲۹٪)



شکل ۳- حجم خمیر سیمان در مقابل نسبت A/C



شکل ۴- رابطه حجم خمیر سیمان و نسبت A/C

شکل ۴- رابطه حجم خمیر سیمان و نسبت A/C (۱۰) از قالبهای استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای محاسبه تخلخل کل استفاده شده است که در این نوع قالبها دستیابی به تخلخل هدف نسبت به قالبهای منشوری سخت تر است و معمولاً درصد

مقاومت فشاری برحسب مگا پاسگال به دست آمد. نتیجه گزارش شده، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه است.

۳-۴- جذب آب

درصد جذب آب بتن متخلخل سبک سخت شده بر مبنای روش ارائه شده در استاندارد ASTM C 642-13 [۲۱] تعیین شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ 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 خشک نمونه‌ها (W_{dry}) اندازه گیری شد. نمونه‌ها به مدت حداقل ۴۸ ساعت در داخل آب مستغرق، سپس از آب خارج شدند و سطح خارجی آنها با پارچه خشک و وزن آنها (W_{wet}) تعیین شد. جذب آب بتن متخلخل سبک بر حسب درصد (A) از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$A = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad (3)$$

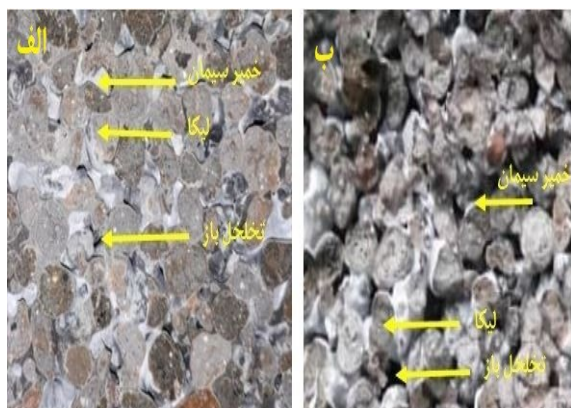
۴- تحلیل نتایج و بحث

۴-۱- تخلخل کل

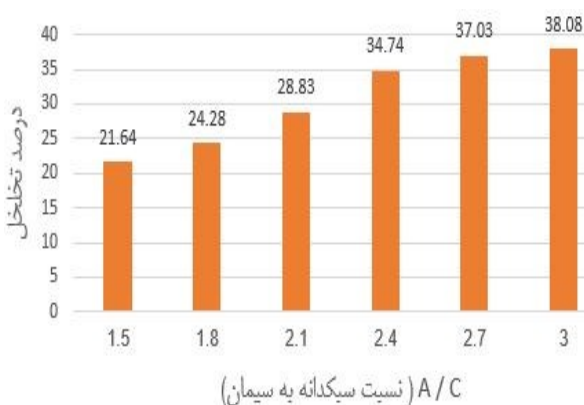
با افزایش نسبت A/C، از ۱/۵ تا ۳ همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، حجم خمیر سیمان در نمونه‌ها از ۳۰/۸۷۳٪ به ۱۵/۴۳۶٪ کاهش یافت. به علت ثابت بودن وزن حجمی لیکا و نسبت آب به سیمان در نسبتهای اختلاط، همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، رابطه دقیقی به شکل تابع هموگرافیک بین درصد حجم خمیر سیمان و نسبت A/C وجود دارد. معادله (۴) رابطه بین درصد حجم خمیر سیمان (V_p) و نسبت A/C را بیان می‌کند:

$$V_p = 46.311 \left(\frac{A}{C}\right)^{-1} \quad (4)$$

کاهش حجم خمیر سیمان در نمونه‌ها منجر به افزایش اندازه حفرات باز در سطح (شکل ۱) و داخل نمونه‌ها (شکل ۵) شد و در نتیجه درصد تخلخل کل در نمونه‌ها افزایش یافت. در شکل (۶) میانگین نتایج درصد تخلخل کل نمونه‌های بتن متخلخل سبک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حداقل و حداکثر درصد تخلخل کل به ترتیب در مخلوطهای L-۱/۵ (۲۱٪/۶۴) و L-۳ (۳۸٪/۰۸) ثبت شدند



شکل ۵ - مقایسه تخلخل باز و مقدار خمیر سیمان در مقطع عرضی بتن متخلخل سبک (الف) : $A/C = 1/5$ (ب) : $A/C = 3$



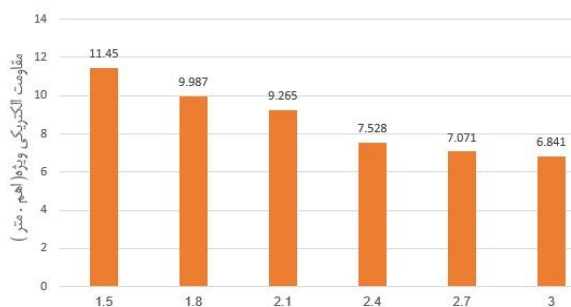
شکل ۶ - میانگین درصد تخلخل کل در مقابل A/C

در شکل (۷) نمودار رابطه قوایی بین درصد تخلخل کل و نسبت A/C ارائه شده است. معادله تجربی رابطه بین درصد تخلخل کل (P) و نسبت A/C می تواند طبق معادله (۵) بیان شود :

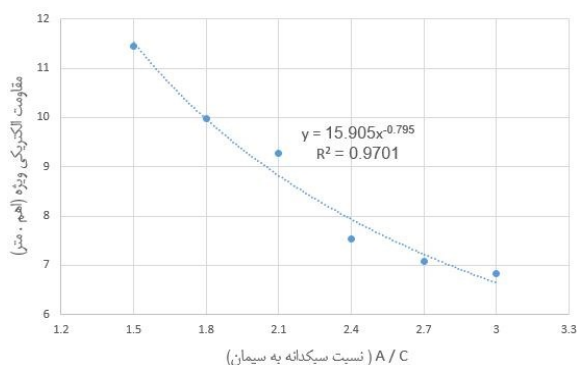
تخلخل کمتری نسبت به قالبهای منشوری با شرایط مشابه بدست می دهند [۲۲]. در پژوهش Liu et al (۱۶/۲٪ تا ۲۸/۵٪) [۷] با وجود استفاده از قالبهای استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای محاسبه تخلخل کل، به علت بالاتر بودن قابل ملاحظه تخلخل ساق- برگهای گیاه وحشی *Sterculia foetida* نسبت به لیکا، درصد تخلخل کل بتن‌های متخلخل پژوهش Liu et al [۷] نسبت به درصد تخلخل کل بتن‌های متخلخل این مطالعه بالاتر بودند. در پژوهش (۱۶/۲٪ تا ۲۸/۵٪) [۱۱] Öznur Öz، از قالبهای مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر برای محاسبه درصد تخلخل کل استفاده شده است و به علت اینکه ترکیبی از سنگدانه آهکی با حداکثر ۵۰٪ سبکدانه پومیس اسیدی در ساخت بتن متخلخل استفاده شده بود، درصد تخلخل کل در پژوهش Öznur Öz [۱۱]، نسبت به درصد تخلخل کل در این پژوهش کمتر بود. در پژوهش (۵۹٪ تا ۶۳٪) [۱۲] Kaplan et al، با وجود اینکه همانند این پژوهش از قالبهای مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای محاسبه تخلخل کل استفاده شده است، ولی به علت درصد تخلخل فوق العاده بالای سنگدانه‌های بازیافتی بدست آمده از بتن‌های ضایعاتی سازه‌های قدیمی نسبت به درصد تخلخل لیکا، درصد تخلخل کل پژوهش Kaplan et al [۱۲] نسبت به این پژوهش بسیار بالاتر بود.

با افزایش نسبت A/C ، مقاومت الکتریکی ویژه کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقاومت الکتریکی ویژه به ترتیب در مخلوطهای ۳-۱ و $6/841 \Omega.m$ و $11/45 \Omega.m$ ثبت شدند.

بتن‌های متخلخل سبک در این پژوهش به علت دارا بودن درصد تخلخل کل بالاتر نسبت به بتن‌های معمولی، مقاومت الکتریکی ویژه آنها نسبت به بتن‌های معمولی، ۱۰ تا ۲۰ برابر کمتر است. توجه به این نکته ضروری است برای نسبت آب به سیمان ثابت و همچنین وزن حجمی ثابت سبکدانه لیکا در این پژوهش، کاهش مقدار سیمان منجر به کاهش مقدار خمیر سیمان و در نتیجه کاهش مقدار کنترولیت می‌شود. در نتیجه منافذ موجود (تخلخل بسته و مویبندی) در خمیر سیمان کاهش می‌یابد و مقاومت الکتریکی ویژه در خمیر سیمان افزایش می‌یابد.

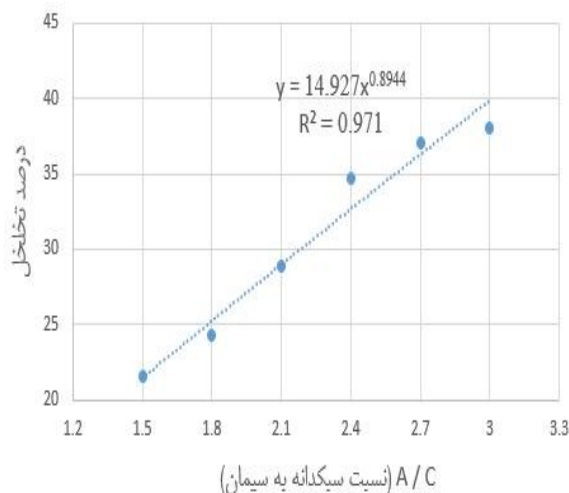


شکل ۸ - میانگین نتایج مقاومت الکتریکی ویژه در مقابل A/C



شکل ۹ - رابطه میانگین مقاومت الکتریکی ویژه با نسبت A/C

$$p = 14.927 \left(\frac{A}{C}\right)^{0.8944} \quad R^2 = 0.971 \quad (5)$$



شکل ۷ - رابطه میانگین درصد تخلخل کل با نسبت A/C

۴-۲- مقاومت الکتریکی ویژه

میزان نفوذ یون کلر در داخل بتن‌های معمولی، معمولاً توسط آزمایش سریع و غیر مخرب مقاومت الکتریکی ویژه بتن سنجیده می‌شود. به علت آنکه همواره در داخل بتن مقداری تخلخل (منافذ موجود در خمیر سیمان و سنگدانه) وجود دارد، آب موجود در این منافذ باعث می‌شود که بتن نقش کنترولیت را ایفا کند و یونهای کلر در داخل بتن انتقال یابند که موجب خوردگی میلگردهای در داخل بتن و کاهش دوام سازه-های بتنی می‌شود. بتن‌های متخلخل به علت اینکه دارای منافذ باز سرتاسری می‌باشند، نفوذ یون کلر به راحتی در داخل بتن متخلخل انجام می‌شود، بنابراین در داخل بتن متخلخل میلگرد قرار داده نمی‌شود و موضوع خوردگی میلگرد و دوام بتن متخلخل منتفی است. آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه (یا هدایت الکتریکی) در بتن‌های متخلخل برای ارزیابی تخلخل حجمی، منافذ باز و پیوسته به منظور پیش بینی عملکرد هیدرولیکی (نفوذپذیری آب) بتن متخلخل انجام می‌شود [۱۸، ۱۹]. با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳ طبق تحلیل بخش ۱-۴، درصد تخلخل کل افزایش یافت در نتیجه انتظار کاهش مقاومت الکتریکی ویژه در بتن‌های متخلخل منطقی است. در شکل (۸) همانطور که دیده می‌شود

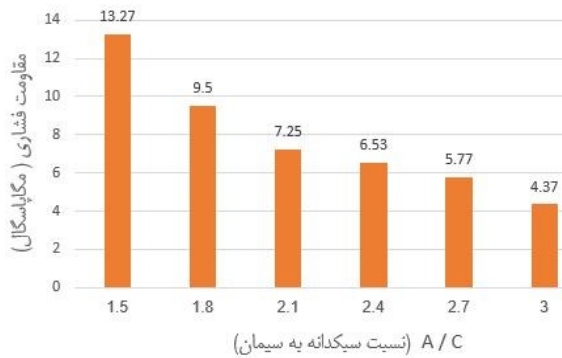
(۶)

$$R^2 = 0.9701 \quad \rho = 15.905 \left(\frac{A}{C}\right)^{-0.795}$$

$$\rho = 21.547(e)^{-0.03P} \quad R^2 = 0.9889 \quad (۷)$$

۴-۳- مقاومت فشاری

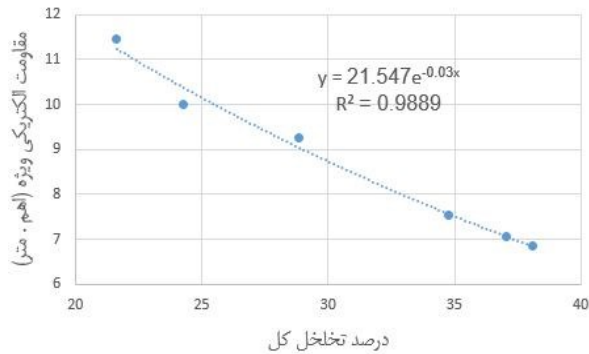
در بتن‌های سبک، برخلاف بتن‌های معمولی (بتن با سنگدانه طبیعی)، ضعیف‌ترین فاز به جای ناحیه انتقال بین سطحی، سبکدانه می‌باشد. به عبارت دیگر، ویژگی‌های سبکدانه، نقش اصلی را در مقاومت بتن‌های سبک ایفا می‌کنند [۲۳]. در بتن‌های متخلخل سبک، به علت وجود منافذ باز سرتاسری در داخل بتن (تخلخل باز)



شکل ۱۱- میانگین نتایج مقاومت فشاری در مقابل A/C

و درصد تخلخل کل بالاتر نسبت به بتن‌های سبک و مقاومت پایین تر سبکدانه نسبت به خمیر سیمان، همانند بتن سبک، ضعیف‌ترین فاز، سبکدانه می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود وقتی که بتن متخلخل سبک تحت بار محوری فشاری قرار بگیرد، از روی سبکدانه گسیخته شود.

همانطور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بتن‌های متخلخل سبک کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقاومت فشاری به ترتیب در مخلوط‌های L-۳ (۴/۳۷ MPa) و L-۱/۵ (۱۳/۲۷ MPa) ثبت شدند و مخلوط L-۳، بیشترین کاهش مقاومت فشاری (۶۷/۰۷٪ کاهش) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد. کاهش شدید مقاومت فشاری در بتن‌های متخلخل



شکل ۱۰- رابطه میانگین مقاومت الکتریکی ویژه با درصد تخلخل کل

اما درصد تخلخل کل مجموع درصد تخلخل بسته و باز می‌باشد. با کاهش مقدار خمیر سیمان در مخلوطها، تخلخل باز افزایش می‌یابد و چون رشد درصد تخلخل باز بیشتر از کاهش درصد تخلخل بسته است، در نهایت درصد تخلخل کل و در نتیجه مقاومت الکتریکی ویژه کاهش می‌یابد. مخلوط L-۳ به علت دارا بودن بالاترین درصد تخلخل کل بیشترین کاهش مقاومت الکتریکی ویژه را نسبت به نمونه شاهد (۴۰/۲۵٪) ثبت کرد. کاهش مقاومت الکتریکی ویژه بیانگر افزایش نفوذپذیری آب در بتن‌های متخلخل سبک در این پژوهش می‌باشد.

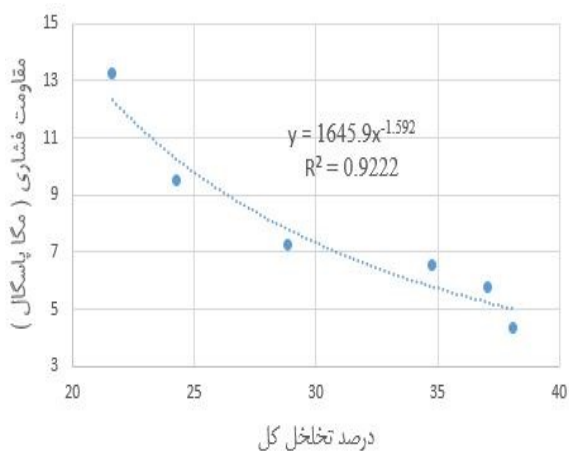
در شکل (۹) نمودار رابطه قوایی بین مقاومت الکتریکی ویژه با نسبت A/C برای بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9701$) (بالاست که نشان دهنده دقت بالای رابطه همبستگی قوایی و همچنین قابلیت اعتماد نتایج تجربی در این آزمایش می‌باشد. معادله تجربی رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه (ρ) برحسب $\Omega.m$ و نسبت A/C برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۶) بیان شود. همچنین در شکل (۱۰) نمودار رابطه نمایی بین مقاومت الکتریکی ویژه با درصد تخلخل کل به نمایش درآمده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9889$) بالاتر از ضریب همبستگی معادله (۶) می‌باشد که نشان دهنده تاثیر بیشتر درصد تخلخل کل نسبت به پارامتر نسبت A/C بر روی مقاومت الکتریکی ویژه می‌باشد. معادله تجربی رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه (ρ) برحسب $\Omega.m$ و درصد تخلخل کل بتن‌های متخلخل (P) سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند طبق معادله (۷) بیان شود.

3. Interfacial transition zone

سیک، به علت کاهش حجم خمیر سیمان از ۳۰/۸۷۳٪ به ۱۵/۴۳۶٪ می‌باشد که منجر به کاهش ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ و افزایش تخلخل باز (افزایش درصد تخلخل کل) و ضعیف شدن اتصال بین لیکاهای درشت دانه شد (شکل ۵). توجه به این نکته ضروری است که به علت کاهش شدید ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ در مخلوطهای L-۲/۷ و L-۳، هنگامیکه نمونه تحت بار فشاری قرار گرفت، در بخشهایی به علت اینکه اتصال لیکاها به یکدیگر ضعیف بود، لیکاها از یکدیگر جدا شدند هرچند در بخشهای دیگر شکست نمونه، مسیر شکست تحت بار فشاری از روی لیکا عبور کرد. طبق ACI 213 [۴] 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. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب نمودارهای رابطه قوایی بین مقاومت فشاری با نسبت A/C با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9799$) و درصد تخلخل کل با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9222$) برای بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. معادله تجربی رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (F_c) بر حسب (Mpa) با نسبتهای A/C و درصد تخلخل کل (P) برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه‌ای می‌تواند به ترتیب با معادلات ۸ و ۹ بیان شود:

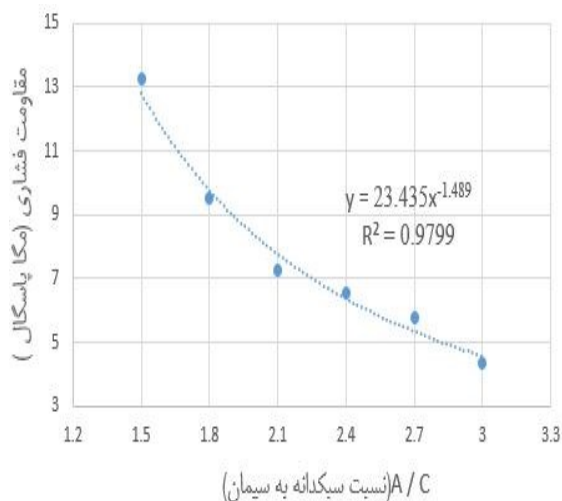
$$F_c = 23.435\left(\frac{A}{C}\right)^{-1.489} \quad R^2 = 0.9799 \quad (8)$$

$$F_c = 1645.9(P)^{-1.592} \quad R^2 = 0.9222 \quad (9)$$



شکل ۱۳- رابطه میانگین مقاومت فشاری با درصد تخلخل کل

در پژوهش Kaplan et al [۱۲]، مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در بازه ۱/۳۶ MPa تا ۱/۳۶ MPa ۲/۰۸ گزارش شده است در حالیکه درصد تخلخل کل برای کمترین و بیشترین مقاومت فشاری به ترتیب برابر با ۶۳٪ و ۵۹٪ بود. درصد تخلخل کل یک عامل مهم در تعیین مقاومت بتن‌های متخلخل می‌باشد [۲۴] و علت پایین‌تر بودن مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک پژوهش Kaplan et al [۱۲]، نسبت به مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش، بالاتر بودن درصد تخلخل کل آنها نسبت به این پژوهش می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که حتی دست یافتن به تخلخل کل ۵۹٪ در بتن‌های متخلخل این پژوهش امکان پذیر نبود زیرا به علت مقدار کم خمیر سیمان، اتصال لیکاها به یکدیگر به حدی ضعیف بود که با کمترین نیروی فشاری از یکدیگر جدا می‌شدند. بنابراین از معادله (۹) نمی‌توان، برای درصد تخلخل‌های ۵۹٪ و ۶۳٪، مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش را برای مقایسه با



شکل ۱۲- رابطه میانگین مقاومت فشاری با نسبت A/C

خرما (POC) به ترتیب ۹/۵۱ MPa و ۳/۴۳ MPa گزارش شده است. به علت عدم انجام آزمایش تخلخل کل، برای مقایسه مقاومت فشاری

دو پژوهش به ناچار باید از نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ استفاده کنیم. نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ برای

مقاومت‌های فشاری ۹/۵۱ MPa و ۳/۴۳ MPa به ترتیب برابر با ۲/۸۵ و ۲/۵۵۶ می‌باشد. در این مطالعه برای نسبت‌های ۲/۸۵ و ۲/۵۵۶ به ترتیب

مقاومت فشاری تقریباً برابر با ۶/۵۳ MPa و ۷/۲۵ MPa پیش بینی می‌شود. کاهش ۴۵/۶۳٪ و افزایش ۶۱/۶۲٪ مقاومت فشاری این پژوهش

نسبت به پژوهش [۲۵] Ibrahim et al، به ترتیب به علت مقاومت بالاتر درشت دانه گرانیات و مقاومت پایین‌تر POC نسبت به لیکا می‌باشد. در

پژوهش [۲۶] Malaiskiene et al، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های متخلخل ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی برای نمونه‌های مکعبی به

ابعاد ۱۰۰

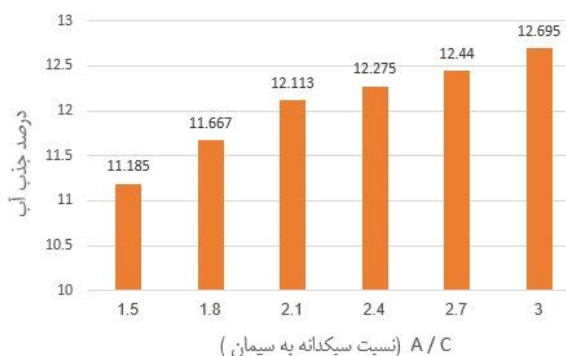
میلیمتر، در بازه ۲/۵ MPa تا ۱۰ MPa و تخلخل کل در بازه ۲۰٪

تا ۲۷٪ گزارش شده است. در این پژوهش طبق معادله (۹) به ازای تخلخل کل ۲۰٪ و ۲۷٪ به ترتیب مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۱۳/۹۷ MPa و ۸/۶۶ MPa پیش بینی می‌شود. همانطور که دیده می‌شود

مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در تخلخل‌های ۲۰٪ و ۲۷٪ به ترتیب ۳۹/۷٪ و ۲۴۶/۴٪ بالاتر از مقاومت فشاری بتن‌های

متخلخل پژوهش [۲۶] Malaiskiene et al، می‌باشند. در مطالعه حاضر، مقدار خمیر سیمان در تخلخل‌های ۲۰٪ و ۲۷٪ به ترتیب بیشتر از

۳۱٪ و ۲۲٪ در حالیکه در پژوهش [۲۶] Malaiskiene et al، به ترتیب برابر ۲۱/۲٪ و ۱۸/۹۱٪ می‌باشد. بنابراین قابل انتظار است در



شکل ۱۴ - میانگین نتایج درصد جذب آب در مقابل A/C

مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک پژوهش Kaplan et al [۱۲]،

پیش بینی کرد. از طرفی به علت اینکه چگالی سنگدانه‌ها (سبکدانه‌ها) در دو پژوهش ممکن است متفاوت باشند (معمولاً اینگونه است)، استفاده

از نسبت A/C یکسان برای پیش بینی مقاومت فشاری (معادله ۸) نیز صحیح نمی‌باشد. در چنین مواردی باید از نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ (نسبت حجم

سنگدانه به حجم خمیر سیمان) یکسان برای پیش بینی و مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل با یکدیگر استفاده کرد. در بتن‌های متخلخل

ساخته شده از سبکدانه‌ها، هرچه

مقدار نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ کمتر باشد، انتظار می‌رود مقاومت فشاری

افزایش یابد. در پژوهش حاضر درصد حجمی لیکا ۵۵/۵۵٪ می‌باشد و با

افزایش نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ از ۱/۷۹۹ تا ۳/۵۹۹، مقاومت فشاری کاهش یافت.

در پژوهش Kaplan et al [۱۲]، کمترین و بیشترین مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به نسبت‌های $\frac{V_A}{V_P} = ۲/۴۹۲$ و $\frac{V_A}{V_P} = ۲/۴۴۹$ و حجم خمیر

سیمان بکار رفته در نمونه‌ها به ترتیب ۳۰/۶۲۳٪ و ۲۹/۷۲٪ بود. ملاحظه می‌شود در این پژوهش، بیشترین نسبت $\frac{V_A}{V_P}$ (۳/۵۹۹) با وجود بالاتر

بودن نسبت به پژوهش Kaplan et al [۱۲]، دارای مقاومت فشاری به ترتیب ۳/۲۱ و ۲/۱ برابر کمترین و بیشترین مقاومت فشاری پژوهش et

Kaplan al [۱۲]، می‌باشد. در حالیکه حجم خمیر سیمان در مخلوط ۳-۲

L در این پژوهش در حدود نصف خمیر سیمان در پژوهش Kaplan et al [۱۲]، بود. علت را می‌توان استفاده از حجم (حدود ۷۵٪) و تخلخل بالای

سبکدانه بدست آمده از بتن‌های ضایعاتی کم مقاومت با نسبت $\frac{W}{C}$ بالا

(۰/۷-۰/۸)، در ساخت بتن متخلخل سبک پژوهش Kaplan et al [۱۲] دانست. در پژوهش Ibrahim et al [۲۵]، مقاومت فشاری ۲۸ روزه عمل

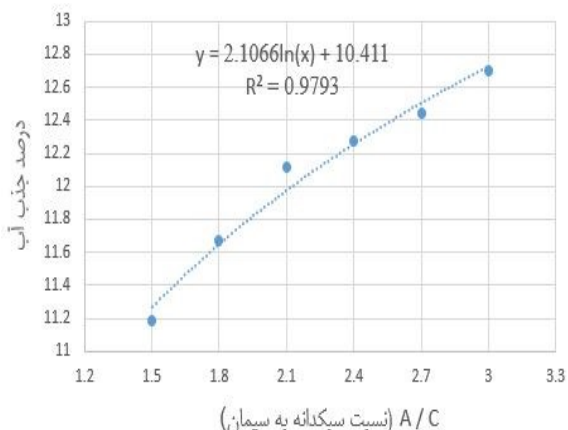
آوری شده در آب برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر، برای بتن‌های متخلخل ساخته شده با ۱۰٪ درشت دانه‌های گرانیاتی و ۱۰۰٪

درشت دانه‌های ضایعاتی بدست آمده از تفاله کوره ناشی از روغن گیری

استفاده قرار می‌گیرند [۲۷] به علت تخلخل بالایشان، به راحتی روان آب ناشی از سیلاب را با جذب و زهکشی، از میان خود عبور می‌دهند [۲۸].

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نمودارهای رابطه لگاریتمی

بین درصد جذب آب با نسبت A/C با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9799$)



شکل ۱۵- رابطه میانگین درصد جذب آب با نسبت A/C

(و درصد تخلخل کل با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.9485$) برای بتن های متخلخل سبک این پژوهش نشان داده شده است. معادله تجربی رابطه بین درصد جذب آب ۲۸ روزه (A) با نسبتهای A/C و درصد تخلخل کل (P) برای بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکای سازه ای می‌تواند به ترتیب با معادلات ۱۰ و ۱۱ بیان شود. نتایج حداقل و حداکثر جذب آب بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش در مقایسه با مقادیر مشابه آنها در بتن‌های متخلخل پژوهشهای Wu et al [۲۹] (۵

٪ - ۲/۸) به ترتیب ۸/۳۸۵٪ و ۷/۶۹۵٪ بالاتر، Malaiskiene et al [۲۶] (۴/۶٪ - ۲/۴٪) به ترتیب ۸/۷۸۵٪ و ۸/۰۹۵٪ بالاتر، et al [۲۸] Adamu (۵/۳۹۷٪ - ۴/۳۳۸٪) به ترتیب ۶/۸۴۷٪ و ۷/۲۹۸٪ بالاتر است. علت تفاوت درصد جذب آب انواع بتن‌های متخلخل را می‌توان به تفاوت بودن درصد جذب آب سنگدانه‌ها و همچنین مقدار درصد جذب آب خمیر سیمان در انواع پژوهشهای بتن متخلخل مربوط دانست. به عنوان مثال در پژوهش Malaiskiene et al [۲۶]، مقدار حداقل درصد جذب آب (۲/۴٪) مربوط به بتن متخلخل ساخته شده با سنگدانه طبیعی با نسبت $\frac{W}{C} = 0.3$ و سیمان 317 kg/m^3 (حجم خمیر سیمان ۱۹/۵۷۳٪) می‌باشد در حالیکه در این پژوهش با حجم

تخلخلهای ذکر شده، با وجود بالاتر بودن مقاومت گرانیب نسبت به لیکا، مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل سبک ساخته شده با لیکا، از مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل ساخته شده با گرانیب بالاتر باشند.

۴-۴ جذب آب

در شکل (۱۴) نتایج میانگین درصد جذب آب ۲۴ ساعت بتن‌های متخلخل سبک در سن ۲۸ روز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت A/C، روند درصد جذب آب در بتن‌های متخلخل سبک به صورت جزئی افزایشی بود و حداقل و حداکثر درصد جذب آب، به ترتیب در مخلوطهای $L-1/5$ (۱۱/۱۸۵٪) و $L-3$ (۱۲/۶۹۵٪) ثبت شدند. علت این روند را می‌توان به این صورت توضیح داد که با افزایش نسبت A/C از ۱/۵ تا ۳، همانند تحلیل بخش ۱-۴، حجم خمیر سیمان کاهش یافت که منجر به کاهش درصد تخلخل بسته (منافذ مویبندی در خمیر سیمان)، افزایش درصد تخلخل باز و درصد تخلخل کل در بتن متخلخل سبک گردید. با افزایش درصد تخلخل باز در داخل بتن متخلخل سبک، تعداد منافذ به هم پیوسته سه بعدی که با کانالهای باریک بایکدیگر در ارتباط بودند، افزایش یافت و هنگامیکه سطح بتن متخلخل سبک با پارچه خشک شد، این منافذ به هم پیوسته توانستند مقدار جزئی از آب را در داخل بتن متخلخل سبک حفظ کنند. با توجه به ثابت بودن وزن حجمی لیکا (۵۵/۵۵٪)، درصد جذب آب لیکا در همه مخلوطها ثابت بود و از طرفی درصد جذب آب خمیر سیمان نسبت به لیکا خیلی کمتر است، بنابراین افزایش درصد منافذ باز به هم پیوسته و نگهداری آب در درون آنها، باعث شد کاهش درصد جذب آب خمیر سیمان جبران شود.

به علت اینکه که اکثر افزایش درصد تخلخل کل نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد، مربوط به درصد تخلخل باز بود، هنگامیکه نمونه از حوضچه عمل آوری بیرون آورده شد، پس از مدت زمان کوتاهی آب از داخل منافذ باز خارج شد. به همین دلیل با وجود افزایش تخلخل کل ۱۶/۴۴٪ نسبت به نمونه شاهد، افزایش جذب آب فقط ۱/۵۱٪ برای مخلوط L-3

نسبت به نمونه شاهد ثبت شد. مقدار درصد جذب آب در بتن معمولی بیانگر دوام آن می‌باشد که به مقدار جذب آب سنگدانه و خمیر سیمان بستگی دارد و افزایش درصد جذب آب منجر به افت ویژگیهای مکانیکی بتن می‌شود. در بتن‌های متخلخل جذب آب توسط بتن (سنگدانه و خمیر سیمان) و عبور آب از داخل بتن انجام می‌گیرد از این رو هنگامیکه در سطح روسازی یا به عنوان مصالح اساس روسازی مورد

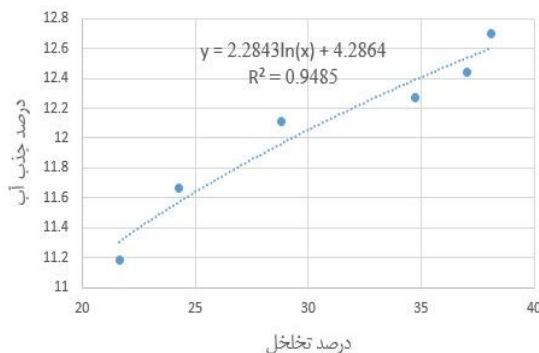
مخلوطهای L-۳ (۳۸/۰۸٪) و L-۱/۵ (۲۱/۶۴٪) ثبت شدند و مخلوط L-۳ بیشترین افزایش درصد تخلخل کل (۱۶/۴٪) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد.

۲- به علت افزایش درصد تخلخل کل، مقاومت الکتریکی ویژه در نمونه‌ها کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقاومت الکتریکی ویژه در مخلوطهای L-۳ (۶/۸۴۱ $\Omega.m$) و L-۱/۵ (۱۱/۴۵ $\Omega.m$) ثبت شدند و مخلوط L-۳ به علت دارا بودن بالاترین درصد تخلخل کل، بیشترین کاهش مقاومت الکتریکی ویژه را نسبت به نمونه شاهد (۴۰/۲۵٪) ثبت کرد. به علت اینکه در بتن متخلخل میلگرد کار گذاشته نمی‌شود، و مساله خوردگی میلگرد منتفی است، سنجش مقاومت الکتریکی ویژه، به منظور ارزیابی تخلخل (حجمی، منافذ باز و پیوسته) به منظور پیش بینی عملکرد هیدرولیکی (نفوذپذیری آب) بتن متخلخل انجام می‌شود [۱۸، ۱۹]. مقاومت الکتریکی ویژه بتن‌های متخلخل سبک در این پژوهش به علت دارا بودن درصد تخلخل کل بالاتر نسبت به بتن‌های معمولی، ۱۰ تا ۲۰ برابر نسبت به آنها کمتر است.

۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های متخلخل سبک از MPa ۱۳/۲۷ (مخلوط L-۱/۵) به MPa ۴/۳۷ (مخلوط L-۳) کاهش یافت و مخلوط L-۳ به علت کاهش ضخامت خمیر سیمان پوشاننده لیکا و ناحیه باندینگ، افزایش تخلخل باز و درصد تخلخل کل که منجر به ضعیف شدن اتصال بین لیکاهای درشت دانه شد، بیشترین کاهش مقاومت فشاری (۶۷/۰۷٪) را نسبت به نمونه شاهد ثبت کرد. طبق ACI 213 [۴] بتن‌های متخلخل سبک L-۲/۱، L-۲/۴، L-۲/۷، L-۳ در رده بتن‌های عایق و L-۱/۵، L-۱/۸ در رده بتن‌های نیمه سازه ای (پرکننده) طبقه بندی می‌شوند.

۴- درصد جذب آب ۲۴ ساعت بتن‌های متخلخل سبک در سن ۲۸ روز به علت افزایش درصد تخلخل کل، به صورت جزئی (۱/۵۱٪) افزایش یافت و حداقل و حداکثر درصد جذب آب، به ترتیب در مخلوطهای L-۱/۵ (۱۱/۱۸۵٪) و L-۳ (۱۲/۶۹۵٪) ثبت شدند. به علت تفاوت قابل ملاحظه درصد جذب آب لیکا نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، درصد جذب آب بتن‌های متخلخل سبک این پژوهش نسبت به پژوهشهای بتن متخلخل ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی (بانسبت آب به سیمان و حجم خمیر یکسان) بالاتر بود.

خمیرسیمان تقریباً یکسان (۱۹/۲۹۵٪)، درصد جذب آب بتن متخلخل سبک، ۱۲/۲۷۵٪ محاسبه شد. علت تفاوت زیاد درصد جذب آب، مربوط



شکل ۱۶- رابطه میانگین درصد جذب آب با درصد تخلخل کل

به تفاوت قابل ملاحظه درصد جذب آب سنگدانه‌های مورد استفاده (در این مطالعه لیکا ۹/۴۸٪ و سنگدانه طبیعی ۰/۵۹٪) در بتن متخلخل دو پژوهش می‌باشد.

$$A = 2.1066 \ln\left(\frac{A}{C}\right) + 10.411 \quad R^2 = 0.9793 \quad (10)$$

$$A = 2.1066 \ln(P) + 10.411 \quad R^2 = 0.9485 \quad (11)$$

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 بتن متخلخل سبک (درصد تخلخل کل، مقاومت الکتریکی ویژه، مقاومت فشاری، درصد جذب آب) 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- به علت ثابت بودن وزن حجمی لیکا و نسبت آب به سیمان در مخلوطها، حجم خمیر سیمان در نمونه‌ها از ۳۰/۸۷۳٪ به ۱۵/۴۳۶٪ کاهش یافت که منجر به افزایش تخلخل باز و درصد تخلخل کل در نمونه‌ها شد. کمترین و بیشترین درصد تخلخل کل به ترتیب در

pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016 ; 126 :151- 160.

[11] ÖZnure Öz, H. Properties of pervious concrete partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate. *Construction and Building Materials* . 2018 ; 166 : 601- 609.

[12] Kaplan, G, Gulcan, A, Cagdas, B., Bayraktar, O.y. The impact of recycled coarse aggregates obtained from waste concretes on lightweight pervious concrete properties. *Environmental science and Pollution Research*. 2021 ; 28:17369- 17394.

[13] American society for Testing and Materials, ASTM C127-15. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. 2015.

[14] American society for Testing and Materials, ASTM C29/C29-16. *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. 2016.

[15] Zhang, J, Huang, Y, Ma, G, sun, J, Nener, B. A metaheuristic-optimized multi-output model for predicting multiple properties of pervious concrete. *Construction and Building material*. 2020 ; 249:20 July,118803.

[16] American society for Testing and Materials, ASTM C192/C192M-15. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. 2015.

[17] American society for Testing and Materials, ASTM C1754/C1754M-12. *Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete*. 2012.

[18] Neithalath N, Weiss J, Olek J. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic

[1] Nguyen, D.H, Boutouil, M, Sebaibi, N, Leleyter, L, Baraud, F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials*. 2013 ; 49 :151-160.

[2] American Concrete Institute, ACI Committee 522. *Pervious concrete*. Detroit. 2010.

[3] Tennis, P, Leming, M.L, Akers, D.J. *Pervious concrete pavements* , Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association , Skokie , IL and Silver Springer , MD, 2004 ; 1- 5.

[4] American Concrete Institute, ACI Committee 213R. *Guid for structrul lightweight-aggregate concrete*. Farmington Hills,MI. 2003.

[5] Madadi, A, Naddaf, H.E, Shadnia, R, Zhang, L. Characterization of ferrocement slab panels containing lightweight expanded clay aggregate using digital image correlation technique. *Construction and Building Materials*. 2018 ; 180 : 464-476.

[6] Rashad, A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material-An overview. *Construction and Building Materials*. 2018;170 : 757- 775.

[7] Liu, R, Xiao, H, Pang, S.D, Geng, J, Yang, H. Application of sterculia foetida petiole wastes in lightweight pervious concrete. *Journal of cleaner production*. 2020; 246: 10February,118972.

[8] Zaetang, Y, Wongsas, A, Sata, V, Chindapasirt, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 2013; 48: 585-591.

[9] Chindapasirt, P, Nuaklong, P, Zaetang, Y, Sujumngtokul, P, Sata, V. Mechanical and thermal properties of recycling lightweight pervious concrete. *Arabian Journal for Science and engineering*. 2015 ; 40(2): 443-450.

[10] Khankhaje , E, Salim, M.R, Mirza, J, Hussin, M.W. properties of sustainable lightweight

porous concrete as road material. *Construction and Building Materials*. 2018 ;158:141- 148.

[28] Adamu, M, Ayeni, K.O, Haruna, S.I, Mansour, Y, Haruna, S. Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach. *Case Studies Construction Materials*. 2018 ; 15 : 2075- 2087.

[29] Wu, M.H, Lin, C.L, Haung, W.C, Chen, J.W. Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials*. 2016 ; 111 : 618-624.

performance. *cement and Concrete research*. 2006;(36):2074-2085.

[19] Neithalath N, Sumanasooriya MS, Deo OM. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials characterization*. 2010; (61):802-813.

[20] BRITISH STANDARD , BS EN 12390-3. *Testing hardened concrete –Part 3: Compressive strength of test specimens*. Britain. 2002. 18P.

[21] American society for Testing and Materials, ASTM C 642-13. *Standard Test Method for Density , Absorption and Void in Hardened Concrete*. U. S. A. 2013. 3P.

[22] Strieder, H.L., Dutra, V.F.P., Graeff, A.G., Nunez, W.P., Merten, F.R.M. Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. 2022; (315) .10 January, 125384.

[23] Nahhab, A, Ketab, A. 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*. 2020 ; 233: 10February, 117922.

[24] Zhong, R, Wille, K. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2016 ; 70 : 130-138.

[25] Ibrahim, H.A, Razak, H.A, Abutaha, F. Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method. *Construction and Building Materials*. 2017 ;147:576- 587.

[26] Malaiskiene, J, Kizinievic, O, Sarkauskas, A. 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*. 2020 ; 24: 569-582.

[27] Xu, G, Shen, W, Huo, X, Yang, Z, Wang, j, Zhang, W, Ji, X. Investigation on the properties of