

Evaluation of characteristics and preference of mortar samples with aluminum slag and LECA with internal curing

Mohammad Ali Dastan Diznab^{1*}, Setareh Ghaderan², Fatemeh Yousefi Karim Abadi², Mehran Bonyadi³

1- Assistant Professor, Technical and Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran

2- Master's student, Technical and Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran

3- Master of Science, Technical and Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran.

ABSTRACT

This article examines the effects of using LECA (Light Expanded Clay Aggregate) and aluminum slag on the mechanical properties of mortar samples. Internal curing using LECA grains was also performed on the mortar samples. Aluminum slag is an environmental pollutant produced as waste during the aluminum production process. Using these materials in cement mortars can significantly improve the environment but reduces the mechanical properties of the mortar. On the other hand, LECA grains along with internal curing can improve the behavioral properties of the mortar. This study investigates the impact of using different percentages of LECA and aluminum slag on properties such as compressive and flexural strength. The results show that in samples containing LECA and slag, the highest compressive strength was achieved with 15% LECA and 5% slag, and the highest flexural strength was achieved with 5% LECA and 10% slag in the mortar. Conversely, the presence of 5% LECA and 10% slag in the mortar sample caused a significant reduction in compressive strength by about 40.7%, and the presence of 10% LECA and 5% slag in the mortar sample reduced the flexural strength by up to 37%. Finally, to introduce an optimal mix design, a model was proposed to introduce a desirability index based on the variables of the amount of aluminum slag and LECA used, compressive and flexural strength, and the behavior of different mortar mix designs was evaluated.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 September 2024

Revise Date: 01 December 2024

Accept Date: 04 December 2024

Keywords:

Aluminum slag

LECA

Compressive strength of cement mortar

Flexural strength of cement mortar

Preference

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.475100.3507](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.475100.3507)

*Corresponding author: Mohammad Ali Dastan Diznab.

Email address: m-dastan@araku.ac.ir

ارزیابی مشخصات مکانیکی و مطلوبیت نمونه‌های ملات حاوی سرباره آلومینیوم و لیکا با عمل آوری داخلی

محمدعلی داستان دیزناب^{۱*}، ستاره قادران^۲، فاطمه یوسفی کریم‌آبادی^۲، مهران بنیادی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی اثرات استفاده از لیکا و سرباره آلومینیوم در مشخصات مکانیکی نمونه‌های ملات پرداخته شده است. همچنین عمل‌آوری داخلی توسط دانه‌های لیکا در نمونه‌های ملات انجام شده است. سرباره آلومینیوم یکی از مواد آلوده‌کننده محیط‌زیست است که در فرایند تولید آلومینیوم به صورت مواد زائد تولید می‌شود. استفاده از این مواد در ملات‌های سیمانی می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود محیط‌زیست داشته باشد؛ ولی باعث کاهش عملکرد مشخصات مکانیکی ملات می‌شود. از طرفی دانه‌های لیکا به همراه عمل‌آوری داخلی می‌توانند مشخصات رفتاری ملات را بهبود دهند. در این پژوهش تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف لیکا و سرباره آلومینیوم در مشخصاتی نظیر مقاومت فشاری و خمشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی لیکا و سرباره بیشترین مقاومت فشاری در حالات ۱۵ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره و بیشترین مقاومت خمشی در استفاده از ۵ درصد لیکا و ۱۰ درصد سرباره در ملات ایجاد شده است. در مقابل وجود ۵ درصد لیکا و ۱۰ درصد سرباره در نمونه ملات سبب کاهش شدید مقاومت فشاری در حدود ۴۰/۷ درصد شده است و وجود ۱۰ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره در نمونه ملات مقاومت خمشی را تا ۳۷ درصد کاهش داده است. در نهایت جهت معرفی طرح اختلاط بهینه، الگویی به منظور معرفی شاخص مطلوبیت بر اساس متغیرهای میزان استفاده از سرباره آلومینیوم و لیکا، مقاومت فشاری و خمشی معرفی شده و رفتار طرح‌های مختلف اختلاط ملات مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سرباره آلومینیوم، لیکا، مقاومت فشاری ملات سیمانی، مقاومت خمشی ملات سیمانی، مطلوبیت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.475100.3507	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.475100.3507	۱۴۰۴/۰۶/۰۸	۱۴۰۳/۰۹/۱۴	۱۴۰۳/۰۹/۱۴	۱۴۰۳/۰۹/۱۱	۱۴۰۳/۰۷/۰۳
محمدعلی داستان دیزناب				*نویسنده مسئول:		
m-dastan@araku.ac.ir				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

فرایند تولید آلومینیوم - به عنوان پرمصرف‌ترین فلز بعد از آهن - منجر به تولید سرباره کوره آلومینیوم می‌شود که پس از یکبار تصفیه دیگر قابل استفاده نخواهند بود. این مواد پتانسیل بالایی برای تولید آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی دارند که یکی از چالش‌های زیست‌محیطی شرکت‌های تولید آلومینیوم محسوب می‌شوند. از طرف دیگر تولید سیمان نیز با توجه به آلودگی‌هایی که به همراه دارد، همواره می‌تواند برای محیط‌زیست زیان‌بار باشد. بر اساس آمارها در ازای تولید یک تن سیمان پرتلند تقریباً ۴۰۰۰ مگاژول انرژی و بیش از ۸۰۰ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود [۱]. از این رو تولید سیمان را می‌توان یکی از لطمه‌های صنعت به محیط‌زیست مخصوصاً در صنایع ساختمانی برشمرد. یکی از راه‌های مقابله با این مشکلات استفاده از سرباره آلومینیوم به عنوان جایگزین سیمان معرفی شده است.

باتوجه به مطالعات پیشین کاربرد های گوناگونی برای سرباره آلومینیوم در فعالیت‌های ساختمانی بیان شده است؛ مانند استفاده از سرباره آلومینیوم در ساخت بتن هوادهی اتوکلاو شده^۱ به عنوان پرکننده [۲]. همچنین از دیگر کاربردهای سرباره می‌توان به استفاده از آن در بتن برای ساخت بلوک‌های سنگ‌فرش، کف‌سازی، حفاظت از کرانه رودخانه، دیوار جداکننده و... اشاره کرد [۳]. ساتیش ردی [۴] ویژگی‌های مکانیکی و پایایی بتن با سرباره آلومینیوم تا جایگزینی ۱۵ درصدی را با بتن‌های معمولی مقایسه کرد. نتایج تحقیقات وی نشان داد که بتن حاوی مقدار محدودی سرباره آلومینیوم با وجود کاهش مقاومت فشاری، می‌تواند قابلیت استفاده در سازه‌های بتنی را داشته باشد ولی انجام مطالعات در این زمینه ضروری است. به‌طور کلی پژوهش‌های مختلفی در حوزه تکنولوژی بتن صورت گرفته است [۵-۹].

لیکا یا خاک رس منبسط شده می‌تواند جایگزینی برای ماسه باشد که علاوه بر کاهش وزن می‌تواند به صورت عمل‌آوری داخلی در مناطق مختلف جهت حفظ رطوبت بتن و جلوگیری از ترک خوردگی بتن مورد استفاده قرار گیرد. احمد و آکشاتا طی مطالعاتی که در مورد عمل‌آوری داخلی بتن با لیکا داشتند، متذکر شدند که عمل‌آوری معمولی به آب بیشتری نیاز دارد؛ بنابراین در مناطقی که کمبود آب دارند، عمل‌آوری داخلی با لیکا روش مناسبی است [۱۰]. مونوز [۱۱] نشان داد که با جایگزینی لیکا به‌عنوان ریز دانه در ملات چگالی نمونه‌ها، کاهش پیدا کرده است ولی مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز با کاهش همراه بوده است. آنیلکومار در بررسی استفاده از لیکا بیان کرد جایگزینی ترکیبی از سبک‌دانه به‌جای درشت‌دانه‌ها در بتن بدون تغییر در مقاومت و دوام آن امکان‌پذیر است [۱۲]. کانگسویم و همکاران طرح اختلاط بتن حاوی سبک‌دانه و سیلیکافوم^۲ را طوری در نظر گرفتند که پس از ۲۸ روز مقاومت فشاری در حدود ۶۰ مگاپاسکال داشته باشد. آن‌ها همچنین بیان کردند نتایج آزمایش‌های چرخه ذوب و یخندان سریع نشان می‌دهد که نسبت جذب آب و ویژگی‌های منافذ سنگ‌دانه‌های سبک (لیکا) عمدتاً بر مقاومت یخ‌زدگی بتن بدون توجه به محتوای دوده سیلیس تاثیر می‌گذارد [۱۳]. محمدی طی تحقیقاتی که در خصوص تاثیر دوده سیلیس بر خواص بتن سبک خود متراکم داشت دریافت که مقاومت فشاری بتن در طرح اختلاط‌های حاوی لیکا بیشتر از مخلوط‌های حاوی پرلیت است [۱۴]. کرون و نواسل بیان کردند عمل‌آوری داخلی با لیکا یکی از روش‌های تامین رطوبت اضافی و افزایش رطوبت داخلی بتن است که باعث کاهش انقباض بتن می‌شود. آنها اعلام کردند که در تمام نمونه‌های مورد آزمایش در طی ۹۰ روز درجه هیدراتاسیون در حدود ۱۰ درصد افزایش داشته است. آنها همچنین ذکر کردند نمونه‌های تحت عمل‌آوری داخلی طی ۷ تا ۲۸ روز افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری از خود نشان دادند [۱۵]. وزارت حمل‌ونقل ایالت نیویورک^۳ از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ با استفاده از بتن حاوی ۳۰ درصد حجمی جایگزینی لیکا به‌جای سنگ‌دانه و نسبت آب به سیمان ۰/۴ پل‌هایی را ساخت. داده‌های گزارش شده توسط استریتر و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که عمل‌آوری داخلی در برخی موارد مقامت فشاری بتن را به طور ناچیزی کاهش داده و در برخی موارد منجر به استحکام بالاتر در بتن شده است [۱۶].

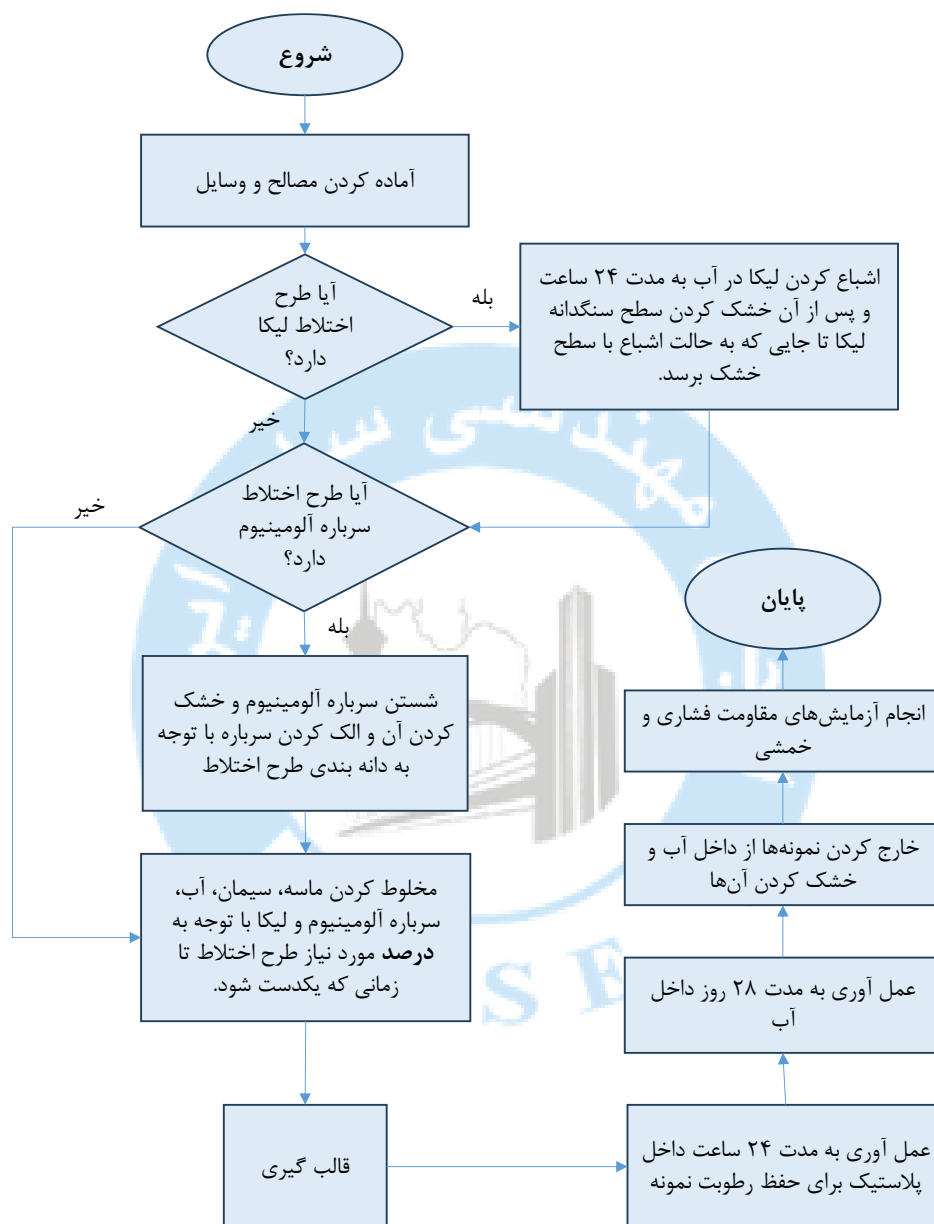
نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که به طور معمول استفاده از سرباره آلومینیوم اثرات نامطلوبی بر مشخصات مکانیکی بتن و ملات سیمانی دارد که استفاده از دانه‌های لیکا همراه با عمل‌آوری داخلی می‌تواند شرایط آن را بهبود دهد. هدف این پژوهش دستیابی و تعیین درصد بهینه جایگزینی سرباره آلومینیوم و لیکا به‌جای سیمان و ماسه و تعیین است. در این راستا ۹۶ نمونه جهت ارزیابی مقاومت فشاری

¹ Autoclaved aerated concrete

² Silica fume

³ NYSPT

نمونه‌های مکعبی ملات سیمانی و مقاومت خمشی نمونه‌های تیر ملات سیمانی در عمل‌آوری ۲۸ روزه در آب مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین میزان درصدهای جایگزینی لیکا و سرباره آلومینیوم برابر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه شاخصی جهت معرفی میزان مطلوبیت معرفی شده و براین اساس مناسب‌ترین طرح اختلاط معرفی شده است. در شکل ۱ روند مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱: روند مراحل انجام پژوهش.

۲- مصالح

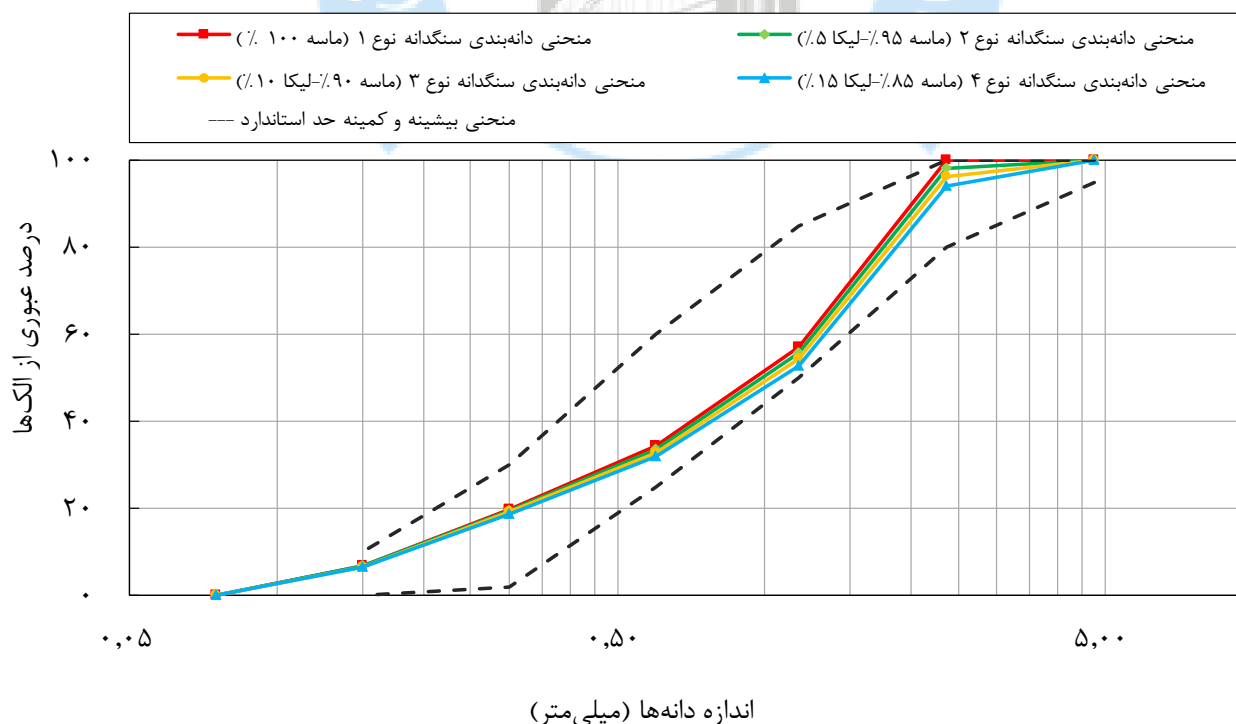
در این پژوهش سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان نهبوند مورد استفاده قرار گرفته که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن مطابق استاندارد [۱۷] ASTM C150 است. آب استفاده شده در این تحقیق، از آب آشامیدنی شهر اراک تهیه شده که از نظر کیفیت مورد قبول است. آب خالص و تمیز بوده و هیچ‌گونه ناخالصی مضر مانند اکسید آهن، اسید، قلیا، نمک، مواد آلی و یون‌های کلرید نداشته است. همچنین ماسه

مورد استفاده در این پژوهش از نوع ماسه شکسته کوهی دو بار شور شهر اراک است. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM C33 [۱۸] بوده و نمودار دانه بندی ماسه در شکل ۲ قابل مشاهده است.

۲-۱- لیکا

سنگدانه های لیکا، از دانه های کروی شکلی تشکیل شده اند؛ ولی وقتی شکسته می شوند بافت متخلخل و پر از منفذ آنها نمایش داده می شود. در بیشتر موارد، لیکا یک رنگ قهوه ای تیره یا قرمز یا قهوه ای - قرمز یا خاکستری دارد. این تفاوت در رنگها مربوط به انواع ترکیب شیمیایی لیکا و روش ساخت آن است؛ بنابراین به طور کلی می توان گفت لیکا سنگدانه رس منبسط شده سبک است که به صورت مصنوعی و با طی کردن فرایند انبساط خاک رس در کوره های گردان با حرارتی حدود ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد تولید می شود. لیکا مورد استفاده در این پژوهش محصول شرکت لیکا ایران، واقع در شهرستان ساوه است. این لیکا که به عنوان جایگزین ماسه طبیعی به طرح اختلاط افزوده شده، از نوع سازه ای با سایز ۰ تا ۴ میلی متر بوده شکل ۲ و مورد تایید استاندارد [۱۹] ASTM C330 است همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود نمودار دانه بندی برای ۴ نوع دانه بندی رسم شده است. این دانه بندی ها با توجه به وجود درصد های مختلف لیکا در آنها دسته بندی شده اند که هر چهار دسته بندی در حدود استاندارد قرار دارند.

در این پژوهش عمل آوری داخلی به وسیله سنگدانه لیکا در اختلاط انجام شده است. روش های مختلف عمل آوری بر اساس پیشنهاد کمیته فنی RILEM با نام مخفف ICC-196TC طبقه بندی شده است [۲۰]. عمل آوری داخلی را می توان به این صورت تعریف نمود: عمل آوری داخلی اشاره به وارد کردن یک ترکیب به داخل بتن دارد، بطوریکه بتواند به عنوان یک ماده عمل آورنده در داخل بتن قرار گیرد. این ماده می تواند یا یک سنگدانه باشد که در شرایط ویژه ای وارد بتن شده است (مثل حالت اشباع) و یا یک افزودنی ویژه باشد [۲۱، ۲۲]. اما تعریفی که مؤسسه بتن آمریکا در مورد عمل آوری داخلی دارد، با تعریف ارائه شده توسط مؤسسه RILEM کمی متفاوت است. طبق این تعریف عمل آوری داخلی به فرایندی گفته می شود که عمل هیدراسیون به علت در دسترس بودن آب داخلی اضافی پیشرفت می کند که این آب قسمتی از آب مخلوط نمی باشد [۲۳].



شکل ۲: نمودار دانه بندی به ازای درصد های مختلف لیکا و ماسه براساس استاندارد [۲۴] ASTM C136.

در این پژوهش از عمل آوری داخلی به وسیله سنگدانه لیکا استفاده شده است. در این روش دانه‌های لیکا قبل از بکارگیری در بتن، آب مورد نیاز جهت عمل آوری بتن را جذب کرده و آن را به تدریج و در طول چند روز جهت انجام فرآیند هیدراتاسیون بتن آزاد می‌کنند که می‌تواند بتن را از عمل آوری بیرونی بی‌نیاز نماید. باتوجه به فرایند ساخت طرح اختلاط و نمونه‌ها، لیکا مورد استفاده قبل از اضافه شدن به طرح اختلاط، ۲۴ ساعت در آب اشباع شده و پس از آن به صورت اشباع با سطح خشک به طرح اختلاط افزوده شده است. بنابراین می‌توان گفت آب موجود در سنگدانه لیکا در حالت اشباع با سطح خشک، شرایط توضیح داده شده مطابق تعریف مؤسسه بتن آمریکا را فراهم می‌کند.

۲-۲- سرباره آلومینیوم

سرباره آلومینیوم یکی از محصولات جانبی تولید آلومینیوم است. دفع سرباره آلومینیوم که قابلیت استفاده مجدد ندارد (سرباره سیاه) معضلات زیست‌محیطی زیادی به همراه دارد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است سرباره آلومینیوم به دو حالت ایجاد می‌شود: (۱) سرباره سفید، (۲) سرباره سیاه. سرباره سفید سرباره‌ای است که از فرایند پالایش اولیه آلومینیوم به دست می‌آید و یکبار در شرایط بازیافت آلومینیوم قرار می‌گیرد. تفاوت سرباره سیاه و سفید در آن است که سرباره سیاه در دو مرحله تحت حرارت قرار می‌گیرد تا آلومینیوم از آن استخراج شود. سرباره سیاه تقریباً آلومینیومی در خود ندارد و از مقدار زیادی نمک تشکیل شده است. سرباره‌ها را در کوره‌های چرخشی قرار می‌دهند تا آلومینیوم را بازیافت کنند و پس از آن ماده باقی‌مانده سرباره که به آن سرباره سیاه یا کیک نمک گفته می‌شود، در زمین دفن می‌کنند. اغلب این سرباره در کنار کارخانه‌های مختلف در هوای آزاد دفع می‌شوند. به‌مرور زمان این سرباره‌ها تحت تأثیر شرایط جوی، وارد زمین یا آب‌های زیر زمینی شده و حتی در هوا نیز منتشر می‌شوند. بر اساس تحقیقات ذرات سبک و ریزدانه پسماند آلومینیوم در محیط‌های مختلف مخصوصاً در محیط قلیایی واکنش داده و گاز هیدروژن آزاد می‌کند که می‌تواند باعث انفجار شود. یکی از راه‌های جداسازی هیدروژن از سرباره آلومینیوم قراردادن این ماده در آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به صورت محلول به مدت ۴۸ ساعت است که با آلوده‌سازی منابع آب و صرف هزینه‌های مضاعف همراه است؛ بنابراین پسماند آلومینیوم جز زباله‌های خطرناک محسوب می‌شود.



شکل ۳: انواع سرباره آلومینیوم (الف) سرباره آلومینیوم سفید. (ب) سرباره آلومینیوم سیاه.

سرباره آلومینیوم استفاده شده در این پژوهش از نوع سرباره سیاه، حاصل از فرایند ذوب آلومینیوم در کارخانه آلومینیوم‌سازی اراک به دست آمده است. برای استفاده از سرباره آلومینیوم در ملات باید فرایند آماده‌سازی روی آن انجام شود که نحوه آن بستگی به نوع و کیفیت سرباره تهیه شده دارد. فرایند آماده‌سازی سرباره آلومینیوم در این پژوهش فقط شامل شستشوی چندباره آن در آب با دمای معمولی است؛ سپس سرباره به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته تا کاملاً خشک و آماده استفاده در ملات شود. باتوجه به آنکه سرباره آلومینیوم در این تحقیق جایگزین سیمان شده است، برای اینکه دانه‌بندی سرباره آلومینیوم به سیمان نزدیک‌تر شود، دو بار از الک شماره ۱۰۰ (سایز ۱۵۰ میکرومتر) عبور داده شده است و مقدار عبوری سرباره در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفته است.

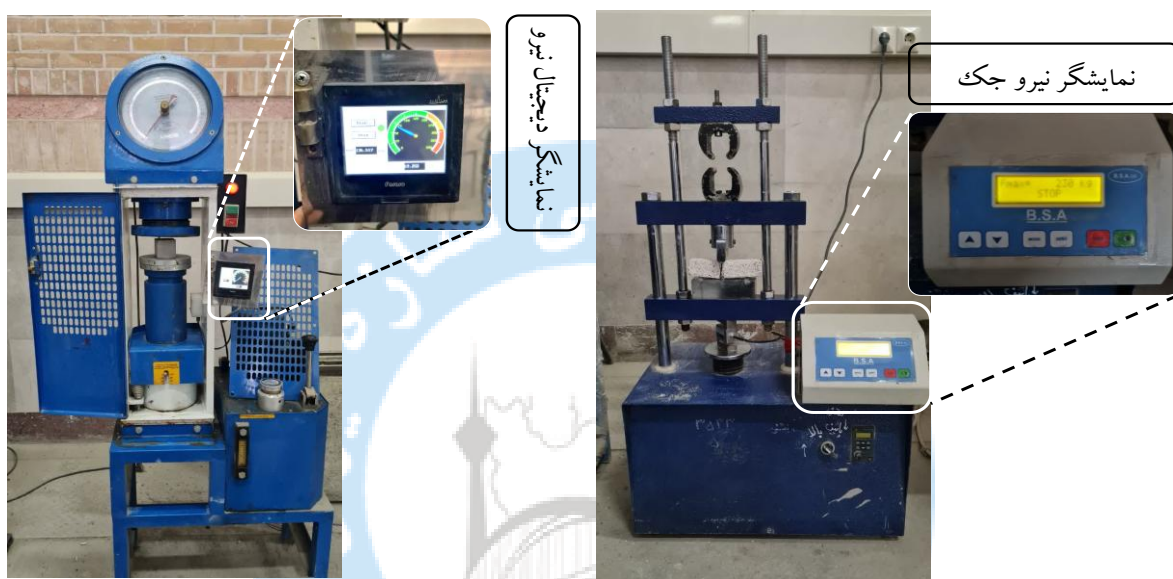
۳- طرح اختلاط

همان طور که اشاره شد، در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از درصدهای مختلف لیکا و سرباره آلومینیوم بر خواص مکانیکی ملات سیمانی در محیط معمولی پرداخته شده است؛ بنابراین نمونه‌های مکعبی در ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر به منظور بررسی مقاومت فشاری و نمونه‌های منشوری به ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلی‌متر برای بررسی مقاومت خمشی ساخته شده است. در این پژوهش ابتدا اثر جایگزینی لیکا و سرباره آلومینیوم با درصدهای ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ به جای ماسه و سیمان به صورت مجزا و بعد به صورت ترکیبی در ملات سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌ها.

ردیف	نام طرح	W/C	لیکا (درصد)	سرباره آلومینیوم (درصد)		سیمان	آب	ریزدانه (ماسه)
				لیکا	سرباره آلومینیوم			
۱	L0A0	۰/۴۵	۰	۰	۰	۶۷۰	۳۰۲	۱۱۷۷
۲	L5A0	۰/۴۵	۵	۰	۴۱	۶۷۰	۳۰۲	۱۱۱۸
۳	L10A0	۰/۴۵	۱۰	۰	۸۳	۶۷۰	۳۰۲	۱۰۶۰
۴	L15A0	۰/۴۵	۱۵	۰	۱۲۴	۶۷۰	۳۰۲	۱۰۰۱
۵	L0A5	۰/۴۵	۰	۵	۰	۶۳۷	۳۰۲	۱۱۷۷
۶	L0A10	۰/۴۵	۰	۱۰	۰	۶۰۳	۳۰۲	۱۱۷۷
۷	L0A15	۰/۴۵	۰	۱۵	۰	۵۷۰	۳۰۲	۱۱۷۷
۸	L5A5	۰/۴۵	۵	۵	۴۱	۶۳۷	۳۰۲	۱۱۱۸
۹	L5A10	۰/۴۵	۱۰	۵	۸۳	۶۰۳	۳۰۲	۱۰۶
۱۰	L5A15	۰/۴۵	۱۵	۵	۱۲۴	۵۷۰	۳۰۲	۱۰۰۱
۱۱	L10A5	۰/۴۵	۵	۱۰	۴۱	۶۳۷	۳۰۲	۱۱۱۸
۱۲	L10A10	۰/۴۵	۱۰	۱۰	۸۳	۶۰۳	۳۰۲	۱۰۶
۱۳	L10A15	۰/۴۵	۱۵	۱۰	۱۲۴	۵۷۰	۳۰۲	۱۰۰۱
۱۴	L15A5	۰/۴۵	۵	۱۵	۴۱	۶۳۷	۳۰۲	۱۱۱۸
۱۵	L15A10	۰/۴۵	۱۰	۱۵	۸۳	۶۰۳	۳۰۲	۱۰۶
۱۶	L15A15	۰/۴۵	۱۵	۱۵	۱۲۴	۵۷۰	۳۰۲	۱۰۰۱

در تهیه نمونه‌های ملات پس از اختلاط مواد خشک (ماسه، سیمان و سرباره آلومینیوم)، آب طرح اختلاط به صورت چندمرحله‌ای به مخلوط اضافه شده و در نهایت مقداری از آب برای مرحله پایانی اختلاط نگه داشته شده است. سپس لیکا (در صورت وجود در طرح) که به صورت اشباع با سطح خشک درآمده است به مخلوط اضافه شده و در نهایت آب باقیمانده طرح اختلاط به مخلوط اضافه و مواد کاملاً با هم مخلوط شده‌اند. قالب‌گیری و ساخت نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C192 [۲۵] انجام شده است. پس از قالب‌گیری، قالب‌ها همراه نمونه در داخل کیسه پلاستیک به مدت ۲۴ ساعت گذاشته شده تا رطوبت نمونه‌ها بر اثر دمای محیط از بین نرود. پس از گذشت ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز درون وان آب برای عمل‌آوری قرار می‌گیرند. پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها از وان آب خارج شده و تا مدتی که سطح آن‌ها کمی خشک شود در محیط معمولی قرار داده می‌شوند و در نهایت مقاومت فشاری و خمشی آن‌ها با دستگاه‌های کالیبره شده که در شکل ۴ نشان داده شده است، اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۴: دستگاه‌های تست مقاومت فشاری و خمشی ملات.

۴- نتایج و بحث

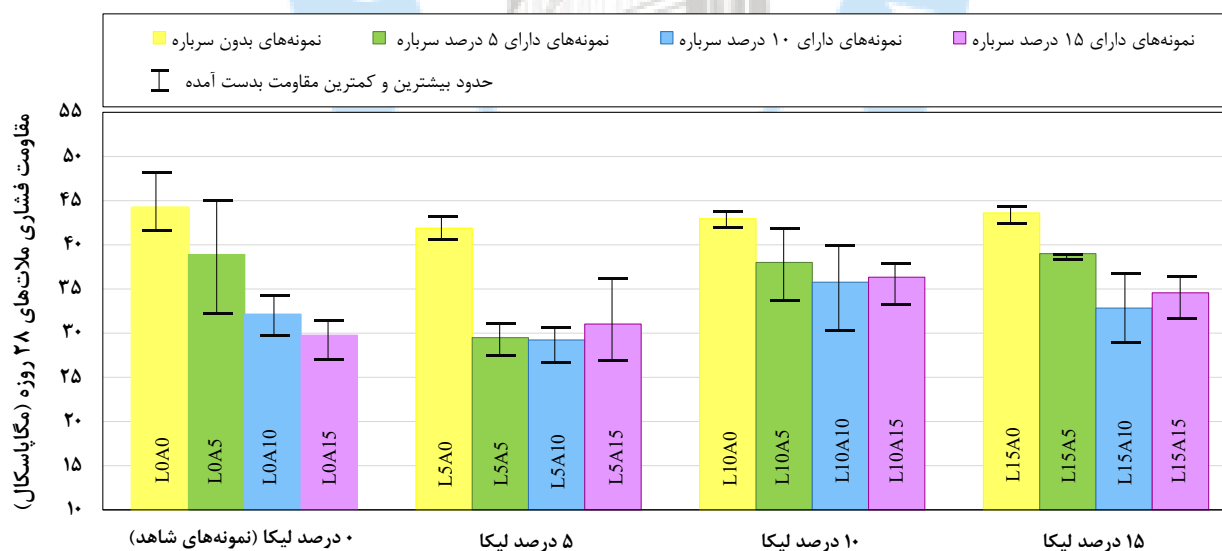
نتایج حاصل از وجود درصدهای مختلف لیکا و سرباره در طرح اختلاط در ادامه مورد بحث قرار گرفته است. نمودارهای تاثیر درصدهای متفاوت لیکا و سرباره بر مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه مطابق شکل ۵ تا شکل ۸ قابل مشاهده است. در این نمودارها مقاومت میانگین سه نمونه گزارش شده است و حدود بیشترین و کمترین مقاومت به دست آمده مشخص شده که بیانگر میزان پراکندگی نتایج است.

۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری که بر روی نمونه‌های مکعبی ملات به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر در دوره‌های مختلف پس از ۲۸ روز عمل‌آوری کامل در آب انجام گرفته در جدول ۲ نشان داده شده است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C109 [۲۶] با دستگاه مقاومت فشاری انجام گرفته است. حداکثر بار ثبت شده توسط این دستگاه تقسیم بر سطح مقطع عرضی نمونه‌ها، تنش فشاری نمونه‌ها یا به عبارت دیگر مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها.

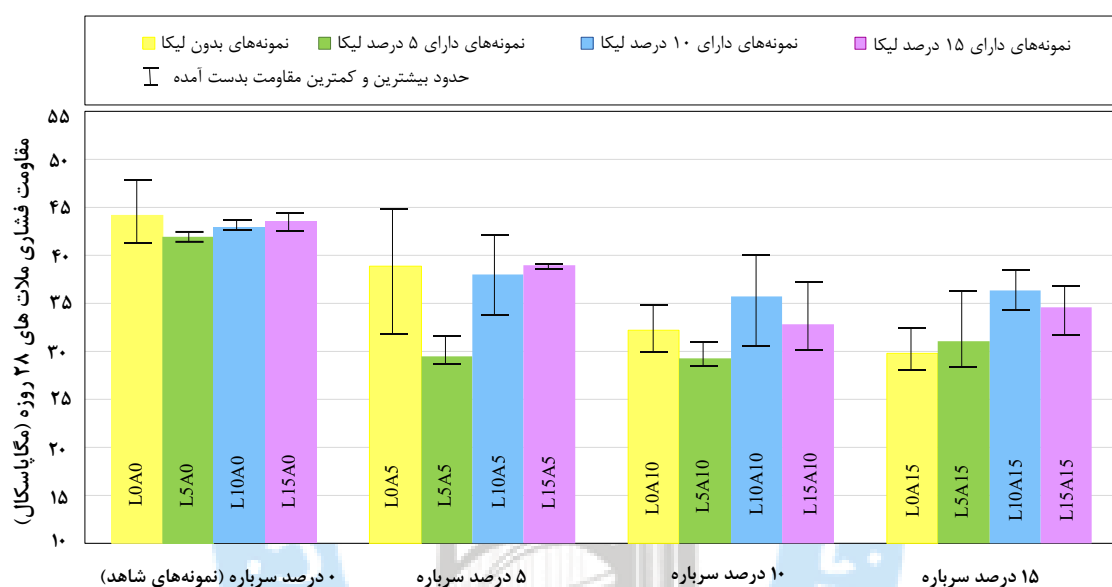
مقاومت فشاری میانگین	مقاومت فشاری نمونه سوم	مقاومت فشاری نمونه دوم	مقاومت فشاری نمونه اول	نام نمونه
۴۴/۱	۴۱/۵	۴۷/۵	۴۳/۵	L0A0
۳۸/۹	۴۵/۰	۴۰/۷	۳۱/۰	L0A5
۳۱/۲	۳۱/۲	۲۹/۶	۳۲/۸	L0A10
۲۹/۸	۲۹/۴	۲۷/۶	۳۲/۳	L0A15
۴۱/۹	۴۱/۷	۴۱/۱	۴۲/۹	L5A0
۴۲/۹	۴۱/۵	۴۳/۸	۴۳/۶	L10A0
۴۳/۶	۴۴/۵	۴۳/۸	۴۲/۵	L15A0
۲۹/۵	۲۷/۳	۳۱/۴	۲۹/۸	L5A5
۳۸/۰	۳۷/۹	۴۲/۲	۳۳/۹	L10A5
۳۹/۰	۳۸/۷	۳۹/۰	۳۹/۰	L15A5
۲۹/۲	۲۹/۹	۲۷/۶	۳۰/۲	L5A10
۳۵/۸	۴۰/۰	۳۰/۰	۳۷/۳	L10A10
۳۲/۸	۲۹/۴	۳۷/۰	۳۲/۲	L15A10
۳۱/۰	۳۶/۴	۲۹/۲	۲۷/۴	L5A15
۳۶/۳	۳۷/۱	۳۷/۷	۳۴/۲	L10A15
۳۴/۶	۳۶/۷	۳۱/۶	۳۵/۴	L15A15



شکل ۵: نمودار اثر لیکا بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه مالت.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود افزایش درصد جایگزینی لیکا از ۵ درصد به ۱۰ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها شده است. به طوری که نمونه حاوی ۱۰ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره نسبت به نمونه حاوی ۵ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره، رشد مقاومتی در حدود ۲۵/۲ درصد داشته است. از طرف دیگر افزایش مقدار لیکا از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد در برخی موارد سبب کاهش

مقاومت شده است. هرچند در هر صورت مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد لیکا از نمونه‌های حاوی ۵ درصد لیکا بیشتر بوده است. به‌طور کلی مقاومت همه نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد LOA0 که فاقد لیکا و سرباره بوده، دچار کاهش شده است. به طور متوسط، افزودن ۱۰ درصد لیکا به نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره، مقاومت فشاری نمونه‌ها را به میزان ۱۶/۳ درصد نسبت به نمونه‌های دارای ۵ درصد لیکا و ۶/۳ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد لیکا افزایش داده است. با ادامه روند افزایش درصد جایگزینی لیکا از ۱۰ به ۱۵ درصد مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد سرباره و حاوی ۵ درصد سرباره با افزایش جزیی در حدود ۱/۵ درصد و ۲/۴ درصد همراه بوده است. با توجه به روند تغییرات مقاومت فشاری در حضور درصد‌های مختلف لیکا به نظر می‌رسد که وجود ۱۰ درصد لیکا در طرح اختلاط سبب عملکرد مقاومتی بهتر نمونه‌ها شده است.



شکل ۶: نمودار اثر سرباره آلومینیوم بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات.

مطابق نمودار شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ۵ الی ۱۵ درصد لیکا به نمونه شاهد LOA0 مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها را به طور جزئی کاهش می‌دهد. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که افزودن سرباره به نمونه‌های ملات باعث روند کاهشی مقاومت نسبت به نمونه‌های فاقد سرباره شده است؛ اما وجود لیکا در برخی موارد تا حدودی باعث بهبود نتایج شده است. به‌طوری‌که در نمونه‌هایی که حاوی ۵ درصد سرباره هستند، وجود ۱۵ درصد لیکا بیشترین مقاومت فشاری را حاصل کرده است. هرچند این مقاومت در حدود ۶/۲ درصد نسبت به نمونه شاهد LOA0 کمتر است.

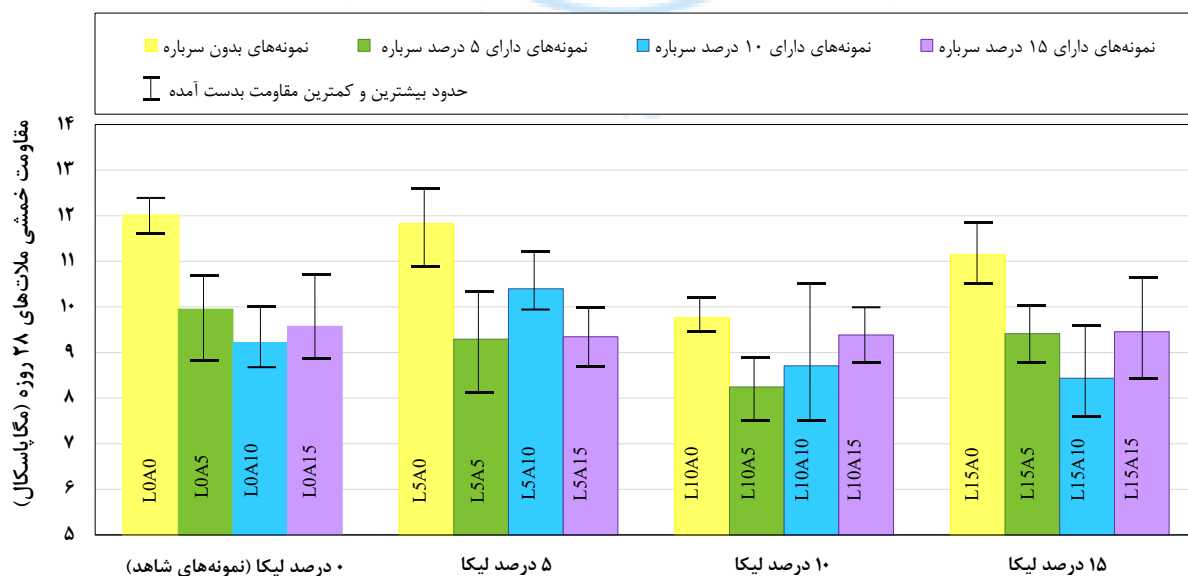
با افزایش مقدار سرباره آلومینیوم به ۱۰ درصد، روند کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌هایی که ۵ درصد سرباره داشتند، مشهود است؛ اما وجود ۱۰ درصد لیکا در نمونه حاوی ۱۰ درصد سرباره سبب بروز مقاومت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد سرباره شده است. همچنین در نمونه‌هایی که حاوی ۱۵ درصد سرباره هستند، وجود ۱۰ درصد لیکا نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد مقاومتی بهتری نشان داده است. وجود لیکا در طرح اختلاط تا حدودی باعث بهبود عملکرد مقاومت فشاری شده است اما افزایش درصد سرباره آلومینیوم نتیجه موثری در بهبود عملکرد مقاومتی نداشته است. به‌طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سرباره به ترتیب کاهش مقاومتی در حدود ۱۸/۶، ۳۳/۷ و ۳۱ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد سرباره آلومینیوم داشته‌اند. بنابراین هرچند وجود سرباره آلومینیوم در طرح اختلاط سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های شاهد شده است، اما در برخی موارد می‌توان با افزودن لیکا میزان کاهش مقاومت را کمتر و تا حدودی مهار کرد.

۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی در جدول ۳ قابل مشاهده است. نمونه‌ها پس از عمل آوری ۲۸ روزه در آب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. میانگین نتایج سه نمونه با ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلیمتر در هر نوبت نمونه‌برداری در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها.

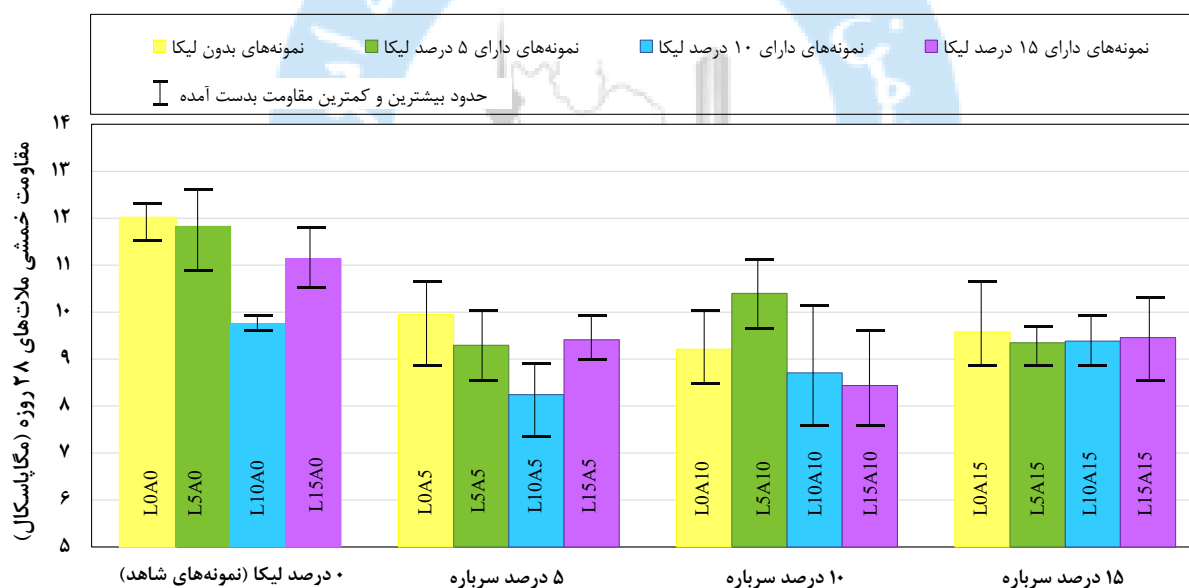
نام نمونه	مقاومت خمشی نمونه اول	مقاومت خمشی نمونه دوم	مقاومت خمشی نمونه سوم	مقاومت خمشی میانگین
L0A0	۱۱/۵	۱۲/۱	۱۲/۳	۱۲/۰
L0A5	۱۰/۸	۸/۸	۱۰/۳	۹/۹
L0A10	۸/۶	۱۰/۱	۹/۱	۹/۲
L0A15	۸/۹	۹/۱	۱۰/۷	۹/۶
L5A0	۱۲/۱	۱۲/۴	۱۰/۹	۱۱/۸
L10A0	۹/۷	۹/۹	۹/۶	۹/۸
L15A0	۱۰/۳	۱۱/۳	۱۱/۸	۱۱/۱
L5A5	۱۰/۲	۸/۶	۹/۰	۹/۳
L10A5	۸/۹	۷/۳	۸/۵	۸/۲
L15A5	۸/۹	۹/۹	۹/۳	۹/۴
L5A10	۱۱/۱	۹/۸	۱۰/۳	۱۰/۴
L10A10	۱۰/۱	۷/۶	۸/۴	۸/۷
L15A10	۷/۶	۹/۷	۸/۱	۸/۴
L5A15	۹/۵	۸/۸	۹/۸	۹/۴
L10A15	۹/۹	۸/۹	۹/۴	۹/۴
L15A15	۸/۷	۱۰/۳	۹/۳	۹/۵



شکل ۷: نمودار اثر لیکا بر مقاومت خمشی ۲۸ روزه ملات.

در شکل ۷ تأثیر افزایش لیکا بر مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سرباره با عمل‌آوری ۲۸ روزه در آب بررسی شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی، همچون نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان می‌دهند که افزایش مقدار لیکا در طرح اختلاط در برخی موارد باعث افزایش مقاومت و گاهی نیز باعث کاهش مقاومت خمشی شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود وجود ۵ درصد لیکا سبب بروز تغییرات جزئی در مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های شاهد شده است؛ اما با افزایش مقدار لیکا به ۱۰ درصد مقاومت خمشی همه نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد و همچنین نمونه‌های حاوی ۵ درصد لیکا دچار کاهش شده‌اند به طوری که کاهش مقاومت خمشی در برخی نمونه‌ها بیشتر و در برخی کمتر بوده است. از طرفی دیگر افزایش مقدار لیکا به ۱۵ درصد سبب شده است که مقاومت برخی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد لیکا افزایش و برخی کاهش یابند.

باتوجه به روند تغییرات مقاومت خمشی در نمونه‌هایی که فاقد سرباره و حاوی درصدهای مختلف لیکا هستند (L10A0، L5A0 و L15A0) می‌توان دریافت که افزایش درصد لیکا سبب بهبود مقاومت خمشی نشده و در هر حالت مقاومت خمشی این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد L0A0 کاهش یافته است. این درحالی است که وجود لیکا در نمونه‌های حاوی سرباره در برخی موارد مفید واقع شده است. به طوری که وجود ۵ درصد لیکا در نمونه حاوی ۱۰ درصد سرباره سبب بروز مقاومت خمشی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد سرباره شده است. به طوری میانگین در نتایج مشاهده می‌شود که وجود ۵ درصد لیکا در طرح اختلاط سبب افزایش جزئی مقاومت نمونه‌ها و وجود ۱۰ و ۱۵ درصد لیکا در طرح اختلاط سبب کاهش ۱۲/۷ و ۵/۹ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های شاهد شده است.



شکل ۸: نمودار اثر سرباره آلومینیوم بر مقاومت خمشی ۲۸ روزه ملات.

بررسی تأثیر افزایش سرباره آلومینیوم بر مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی لیکا با عمل‌آوری ۲۸ روزه در آب مطابق شکل ۸ صورت گرفته و مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سرباره آلومینیوم، مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد سرباره کاهش یافته است. هرچند وجود ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لیکا در طرح‌های اختلاط بدون سرباره سبب کاهش جزئی مقاومت در حدود ۱/۴، ۲۲/۹ و ۷/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد L0A0 که فاقد لیکا و سرباره است، شده است؛ اما وجود لیکا در طرح‌های اختلاط حاوی سرباره در برخی موارد مفید واقع شده است. به طوری که وجود ۱۵ درصد لیکا در حضور ۱۵ درصد سرباره سبب افزایش جزئی مقاومت نسبت به حالتی که فقط ۵ درصد سرباره در طرح بوده شده است. این در حالی است مطابق نمودار شکل ۸ مشخص است که افزودن سرباره آلومینیوم در کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها موثر

بوده است. به طور متوسط وجود ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سرباره به ترتیب سبب کاهش مقاومتی در حدود ۱۷/۵، ۱۷/۸ و ۱۵/۵ درصدی نسبت به نمونه‌های شاهد شده است.

۳-۴- نتایج بررسی مطلوبیت

در این مطالعه میزان مطلوبیت یا سودمندی استفاده از سرباره آلومینیوم و لیکا در ملات با معیارهای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و اثرات محیط‌زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار درصد مطلوبیت مطابق روابط پیشنهادی ارائه شده در معادله (۱) تا (۴) محاسبه شده است. در این روابط $Pref_C$ ، $Pref_M$ ، $Pref_E$ و $Pref_T$ به ترتیب مطلوبیت مقاومت فشاری، مطلوبیت مقاومت خمشی، مطلوبیت محیط‌زیستی و مطلوبیت کلی هستند. این روابط به نحوی ارائه شده‌اند که در مناسب‌ترین حالت عدد ۱۰۰ و در نامناسب‌ترین حالت عدد صفر را نتیجه می‌دهند. رابطه‌های (۱) و (۲) به بیان تاثیر مقاومت فشاری و خمشی می‌پردازند که برای بیشترین مقاومت گزارش شده مقدار ۱۰۰ و در کمترین آن مقدار صفر را نتیجه می‌دهند. رابطه (۳) ترکیب اثر استفاده از لیکا و سرباره آلومینیوم را از جنبه زیست‌محیطی بیان می‌کند که برای استفاده از سرباره آلومینیوم به علت دفع آن از محیط زیست اثر مثبت و برای استفاده از لیکا به علت انرژی بر بودن و تولید گازهای ناشی از احتراق در مراحل تولید آن اثر منفی در نظر گرفته شده است. رابطه (۴) مجموع تمام عوامل را به صورت یکپارچه ارزیابی می‌نماید.

$$Pref_C = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \times 100 \quad (1)$$

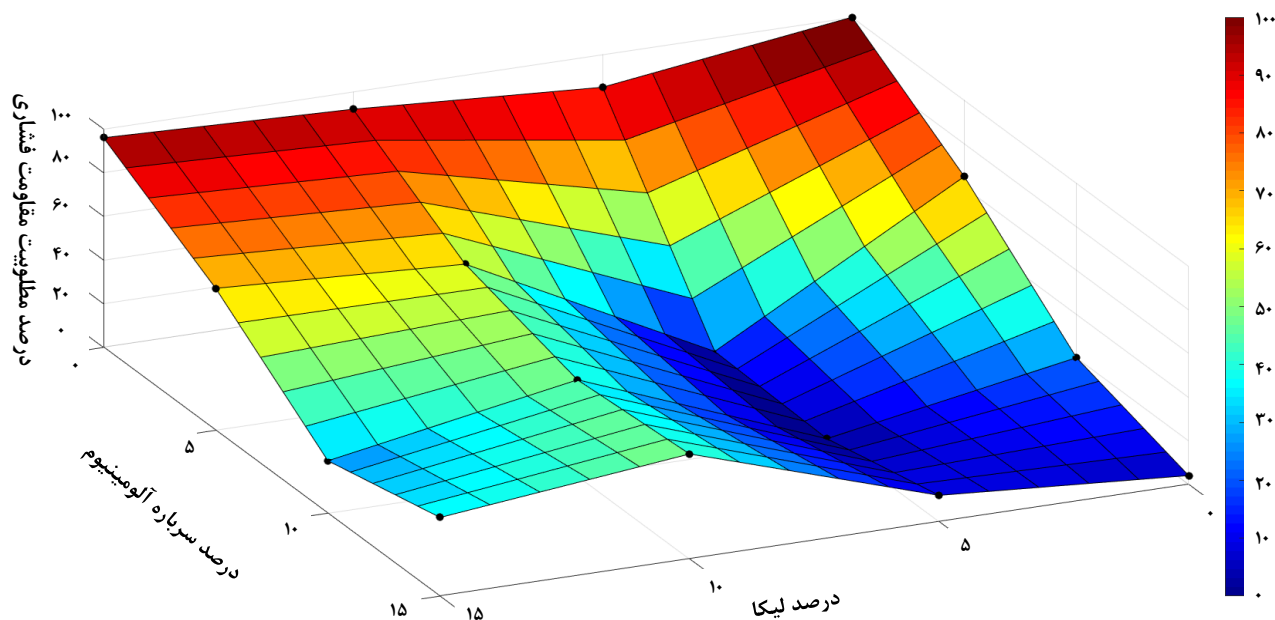
$$Pref_M = \frac{M - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} \times 100 \quad (2)$$

$$Pref_E = \frac{\beta_1 \times \left(\frac{AL}{AL_{max}} \right) + \beta_2 \times \left(\frac{L_{max} - L}{L_{max}} \right)}{\beta_1 + \beta_2} \times 100 \quad (3)$$

$$Pref_T = \frac{(\alpha_C \times Pref_C) + (\alpha_M \times Pref_M) + (\alpha_E \times Pref_E)}{\alpha_C + \alpha_M + \alpha_E} \times 100 \quad (4)$$

در روابط فوق P ، P_{min} و P_{max} به ترتیب مقاومت فشاری نمونه مورد نظر، حداقل و حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌ها و به طور مشابه M ، M_{min} و M_{max} به ترتیب مقاومت خمشی نمونه مورد نظر، حداقل و حداکثر مقاومت خمشی نمونه‌ها است. در معادله مربوط به مطلوبیت محیط‌زیستی مقادیر β_1 و β_2 ضرایب اهمیت استفاده از سرباره آلومینیوم و لیکا برای محیط‌زیست هستند که در این پژوهش با توجه به اهمیت بیشتر دفع سرباره آلومینیوم ضریب β_1 برابر واحد و ضریب β_2 برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است. همچنین در این معادله AL و L به ترتیب بیانگر درصد استفاده از سرباره آلومینیوم و لیکا در نمونه مورد نظر هستند. AL_{max} و L_{max} نیز نشانگر حداکثر درصد استفاده از سرباره آلومینیوم و لیکا بوده که در این پژوهش برابر ۱۵ درصد در نظر گرفته شدند. ضرایب α در معادله (۴) بیانگر میزان اهمیت است که می‌تواند از ۰ تا ۱ تغییر کند. مقدار ۰ به معنای عدم اهمیت و مقدار ۱ به معنای حداکثر اهمیت است که در این پژوهش میزان اهمیت مقاومت فشاری و مقاومت خمشی برابر ۰/۵ و شاخص محیط‌زیستی برابر واحد در نظر گرفته شده است.

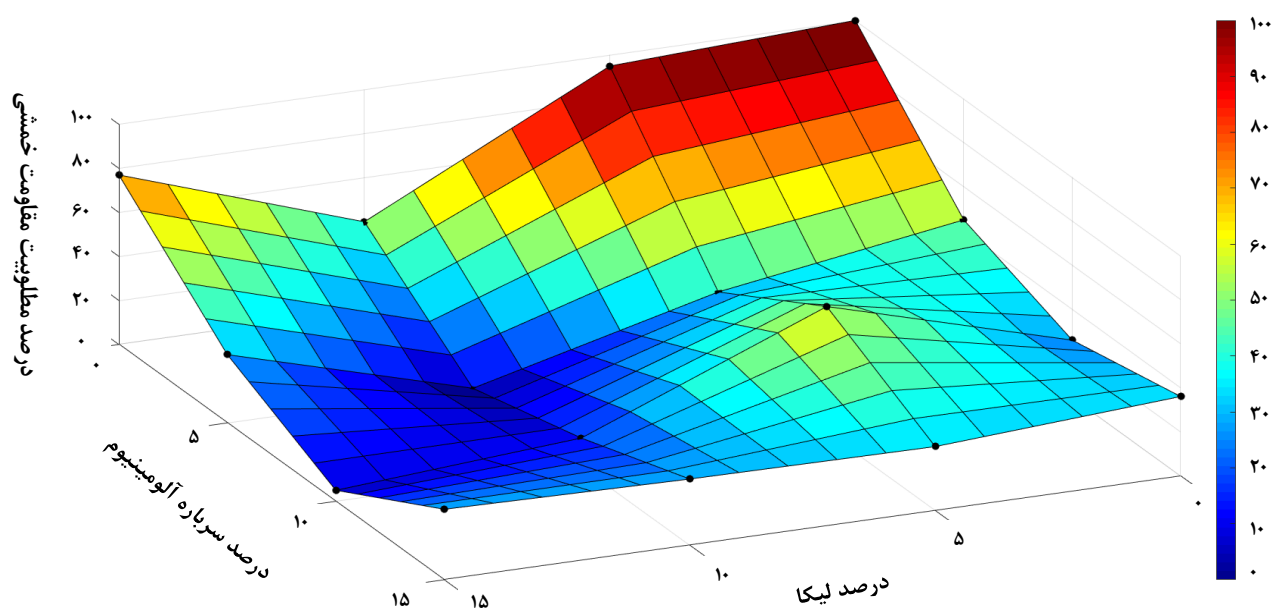
باتوجه به اینکه در این پژوهش از ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لیکا و سرباره استفاده شده است، داده‌های مربوط به مطلوبیت برای همین مقادیر در دسترس است. همان‌طور که در شکل ۹ تا شکل ۱۲ مشاهده می‌شود میزان مطلوبیت استفاده از ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لیکا و سرباره به صورت نقاط مشکی رنگ مشخص شده است و جهت بررسی سایر درصد‌های جایگزینی لیکا و سرباره درون‌یابی خطی صورت گرفته است.



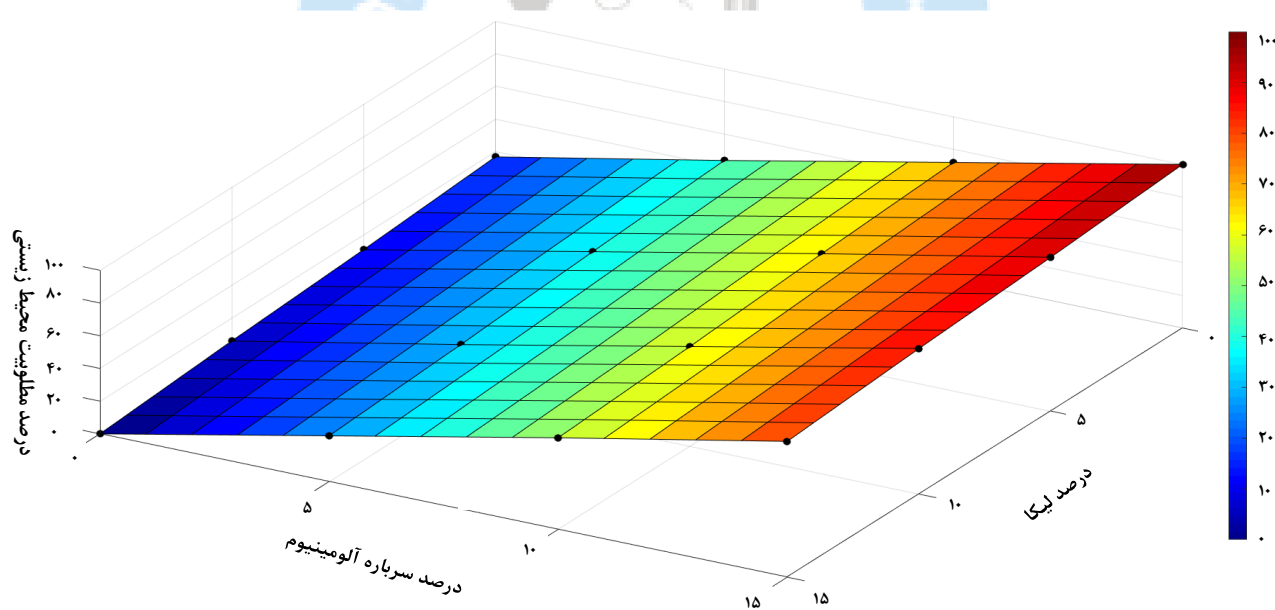
شکل ۹: نمودار درصد مطلوبیت مقاومت فشاری.

نمودار درصد مطلوبیت مقاومت فشاری در شکل ۹ قابل مشاهده است. مقادیر مطلوبیت مقاومت فشاری با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است. از این منحنی پوسته‌ای می‌توان برای تعیین درصد بهینه لیکا و سرباره در نمونه ملات، درحالی که کمترین افت مقاومت فشاری اتفاق بیفتد، استفاده کرد. مشخص است که هرچه میزان افت مقاومت فشاری بیشتر باشد، نمونه مورد نظر مطلوبیت کمتری خواهد داشت. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود کمترین مطلوبیت مقاومت فشاری مربوط به نمونه L5A10 بوده و نمونه LOA0 (نمونه شاهد) و پس از آن نمونه L15A0 بیشترین مطلوبیت مقاومت فشاری را دارد. باتوجه به این مسئله می‌توان گفت که هرچه مقدار سرباره آلومینیوم کمتر و مقدار لیکا در طرح اختلاط بیشتر باشد، نمونه مورد نظر از مطلوبیت مقاومت فشاری بیشتری برخوردار خواهد بود.

با توجه به معادله (۲) درصد مطلوبیت مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی لیکا و سرباره آلومینیوم محاسبه شده است. نمودار درصد مطلوبیت مقاومت خمشی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. باتوجه به نمودار مطلوبیت مشخص است که افزایش مقدار لیکا و سرباره در طرح اختلاط سبب کاهش مطلوبیت مقاومت خمشی می‌شود؛ بنابراین جهت دستیابی به درصد بهینه استفاده از این مصالح باید دقت لازم صورت گیرد. مطابق نمودار نمونه L5A0 دارای کمترین میزان افت مقاومت خمشی بوده و در نتیجه بیشترین مطلوبیت بعد از نمونه شاهد را دارد. کمترین مطلوبیت مقاومت خمشی هم مربوط به نمونه L10A5 است. این مسئله نشان دهنده این است که نمونه L5A0 مقاومت خمشی بهینه‌ای را نتیجه می‌دهد و از مطلوبیت خوبی برخوردار است اما نمونه L10A5 سبب کاهش شدید مقاومت شده و در نتیجه عدم مطلوبیت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.



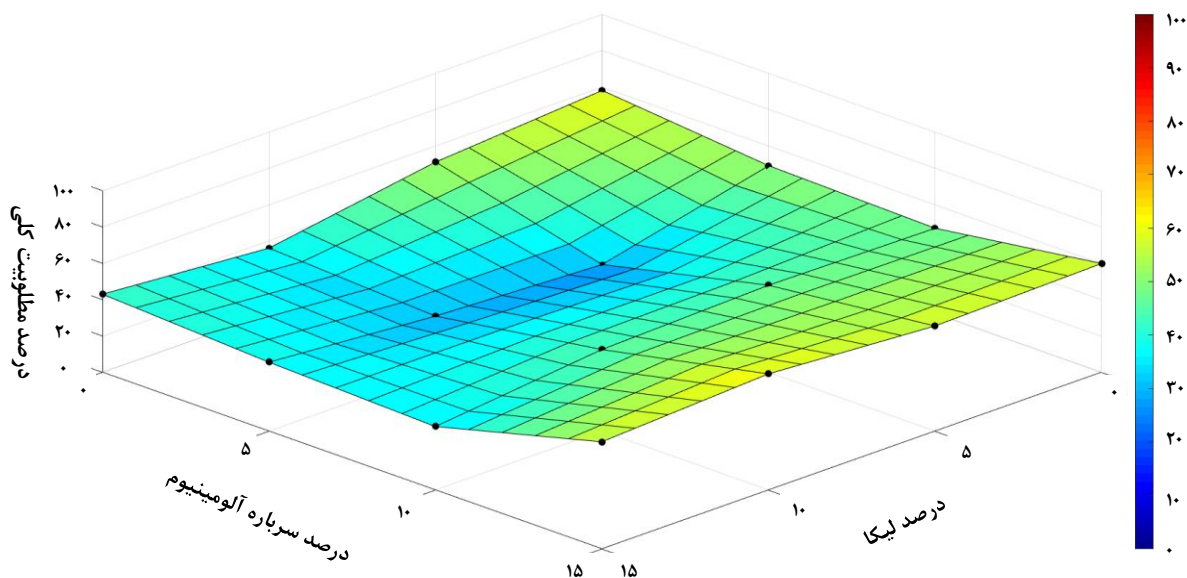
شکل ۱۰: نمودار درصد مطلوبیت مقاومت خمشی.



شکل ۱۱: نمودار شاخص مطلوبیت محیط زیستی.

مطابق مطالب ذکر شده سرباره آلومینیوم تولید شده در فرایند استخراج آلومینیوم اثرات مخرب زیست محیطی زیادی در پی دارد. چنانچه سرباره بیشتری در ملات دفن شود، مقادیر کمتری از سرباره در محیط زیست رها شده و در نتیجه اثرات مخرب ناشی از آن کمتر خواهد شد. از طرفی استفاده از لیکا سبک شدن نمونه‌ها و بهبود فرایند عمل آوری داخلی شده است اما تولید لیکا همواره با صرف انرژی زیادی همراه است. به همین دلیل فرایند تولید لیکا اثرات منفی زیست محیطی در پی دارد. درصد مطلوبیت محیط زیستی مطابق معادله (۳)

محاسبه شده است. بنابراین همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است هرچه درصد بیشتری از سرباره آلومینیوم و درصد کمتری از لیکا به طرح اختلاط افزوده شده است، درصد مطلوبیت بیشتر شده به طوری که اگر از ۱۵ درصد سرباره آلومینیوم و ۰ درصد لیکا استفاده شود مطلوبیت محیط زیستی ۱۰۰ درصد خواهد بود و اگر نمونه فاقد سرباره آلومینیوم و حاوی ۱۵ درصد لیکا باشد مطلوبیتی در پی نخواهد داشت.



شکل ۱۲: نمودار درصد مطلوبیت کلی.

جدول ۴: نتایج درصد مطلوبیت کلی.

سرباره آلومینیوم				درصد جایگزینی (%)	سند گانه لیکا
۱۵	۱۰	۵	۰		
۵۹/۸	۴۷/۵	۴۹/۸	۵۸/۳	۰	
۵۷/۶	۴۷/۷	۲۶/۹	۵۰/۶	۵	
۶۳/۹	۴۴/۶	۳۱/۴	۳۵/۸	۱۰	
۵۸/۷	۳۵/۱	۳۸/۰	۴۳/۳	۱۵	

در شکل ۱۲ و جدول ۴ درصد مطلوبیت کلی قابل مشاهده است. مطلوبیت کلی حاصل در نظر گرفتن مطلوبیت مقاومت فشاری، مطلوبیت مقاومت خمشی و مطلوبیت محیط زیستی به طور همزمان است. مطابق مطالبی که پیش تر ذکر شد هرچه مقدار سرباره آلومینیوم کمتر و لیکا بیشتر باشد مطلوبیت مقاومت فشاری بیشتری را نتیجه می‌دهد؛ این در حالی است که حداکثر مطلوبیت محیط زیستی زمانی

تأمین می شود که مقدار استفاده از سرباره حداکثر و لیکا حداقل باشد. از طرفی دیگر افزایش درصد سرباره و لیکا مطلوبیت خمشی کمتری را نتیجه می داد. بنابراین جهت دستیابی به مطلوبیت کلی لازم است ضرایب میزان اهمیت (α) تعیین شود. مقدار درصد مطلوبیت کلی مطابق معادله (۴) قابل محاسبه است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است کمترین درصد مطلوبیت کلی (۲۶/۹ درصد) مربوط به نمونه L5A5 و بیشترین درصد مطلوبیت کلی مربوط به نمونه L10A15 بوده که برابر با ۶۳/۹ درصد است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی طرح اختلاطهایی از ملات که شامل ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لیکا و سرباره آلومینیوم بود، صورت گرفت. جهت انجام آزمایشها ۹۶ عدد نمونه ساخته و مورد آزمون قرار گرفته شد. با بررسی اثرات مختلف درصدهای متفاوت سرباره و لیکا در دو مشخصه مقاومت فشاری و خمشی و همچنین بررسی سودمندی استفاده از این مصالح مقادیر درصد مطلوبیت مقاومت مکانیکی و اثرات محیطزیستی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر مشاهده شد:

(۱) با افزایش سرباره آلومینیوم مقاومت مکانیکی نمونهها در همه حالتها کاهش یافته است. به طور میانگین می توان گفت نمونههای حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سرباره به ترتیب کاهش مقاومت فشاری در حدود ۱۸/۶، ۳۳/۷ و ۳۱ درصد نسبت به نمونههای فاقد سرباره آلومینیوم و کاهش مقاومت خمشی در حدود ۱۷/۵، ۱۷/۸ و ۱۵/۵ درصدی نسبت به نمونههای شاهد شده است.

(۲) وجود لیکا به تنهایی در طرح اختلاط باعث کاهش جزئی مقاومت مکانیکی شد. اما در صورتی که درصدهای متفاوت لیکا و سرباره به صورت همزمان در ملات وجود داشته باشد، لیکا می تواند تا حدودی باعث بهبود نتایج شود. به طوری که استفاده از ۱۵ درصد لیکا در حضور ۵ درصد سرباره در نمونه سبب دسترسی به حداکثر مقاومت فشاری شده است. از طرفی وجود ۵ درصد لیکا به همراه ۱۰ درصد سرباره بیشترین مقاومت خمشی را در میان سایر نمونههای دارای لیکا و سرباره حاصل کرده است.

(۳) هرچه میزان افت مقاومت فشاری بیشتر باشد، نمونه مورد نظر مطلوبیت فشاری کمتری خواهد داشت؛ بنابراین کمترین مطلوبیت مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد لیکا و ۱۰ درصد سرباره بوده است. از طرف دیگر نمونه حاوی ۱۵ درصد لیکا و فاقد سرباره بیشترین مطلوبیت مقاومت فشاری را در میان نمونههای حاوی لیکا و سرباره داشته است.

(۴) هرچه میزان افت مقاومت خمشی کمتر باشد، مطلوبیت خمشی نمونه مورد نظر بیشتر خواهد بود به همین دلیل نمونه حاوی ۵ درصد لیکا و فاقد سرباره مقاومت خمشی بهینه ای را نتیجه می دهد و از مطلوبیت خمشی خوبی برخوردار است اما نمونه حاوی ۱۰ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره سبب کاهش شدید مقاومت خمشی شده و در نتیجه عدم مطلوبیت خمشی بیشتری نسبت به سایر نمونهها دارد.

(۵) هر چند استفاده از سرباره آلومینیوم سبب کاهش مقاومت مکانیکی شده است، اما به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی کمک می کند. از طرفی همان طور که بیان شد وجود درصدهای مختلف لیکا تا حدودی باعث بهبود نتایج مقاومت مکانیکی شده است اما مطلوبیت محیطزیستی در پی نخواهد داشت؛ بنابراین هرچه میزان استفاده از سرباره آلومینیوم در ملات بیشتر باشد، درصد مطلوبیت محیطزیستی افزایش می یابد. در مقابل وجود مقادیر بیشتر لیکا در طرح اختلاط سبب کاهش درصد مطلوبیت محیطزیستی خواهد بود.

(۶) مطلوبیت کلی حاصل در نظر گرفتن مطلوبیت مقاومت فشاری، مطلوبیت مقاومت خمشی و مطلوبیت محیط زیستی به طور همزمان است. به طور کلی نمونه حاوی ۱۰ درصد لیکا و ۱۵ درصد سرباره بیشترین مطلوبیت کلی و نمونه حاوی ۵ درصد لیکا و ۵ درصد سرباره کمترین مطلوبیت کلی را داشته است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان قدردانی خود را از حمایت مالی شرکت لیکا تحت قراردادهای شماره ۰۴/۲۰۸۶/ت/ق، ۰۴/۲۰۸۷/ت/ق و ۰۴/۲۰۸۸/ت/ق اعلام می‌نمایند. همچنین از دانشگاه اراک برای تامین تجهیزات و شرایط لازم برای انجام این تحقیقات تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] V. Sousa, et al., (2023) Industrial production of recycled cement: Energy consumption and carbon dioxide emission estimation. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(4): p. 8778-8789.
- [2] Y. Liu, et al., (2017) Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*. 148: p. 140-147.
- [3] S. Javali, et al., (2017) Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19: p. 2291-2304.
- [4] M.S. Reddy and D. Neeraja, (2016) Mechanical and durability aspects of concrete incorporating secondary aluminium slag. *Resource-Efficient Technologies*. 2(4): p. 225-232.
- [5] G. Pachideh, M. Gholhaki, and A. Moshtagh, (2019) On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag. *Journal of Building Engineering*. 24: p. 100757.
- [6] G. Pachideh and V. Toufigh, (2022) Strength of SCLC recycled springs and fibers concrete subject to high temperatures. *Structural Concrete*. 23(1): p. 285-299.
- [7] M. Khalily, et al., (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): p. 284-307.
- [8] G. Pachideh and H. Ketabdari, (2023) Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 27(14): p. 4026-4045.
- [9] G. Pachideh, et al., (2024) Compressive strength ratios of concretes containing pozzolans under elevated temperatures. *Heliyon*. 10(5).
- [10] Z. Ahmed, et al., (2019) An experimental study on internal curing of concrete using light expanded clay aggregate. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*. 6: p. 1-5.
- [11] C. Muñoz-Ruiperez, et al., (2016) Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 118: p. 139-145.
- [12] R. Anilkumar, P. Prakash, and R. Gowda. Durability Performance of Structural Light Weight Concrete. in *Sustainable Construction and Building Materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018*. 2019. Springer.
- [13] K.-S. Youm, et al., (2016) Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Construction and building materials*. 114: p. 517-527.
- [14] Y. Mohammadi, et al., (2015) The Effect of Silica Fume on the Properties of Self-Compacted Light weight Concrete. *Current World Environment*. 10(1): p. 381-388.
- [15] J.T. Kevern and Q.C. Nowasell, (2018) Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*. 161: p. 229-235.
- [16] A. Babcock and P. Taylor, (2015) Impacts of internal curing on concrete properties: Literature review.
- [17] ASTM C150, (2012), Standard specification for portland cement. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [18] ASTM C33, (2023), Specification for Concrete Aggregates, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [19] ASTM C330, (2012) , Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [20] K. Kovler and O.M. Jensen, (2005) Novel techniques for concrete curing. *Concrete International*. 27(9): p. 39-42.
- [21] H. Lam, (2005) Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability.
- [22] D. Cusson and T. Hoogeveen, (2008) Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Research*. 38(6): p. 757-765.
- [23] M. American Concrete Institute: Farmington Hills, Specifications for curing concrete. 2011.
- [24] ASTM C136, (2015) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [25] ASTM C192, (2015) Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [26] ASTM C109, (2020) Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.