Iranian Concrete Society

Durability and Performance Evaluation of Lightweight Self-Compacting Concrete Using Artificial and Natural Lightweight Aggregates in Sulfuric Acid Environment: An Experimental and Analytical Study

***Emad Tavakoli*[1] *, Mansor Fakhri*[2*]**

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, K.N. toosi University of Technology, Tehran, Iran
2-Professor, Department of Civil Engineering, K.N. toosi University of Technology, Tehran, Iran
Email: fakhri@kntu.ac.ir
***Received**: 08 December 2022* ***Revised**: 05 February 2024* ***Accepted**: 06 February 2024*
Research paper

ABSTRACT

Efforts to reduce the weight of concrete have led to extensive research on lightweight concrete. Reducing concrete weight can decrease the overall structure weight, thereby reducing the applied forces. This study investigates the effects of two lightweight aggregates, Leca and Scoria, on the properties of self-compacting concrete in both fresh and hardened phases, as well as its durability in sulfuric acid environments. Fresh concrete tests included slump flow, T50 slump, L-box, U-box, J-ring, and specific weight, while hardened samples were evaluated for compressive strength in both normal and acidic conditions, along with weight loss in acidic environments. Results indicated that three key factors influencing concrete performance are specific weight, appearance, and water absorption percentage of the aggregates. Scoria light-weight concrete demonstrated approximately 60% greater strength compared to Leca when using equal volumes of both aggregates. In acidic environments, the most significant reduction in compressive strength for Leca occurred between 1 and 7 days, approximately 27%, while for Scoria, this reduction was observed between 7 and 28 days at about 25%. This highlights that the acidic environment has a greater impact on the strength reduction of Leca in the early days and on Scoria in the later stages. Furthermore, the highest weight loss for both concrete types in acidic conditions was noted between 1 and 14 days, reaching approximately 93%, while only a 7% weight reduction occurred between 14 and 28 days. Notably, compared to their initial weight, the samples exhibited a minimal weight loss of about 1% to 2%.

Keywords: Light concrete, self-compacting concrete, Durability of concrete, Scoria lightweight aggregate, LECA lightweight aggregate

***Corresponding Auther: Mansor Fakhri2**
Tavakoli, E., Fakhri, M. Durability and Performance Evaluation of Lightweight Self-Compacting Concrete Using Artificial and Natural Lightweight Aggregates in Sulfuric Acid Environment: An Experimental and Analytical Study. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(2): 1-16. http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.375958.1307
2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

بررسی دوام و عملکرد بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه‌های مصنوعی و طبیعی در محیط اسیدسولفوریک: یک مطالعه تجربی و تحلیلی

عماد توکلی[1]، منصور فخری[2*]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲-استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول : fakhri@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تلاش برای کاهش وزن بتن منجر به تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بتن‌های سبک شده است. کاهش وزن بتن می‌تواند منجر به کاهش وزن سازه و در نتیجه کاهش نیروی وارده به آن گردد. در این مطالعه، اثرات دو سبک‌دانه لیکا و اسکوریا بر خواص بتن خودتراکم در فازهای تازه و سخت‌شده و همچنین دوام آن در محیط اسید سولفوریک بررسی شده است. آزمایش‌های بتن تازه شامل جریان اسلامپ، اسلامپ T50، جعبه L، جعبه U، حلقه J و وزن مخصوص بوده و آزمایش‌های مقاومت فشاری در حالت عادی و محیط اسیدی و کاهش وزن در محیط اسیدی برای نمونه‌های سخت‌شده بررسی گردید. نتایج نشان داد که سه عامل تأثیرگذار بر کارایی بتن شامل وزن مخصوص، شکل ظاهری و درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها است. بتن سبک اسکوریا با حجم یکسان، حدود ۶۰٪ مقاومت بیشتری نسبت به لیکا دارد. در محیط اسیدی، بیشترین کاهش مقاومت بتن لیکا در ۱ تا ۷ روزگی با ۲۷٪ و برای بتن اسکوریا در ۷ تا ۲۸ روزگی با ۲۵٪ رخ می‌دهد، که نشان می‌دهد تأثیر محیط اسیدی بر لیکا بیشتر در روزهای ابتدایی و بر اسکوریا در روزهای بعدی است. همچنین، بیشترین کاهش وزن نمونه‌های قرار گرفته در محیط اسیدی برای هر دو بتن، بین سن ۱ تا ۱۴ روزه رخ می‌دهد و حدود ۹۳٪ است؛ در حالی که بین سن ۱۴ تا ۲۸ روز تنها حدود ۷٪ کاهش وزن مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که نسبت به وزن اولیه، نمونه‌ها حدود ۱٪ تا ۲٪ کاهش وزن دارند که این کاهش وزن بسیار ناچیز است.

کلمات کلیدی: بتن سبک، بتن خودتراکم، دوام بتن، سبکدانه اسکوریا سبکدانه لیکا

۱- مقدمه

بتن به دلیل نفوذ ناپذیری در دسترس بودن و هزینه مناسب مهمترین مصالح ساختمانی در صنعت ساختمان است. با این وجود وزن بالای این ماده در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی باعث می‌شود در برخی موارد غیر قابل اجرا باشد. علاوه بر این امروزه مواد و ابزارهای ساختمانی با کارایی بالا توسعه یافته اند [۱۲]. استفاده از سنگدانه‌های سبک طبیعی و مصنوعی روشی موثر برای کاهش وزن بتن می‌باشد. توسعه انواع مختلف بتن خودتراکم (SCC) با عملکرد بالا و بتن کم وزن (LWC) برای ساختمان‌ها ضروری است [۳]. این مزایا بسیار زیادی دارد بتن سبک می‌تواند وزن کل ابعاد عناصر سازه‌ای و کل هزینه ساخت یک ساختمان را کاهش دهد. همچنین می‌تواند با کاهش بار مرده سازه مقاومت ساختمان را در برابر زلزله افزایش دهد. بتن خودتراکم مزایای بسیار خوبی از جمله راندمان و نرخ تولید بالا و نیاز به زمان کم برای ساخت دارد. همچنین به‌عنوان بتن درجا با عملکرد مناسب بدون نیاز به لرزش قابل اجرا می‌باشد. همچنین بتن خودتراکم کم وزن (LWSCC) دارای مزیت مشابهی است [۴]. آذری جعفری و همکاران[1] [۵] از مواد پوزولانی در بتن خودتراکم استفاده کردند و نشان دادند که نتیجه آزمایش قیف V با افزودن این مواد کاهش می‌یابد. وان و همکاران[2] [۶] اثر سنگدانه‌های پرلیت اسکوریا و پلی استایرن را بر روی خواص بتن خودتراکم در فازهای تازه و سخت بررسی کرد. سنگدانه‌های رسی منبسط شده سبک وزن به‌عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های معمولی بتن خودتراکم توسط نپوموچنو و همکاران[3] استفاده شد. [۷]. آن‌ها نشان دادند که عملکرد رضایت بخشی را می توان با توزیع یکنواخت سنگدانه‌های سبک در هنگام انجام تجزیه و تحلیل جداسازی پویا و استاتیک نشان داد.به گفته بسیاری از کارشناسان مقاومت فشاری به تنهایی پاسخگوی تمام ویژگی‌های بتن مانند دوام آن نیست. برای این امر لازم است که علاوه بر مقاومت بتن دوام آن نیز در نظر گرفته شود. در سال‌های گذشته مطالعات متعددی در مورد عوامل موثر بر مقاومت بتن سبک انجام شده و تأثیر این عوامل بر روی بتن سبک مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است.

هوبرتووا و هلا[4] [۸] تأثیر محیط‌های گازی و مایع تهاجمی شیمیایی (سولفات بسیار غلیظ یون کلرید گاز خودرو نفت و گاز CO_2 و SO_2) را بر دوام و مقاومت بتن‌های سبک مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از خاکستر زغال سنگ بر مقاومت و دوام بتن سبک در یک محیط خورنده موثر است. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که با جایگزینی خاکستر بادی به نسبت ۴۰ درصد حجم سیمان و استفاده از مخلوط اصلاح‌شده با متاکائولین به نسبت ۵ درصد حجم سیمان بتن در برابر خوردگی بسیار مقاوم است. مطالعات در زمینه خوردگی بتن در برابر اسیدسولفوریک آغاز شدند و این آغاز به تحقیقات پارکر در سال ۱۹۴۵ و کشف باکتری‌های عامل خوردگی مربوط می‌شود[۹].

پس از انجام چندین مطالعه مشخص شد که تخریب بتن ناشی از اسیدسولفوریک شامل دو مرحله است [۱۰]. در مرحله اول اسیدسولفوریک هیدراته می‌شود و با محصولات هیدراتاسیون مانند هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته واکنش نشان می‌دهد و گچ ($CaSO_4, 2H_2O$) تولید می‌کند. در مرحله دوم گچ با آلومینات تری کلسیم (C_3A) واکنش داده و اترینگایت (C6AS3H32) تولید می‌کند. در مقایسه با محصولات اولیه گچ و اترینگایت حجیم هستند. این امر باعث انبساط و ایجاد ترک در بتن می‌شود که به نوبه خود منجر به کاهش مقاومت عضو می‌شود. اگرچه تشکیل گچ با افزایش حجم همراه است [۱۱۱۲] برخی از محققین معتقدند که این واکنش نقش جزئی در فرآیند خوردگی و واکنش بین گچ و آلومینات کلسیم هیدراته را ایفا می‌کند که به تشکیل اترینگایت منجر می‌شود و این موضوع بسیار خطرناکتر است[۱۳]. حجم استخراج اترینگایت چندین برابر بیشتر از حجم

[1] Jafari, Tajadini, Berenjian.

[2] Wan, Aslani, Ma.

[3] Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira, Pereira.

[4] Hubertová, Hela.

مواد اولیه است. برخی از محققین افزایش حجم را ۲ برابر کرده اند [۱۳] درحالی‌که برخی دیگر حتی ۷ برابر افزایش را اعلام کرده اند [۱۱]. بنابراین تشکیل اترینگایت دلیل اصلی انبساط است که منجر به افزایش فشار داخلی و در نتیجه تخریب ماتریس بتن می‌شود. همچنین هنگامی که بتن توسط اسیدسولفوریک مورد تهاجم قرار می‌گیرد گچ در لایه تخریب شده رسوب می‌کند و توانایی اسید برای ورود به بتن را کاهش می‌دهد. در مطالعه‌ای که توسط مونتنی و همکاران[5] انجام شد. [۱۴] در سال ۲۰۰۰ آزمایشات شیمیایی میکروبیولوژیکی و در محل در مورد خوردگی بتن در یک محیط اسیدی انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن دوده سیلیس باعث افزایش دوام در برابر اسیدسولفوریک می‌شود. چندین مطالعه دیگر نیز اجرا شد که تأثیر مثبت دوده سیلیس را تأیید کرد [۱۵۱۶] که البته این موضوع مطلق نیست. در مطالعه دیگری که توسط هیوید و همکاران[6] اجرا شد [۱۷] تأثیر پارامترهای طراحی اختلاط مانند نسبت آب به سیمان میزان سیمان تأثیر درجه اسیدیته (pH) و غیره بر مقاومت بتن در برابر اسیدسولفوریک مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج تجربی آن‌ها خوردگی با افزودن مقدار سیمان افزایش می‌یابد.

بررسی مقاومت بتن خودتراکم سبک با استفاده از دو سبکدانه لیکا و اسکوریا در محیط اسیدسولفوریک اهمیت زیادی دارد. در برخی محیط‌های صنعتی و تصفیه‌آب اسیدسولفوریک حضور دارد که می‌تواند باعث خوردگی و تضعیف ساختار بتن شود. بتن خودتراکم سبک با ویژگی‌های خاص خود به‌عنوان یک جایگزین مطلوب در برابر خوردگی در این محیط‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هدف این مطالعه بررسی میزان مقاومت بتن خودتراکم سبک حاوی سبکدانه لیکا و اسکوریا در برابر تأثیرات اسیدسولفوریک است. با تحلیل و مقایسه نتایج می‌توان به تأثیر هر سبکدانه در مقاومت بتن در محیط اسیدی پی برد و بهبودهای ممکن در فرمولاسیون بتن خودتراکم سبک را شناسایی کرد. این پژوهش می‌تواند به توسعه بتن‌های مقاوم در برابر خوردگی و بهبود عملکرد سازه‌های در محیط‌های صنعتی و تصفیه‌آب کمک کند.

در این تحقیق اثرات لیکا و اسکوریا بر خواص بتن تازه و سخت خودتراکم بررسی شده است. مطالعات زیادی در مورد استفاده از سنگدانه‌های سبک وزن مختلف در بتن خودتراکم انجام شده است. این مطالعات اثر افزودن این سنگدانه‌ها را در فازهای تازه و سخت شده ارائه کرده است [۱۸۱۹]. در این تحقیق دو نوع سنگدانه سبک (اسکوریا و لیکا) با درصدهای مختلف به بتن خودتراکم اضافه شده است تا دوام استحکام و کارایی آن‌ها بررسی شود.

۲- برنامه آزمایشی

۲-۱- مواد مورد استفاده

۲-۱-۱- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع دو شرکت سیمان مشهد استفاده شده است. بر اساس استاندارد ASTM C150 [۲۰] با تجزیه و تحلیل شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ تولید شد.

۲-۱-۲- میکروسیلیس

در این تحقیق از پودر میکروسیلیس با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

---

[5] Monteny, Vincke, Beeldens, Belie, Taerwe, Gemert, Verstraete.

[6] Hewayde, Nehdi, Allouche, Nakhla.

۳-۱-۲- پودر سنگ آهک

در این تحقیق از پودر سنگ آهک با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

۴-۱-۲- سبکدانه‌ها

سنگدانه‌های سبک وزن مورد استفاده در این مطالعه رس منبسط شده (لیکا) و اسکوریا هستند (شکل ۱). سنگدانه‌های سبک وزن لیکا با انبساط خاک رس در کوره در دمای بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به‌دست آمده است. تخلخل بزرگ در دانه‌های لیکا حدود ۷۳٪ تا ۸۸٪ فضای کل سبکدانه را تشکیل می‌دهد. این تخلخل برخی ویژگی‌ها را برای لیکا ایجاد کرد مانند هدایت حرارتی کم وزن کم و افت صدای کم. لیکا مورد استفاده در این تحقیق دارای حداکثر اندازه ۱۲,۵ میلی‌متر با جذب آب ۲۴ ساعته معادل ۲۲ درصد و وزن مخصوص ۶۷۴ کیلوگرم‌برمترمکعب است. دانه بندی سنگدانه‌های لیکا مورد استفاده در این مطالعه توسط استاندارد ASTM C33/C33-18 [۲۱] انجام شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است و تجزیه و تحلیل شیمیایی آن‌ها در جدول۱ نشان داده شده است.

اسکوریا یکی از قدیمی‌ترین سنگدانه‌های سبک است که در بتن استفاده می‌شود. این سنگدانه سبک در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخازن آب مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و سرد شدن این مواد ایجاد می‌شود و رنگ آن قهوه‌ای مایل به خاکستری تیره است. اسکوریا مورد استفاده در این تحقیق دارای حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر با جذب آب ۲۴ ساعته معادل ۱۳ درصد و وزن مخصوص ۱۵۸۴ کیلوگرم‌برمترمکعب است. دانه بندی سنگدانه‌های اسکوریا مورد استفاده در این مطالعه توسط استاندارد ASTM C33/C33-18 [۲۱] انجام شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است و تجزیه و تحلیل شیمیایی آن‌ها در جدول۱ نشان داده شده است.

الف) اسکوریا

ب)لیکا

شکل ۱- شکل ظاهری اسکوریا و لیکا

جدول ۱ خواص شیمیایی مصالح مورد استفاده سیمان پودر سنگ آهک لیکا و اسکوریا

ترکیب شیمیایی	L.O.I	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	SiO_3
سیمان (٪)	۱,۳۳	۲۱,۷	۴,۶۲	۳,۹۵	۱,۲۵	۲,۷۸	۰,۶۱	۰,۶۲	۰,۲۶	۰,۰۹	-	-	-
میکروسیلیس (٪)	۲,۳۱	۹۴,۲۵	۰,۲۳	۰,۸۴	۰,۷۸	۰,۳۵	۰,۱۳	۰,۵۶	۰,۱۸	-	۰,۰۱	-	-
پودر سنگ آهک (٪)	۷,۲۶	۶,۵	۰,۱۱	۰,۰۶	۸,۰۶۹	۰,۰۴	۱,۲	۰,۷۲	۰,۳۶	۰,۰۱	-	-	-
اسکوریا (٪)	۵,۶۲	۶۰,۸	۱۷	۳,۴	۳,۵	۲,۵	-	۲,۳۱	۳,۹	۰,۴۹	۰,۴۷	۰,۰۴	-
لیکا (٪)	-	۶۶,۵	۱۶,۵۷	۷,۱۰	۲,۴۶	۱,۹۹	-	۲,۶۹	۰,۶۹	۰,۷۸	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۰۳

جدول ۲- توزیع اندازه ذرات لیکا اسکوریا و ماسه

	لیکا	اسکوریا
سایز الک(میلی‌متر)	درصد عبوری	درصد عبوری
۱۲,۵	۹۸,۵	۹۵,۸
۹,۵	۴۴,۵	۶۲,۴
۴,۷۵	۱۴,۵	۱۰,۳
۲,۳۶	۲,۵	۱,۲

۵-۱-۲- ماسه

در این مقاله از ماسه رودخانه ای با حداکثر قطر ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شده است که وزن مخصوص ظاهری حالت اشباع با سطح خشک برابر با ۲۶۸۳ کیلوگرم‌برمترمکعب جذب آب ۲۴ ساعته آن ۲/۹٪ و مقدار مدول‌نرمی آن ۳/۴ است. آزمون دانه بندی کل بر اساس استاندارد ASTM C33/C33M-18 [۲۱] انجام شد است.

۶-۲-۱- آب و ماده افزدونی

آب مورد استفاده در این تحقیق برای تولید بتن با رعایت استاندارد ASTM D1129 [۲۲] مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین یک کاهنده آب بر پایه پلی کربوکسیلات نیز برای افزایش جریان‌پذیری مخلوط‌ها با وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم‌برمترمکعب استفاده شد.

۲-۲- طرح‌های مخلوط

در این مقاله نسبت اختلاط بر اساس ACI 237R-07 [۲۳] به‌دست آمده است. از آنجا که بتن خودتراکم باید نیازهای جریان‌پذیری قابلیت عبوری و مقاومت در برابر جداشدگی را فراهم کند. در آزمایشگاه چندین طرح آزمایشی برای تعیین مقدار مواد و مصالح برای ساخت چنین طرحی مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف اصلی این تحقیق تولید بتن سبک بود بنابر این سبکدانه لیکا

و اسکوریا با سه مقدار ۲۰ ۳۰ ۴۰ و ۵۰ درصد به این صورت که مقادیر آب سیمان پودر سنگ آهک میکروسیلیس فوق روان‌کننده ثابت است و درصدای ذکر شده سبکدانه‌ها با مقدار ماسه جایگزین می‌شوند. همچنین نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظرگرفته شده است.(جدول ۳)

لازم به ذکر است که سنگدانه‌های سبک استفاده شده زمان کافی برای جذب آب داشتند و سپس سطوح آن‌ها قبل از افزودن به مخلوط خشک شد. ابتدا یک‌سوم آب مصرفی به مخلوط حاوی سبکدانه ماسه سیمان میکروسیلیس و پودر سنگ آهک همان‌طور که در بالا ذکر شد به خوبی مخلوط شدند. سپس یک‌سوم دیگر از آب مصرف شده با روان کننده حل و به مخلوط اضافه شده است. در نهایت یک‌سوم باقیمانده آب مصرفی اضافه شد. کل زمان اختلاط حدود ۶ تا ۷ دقیقه بود.

جدول ۳- طرح مخلوط‌های بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه لیکا و اسکوریا

طرح مخلوط	سیمان (kg)	پودر سنگ (kg)	میکروسیلیس (kg)	فوق روان (kg)	آب (lit)	ماسه (kg)	لیکا (kg)	اسکوریا (kg)
L20	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۹۸۸,۲	۱۳۴,۸	-
L30	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۷۱۹,۸	۲۰۲,۲	-
L40	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۴۵۱,۵	۲۶۹,۶	-
L50	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۱۸۳,۲۴	۳۳۷	-
S20	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۹۸۸,۲	-	۳۱۶,۸
S30	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۷۱۹,۸	-	۴۷۵,۲
S40	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۴۵۱,۵	-	۶۳۳,۶
S50	۴۵۰	۱۲۵	۶۸	۹	۲۰۲,۵	۱۸۳,۲۴	-	۷۹۲

۳-۲- روش های‌آزمایش بتن تازه و سخت

۱-۳-۲- آزمایش‌های بتن تازه

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها مانند آزمایش‌های جریان اسلامپ جعبه L جعبه U حلقه J و وزن مخصوص مطابق با استانداردهای EFNARC,ACI [۲۴۲۵] استفاده شد. هدف بررسی عملکرد بتن خودتراکم و بتن سبک خودتراکم تازه با دو نوع سنگدانه سبک لیکا و اسکوریا بود. تمامی آزمایشات در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام شد. همچنین برای تعیین قابلیت تغییر شکل بتن تحت وزن بدون محدودیت از آزمایش جریان اسلامپ استفاده شد.

وزن مخصوص بتن سبک را می‌توان بر اساس وزن واحد یا چگالی آن طبقه‌بندی کرد. طبق راهنمای کمیته ACI 213 برای بتن سبک سازه‌ای معمولاً در محدوده ۳۲۰ تا ۱۹۲۰ کیلوگرم‌برمترمکعب قرار می‌گیرد[۲۵]. سه تقسیم‌بندی مختلف از نوع بتن سبک از نظر دامنه مقاومت وجود دارد که عبارتند از: بتن‌های کم‌چگالی (۷-۲ مگاپاسکال) بتن‌های با مقاومت متوسط (۷-۱۴ مگاپاسکال) و بتن‌های سازه‌ای (۱۷-۶۳ مگاپاسکال). چگالی این بتن‌ها به ترتیب در محدوده ۳۰۰-۸۰۰ کیلوگرم‌برمترمکعب ۸۰۰-۱۳۵۰ کیلوگرم‌برمترمکعب و ۱۳۵۰-۱۹۲۰ کیلوگرم‌برمترمکعب است.

۲-۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت

آزمایشات این بخش برای ارزیابی عملکرد بتن سخت‌شده طراحی شده است. این آزمایش‌ها مقاومت فشاری در محیط آب معمولی

و مقاومت فشاری بعد از خارج شدن از محیط اسیدسولفوریک هستند. از آنجایی‌که هدف از این تحقیق بررسی تأثیر درصدهای مختلف سنگدانه‌های سبک بر مقاومت فشاری بتن سبک خودتراکم بوده و جنبه مقایسه‌ای دارد از مکعب ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. استفاده از مکعب های ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر برای آزمایش انطباق می‌تواند چنین مشکلاتی را کاهش دهد منظور از آزمایش انطباق اندازه‌گیری و ارزیابی تطابق و تشابه بین نمونه‌های مختلف بتن است. استفاده از مکعب‌های ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر آزمایشی عملیات آزمایشی را بهبود می‌بخشد و موجب بهره‌وری در مصرف مواد و زمان می‌شود. این باعث صرفه‌جویی در فضای ذخیره‌سازی و عمل آوری و همچنین زمان تست نمونه‌ها می‌شود. در نهایت لازم به ذکر است که نمونه‌های مکعبی ۱۰ × ۱۰ × ۱۰ سانتی متر مکعب بر اساس استاندارد BS 1881-116 [۲۶] برای آزمایش مقاومت فشاری در نظر گرفته شده است. این نمونه‌ها پس از ۲۴ از قالب خارج شده و در شرایط محیطی استاندارد ۳ ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. سپس این نمونه‌ها توسط جک فشاری با سرعت بارگذاری $0.3MPa.sec^{-1}$ با سه تکرار برای هر نمونه شکسته شدند.

پس از ۲۸ روز عمل آوری نمونه‌ها در محیط آب معمولی این نمونه‌ها از آب خارج شدند و ۴۸ ساعت در شرایط استاندارد خشک شدند و پس از انجام عملیات کپینگ روی تعدادی از نمونه‌ها برای سنجش مقاومت فشاری مجدداً همه نمونه‌ها داخل حوضچه‌های اسیدسولفوریک قرار گرفتند. شکل ۲ روش کپینگ کردن نمونه‌ها را که با استفاده از رزین انجام شده است نشان می‌دهد. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز قرار گرفتن در حوضچه اسیدسولفوریک (pH=5) از حوضچه خارج می شوند و سپس وزن و مقاومت فشاری نمونه‌ها از سن ۷ تا ۲۸ روز اندازه گیری می‌شود.

الف) کپینگ کردن نمونه‌ها

ب) نمونه کپینگ شده آماده

شکل ۲- فرآیند کپینگ کردن نمونه‌ها

۳- نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

در این بخش نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های بتن تازه ارائه شده است. از آنجایی‌که استاندارد خاصی برای بتن خودتراکم وجود ندارد بنابراین از EFNARC [۲۴] استفاده شده است همچنین برای آزمایش وزن مخصوص از استاندارد ACI 213R [۲۵] استفاده شده است. خواص پرشدگی و پایداری بتن خودتراکم در مورد بتن تازه با چهار ویژگی جریان‌پذیری ویسکوزیته نفوذپذیری و جداشدگی تعیین

می‌شود. یک یا چند آزمایش می‌تواند هر ویژگی را تعیین کند. در این تحقیق آزمایشاتی از جمله تست جریان اسلامپ تست اسلامپ T50 جعبه L جعبه U حلقه J و وزن مخصوص مطابق با EFNARC [۲۴] برای بررسی جریان‌پذیری ویسکوزیته و جداشدگی انجام شده است. نتایج نمونه‌های بتنی در شکل‌ها ۳ تا ۸ آورده شده است.

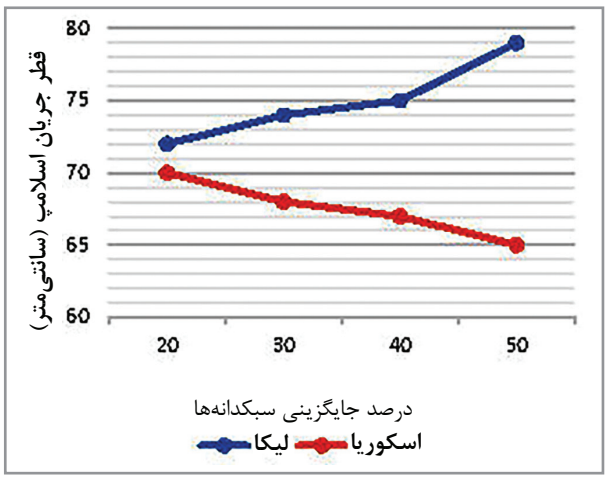
لازم به ذکر است که EFNARC [۲۴] مقدار مجاز آزمایش اسلامپ را در محدوده ۵۵۰-۸۵۰ میلی‌متر قرار داده است. با این حال سه دسته را به‌عنوان SF1 (۵۵۰-۶۵۰) برای اهداف خاص SF2 (۶۶۰-۷۵۰) برای کاربردهای معمولی مانند تیرها ستون‌ها و دیوارها و SF۳ (۷۶۰-۸۵۰) برای مکان هایی با تراکم بالای میلگرد و اشکال منحصر به فرد استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل۳ نشان داده شده است. تمامی طرح‌ها به جز طرح L50 در محدوده مجاز SF2 قرار دارند و طرح L50 در محدوده SF3 قرار دارد.

طبق EFNARC زمان آزمایش T50 باید بین ۲ تا ۵ ثانیه باشد. EFNARC همچنین جریان اسلامپ T50 را به دو کلاس VS1(T50 کمتر از ۲ ثانیه) و VS2 (T50 بیشتر از ۲ ثانیه) تقسیم می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است تمام طرح‌های مخلوط در محدوده مجاز کلاس VS2 قرار دارند.

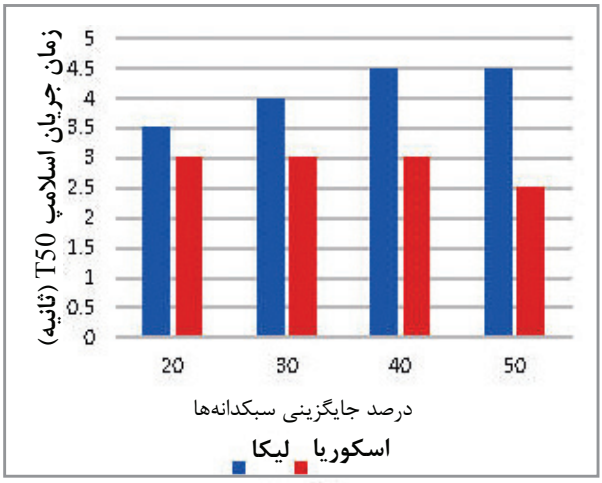
آزمایش جعبه L با سه میلگرد برای بررسی قابلیت عبور بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. EFNARC محدوده مجاز این آزمایش را بالاتر از ۰/۸ قرار می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی طرح‌های اختلاط در کلاس PA2 و در محدوده مجاز قرار دارند. لازم به ذکر است که در آزمایش جعبه L در هیچ یک از موارد انسدادی بین میله ها وجود نداشته است.

دو آزمایش حلقه J و جعبه U برای بررسی دقیق تر نفوذپذیری و پرشدگی بتن ساخته شده مطابق با EFNARC انجام شد. EFNARC آزمایش حلقه J را حداکثر اختلاف ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و آزمایش جعبه U۳۰ میلی‌متر گزارش کرد است. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. تمام نتایج در محدوده EFNARC هستند.

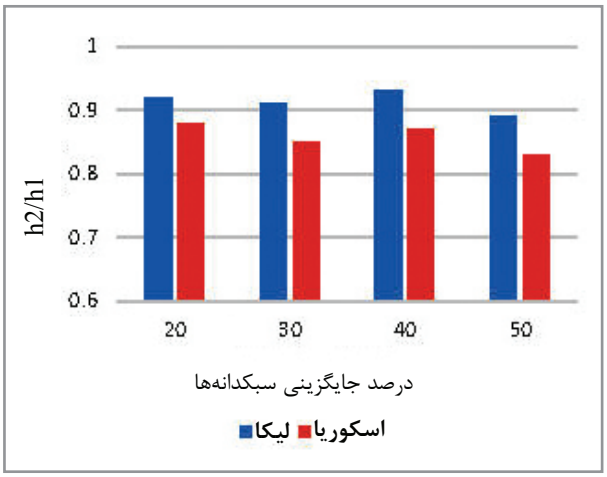
آزمایش وزن مخصوص بتن مطابق با استاندارد ACI213 انجام گرفت. مطابق با استاندارد وزن مخصوص بتن سبک باید بین ۳۲۰ تا ۱۹۲۰ باشد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است. تمام وزن مخصوص‌ها در محدوده بتن سبک هستند.



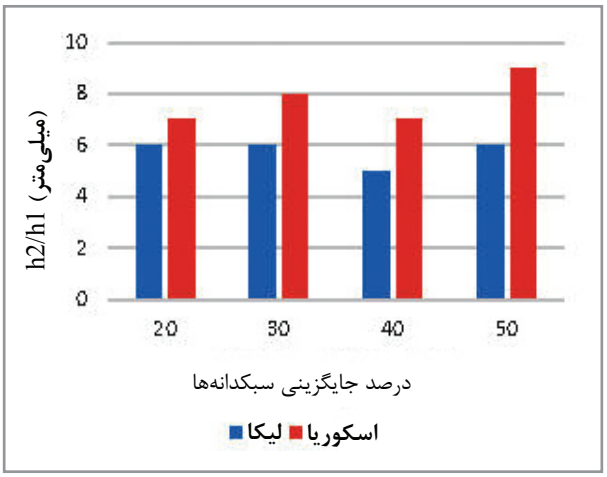
شکل ۳- تغییر قطر جریان اسلامپ



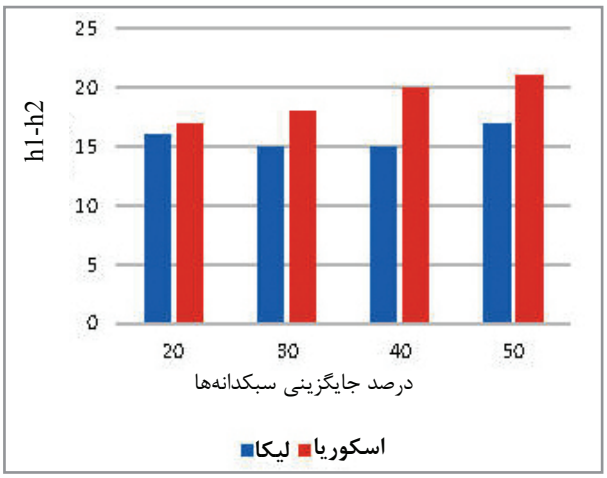
شکل ۴- تغییر زمان جریان اسلامپ T50



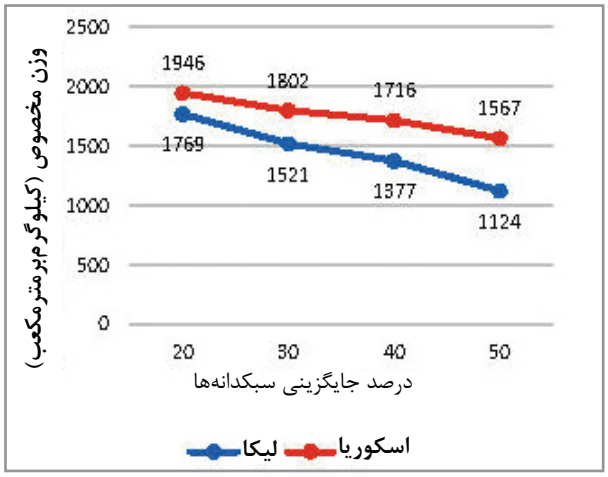
شکل ۵- تغییر مقدار نسبت ارتفاع آزمایش جعبه L



شکل ۶-مقدار تغییرات آزمایش حلقه J بتن سبک خودتراکم



شکل ۷- مقدار تغییرات آزمایش جعبه U بتن سبک خودتراکم



شکل ۸- مقایسه وزن مخصوص طرح‌های لیکا و اسکوریا

۲-۳- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

۱-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

قبل از اجرا طرح مخلوط‌ها طرح اولیه چندین بار آزمایش و اصلاح گردید تا بهترین نتایج از نظر کارایی و مقاومت را کسب کند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای سه سن عمل آوری شده ۳ ۷ و ۲۸ روزه به‌دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم سبک

طرح مخلوط	سن ۳ روزه (مگاپاسکال)	سن ۷ روزه (مگاپاسکال)	سن ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
L20	۱۸/۴	۲۱/۱	۲۴/۶
L30	۱۷/۸	۱۸/۹	۲۲
L40	۱۵/۳	۱۴/۵	۱۸/۱
L50	۹/۲	۱۰	۱۱/۵
S20	۳۴/۱	۳۷	۳۸/۷
S30	۳۱/۵	۳۲/۶	۳۴/۹
S40	۲۷/۴	۲۸/۸	۳۰/۳
S50	۲۴/۸	۲۵/۶	۲۷

۲-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری در محیط اسیدی

در این تحقیق ۴ طرح مخلوط (S20 L50 L20 و S50) بررسی و مقایسه شده است. نمونه‌های بتن خودتراکم بعد از ۲۸ روز عمل آوری در حوضچه آب شرب در دو سن ۷ و ۲۸ روزه در حوضچه‌های اسیدی با PH=5 قرار گرفته و نتایج مقاومت آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم سبک در محیط اسیدی

طرح مخلوط	سن ۷ روزه (مگاپاسکال)	سن ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
L20	۱۸/۱	۱۷/۳
L50	۸/۳	۷/۹
S20	۳۵/۴	۲۹/۲
S50	۲۴/۹	۲۰/۳

۳-۲-۳- کاهش وزن بتن خودتراکم سبک در محیط اسیدی

در این بخش نمونه‌های ساخته شده برای تمام طرح‌ها بعد از عمل آوری تا سن ۲۸ روزه در محیط اسیدی قرار می‌گیرند تا وزن کاهش یافته نمونه‌ها (در هر سن دو نمونه) ناشی از خوردگی در محیط اسیدسولفوریک بررسی شود. با توجه به اینکه این آزمایش با هدف بررسی اثر اسیدسولفوریک بر روی هر ۶ وجه نمونه‌ها انجام شده است و هیچ گونه کپینگ گذاری بر روی آن‌ها انجام نشده است. در شکل ۹ وضعیت ظاهری نمونه‌های بتن قبل و بعد از قرار گیری در محیط اسیدی نشان داده شده است. نتایج کاهش وزن‌ها در جدول ۶ و شکل ۱۰ نشان داده شده است در شکل ۱۰ دو طرح که وزن نزدیک به هم را دارند انتخاب شده تا مقایسه بهتری صورت گیرد.

الف) نمونه‌های بتن سبک لیکا قبل از قرار گیری در محیط اسیدی

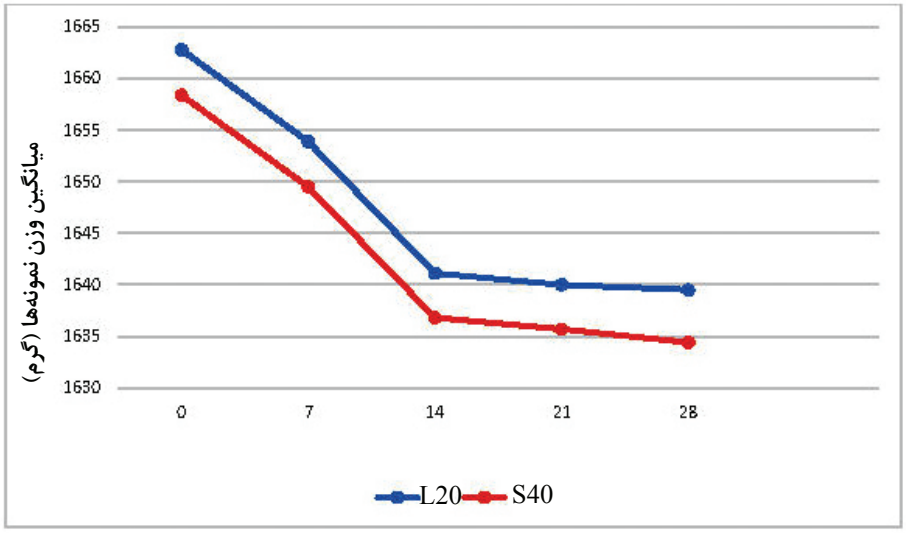
ب) نمونه‌های بتن سبک لیکا بعد از قرار گیری در محیط اسیدی

پ) نمونه‌های بتن سبک اسکوریا قبل از قرار گیری در محیط اسیدی

ت) نمونه‌های بتن سبک اسکوریا بعد از قرار گیری در محیط اسیدی

جدول ۶- وزن نمونه‌های بتن سبک در محیط اسیدی

طرح مخلوط	روز اول (گرم)	روز ۷ (گرم)	روز ۱۴ (گرم)	روز ۲۱ (گرم)	روز ۲۸ (گرم)
L20	1662.8	1653.9	1641.1	1640	1639.5
L30	1413.6	1404.5	1390.9	1389.6	1389
L40	1266.8	1257.7	1244.6	1244.3	1243.7
L50	1012.5	1001.2	988.4	986.3	985
S20	1917.3	1910.3	1901.6	1898.1	1896.7
S30	1778.9	1771.7	1762.8	1759.2	1757.9
S40	1658.4	1649.5	1636.8	1635.7	1634.4
S50	1461.7	1451.5	1435.9	1433.8	1432.3



شکل ۱۰- مقایسه کاهش وزن در سنین مختلف

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- تحلیل نتایج بتن تازه

شکل ۳ آزمایش جریان اسلامپ را نشان می‌دهد. وزن مخصوص شکل ظاهری و درصد جذب آب سبکدانه‌ها از عوامل مهم هستند. از آنجایی‌که سنگدانه‌های سبک مورد استفاده در طرح‌ها حالت اشباع با سطحی خشک داشته‌اند (SSD) جذب آب سبکدانه‌ها تاثیر خاصی بر اسلامپ بتن نمی‌گذارند در غیر این‌صورت هرچه جذب آب بیشتر باشد مقدار جریان اسلامپ کاهش می‌یابد. و همچنین با توجه به شکل سبکدانه لیکا که ظاهری گرد و سبکدانه اسکوریا که ظاهری شکسته دارد مطابق با شکل ۳ هرچه درصد جایگزینی سبکدانه لیکا بیشتر می‌شود نتایج آزمایش اسلامپ افزایش پیدا می‌کند و در مقابل آن هرچه درصد جایگزنی سبکدانه اسکوریا بیشتر می‌شود نتایج آزمایش اسلامپ کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که پیشتر گفته شد تمامی طرح‌ها در شکل ۳ در محدوده دسته SF2 قرار گرفته اند و فقط طرح L50 در محدوده SF3 قرار دارد. در پژوهشی که وهابی و همکاران بر روی بتن خودتراکم سبک‌وزن با استفاده از سبکدانه‌های لیکا و اسکوریا انجام داده اند با نتایج این تحقیق مطابقت می‌کند که آزمایش جریان اسلامپ در بتن‌های ساخته شده با سبکدانه لیکا بیشتر است.

شکل۴ آزمایش اسلامپ T50 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد سبکدانه اسکوریا زمان اسلامپ T50 کاهش پیدا می‌کند و در مقابل با افزایش درصد جایگزینی سبکدانه لیکا زمان آزمایش اسلامپ T50 افزایش پیدا کرده است. این به دلیل وزن مخصوص سبکدانه لیکا و اسکوریا است که باعث کاهش یا افزایش وزن مخصوص بتن شده و بر زمان اسلامپ T50 تاثیر می‌گذارند. با افزایش درصد سبکدانه اسکوریا در مخلوط بتن زمان اسلامپ T50 که نشان‌دهنده زمانی است که بتن تا ارتفاع ۵۰ میلی‌متر از قاعده قالب اسلامپ سقوط می‌کند کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن سبکدانه اسکوریا باعث کاهش زمان ترکیب و جمع شدن بتن می‌شود.در مقابل با افزایش درصد جایگزینی سبکدانه لیکا در بتن زمان اسلامپ T50 افزایش می‌یابد. این امر به دلیل وزن مخصوص متفاوت بین سبکدانه لیکا و اسکوریا است که تأثیر مستقیمی بر وزن مخصوص کل بتن و در نهایت بر زمان اسلامپ T50 دارد. با افزایش جایگزینی سبکدانه لیکا وزن مخصوص بتن افزایش می‌یابد که منجر به افزایش زمان ترکیب و

جمع شدن بتن می‌شود.این مشاهدات نشان می‌دهد که استفاده از سبکدانه‌های مختلف می‌تواند به تنظیم زمان ترکیب و جمع شدن بتن و همچنین به تنظیم خواص مکانیکی آن کمک کند. تفهم این رابطه بین سبکدانه‌ها و زمان اسلامپ T50 می‌تواند به بهبود کارایی و کنترل مخلوط بتن خودتراکم سبک در پروژه‌های عمرانی کمک کند. همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد تمام طرح‌های مخلوط در محدوده مجاز کلاس VS2 قرار دارند.

شکل ۵ نتیجه آزمایش جعبه L را نشان می‌دهد.مطابق با این شکل تمام طرح‌های بتن خودتراکم سبک در محدوده مجاز EFNARC هستند که محدوده مجاز PA2 و بالاتر از ۰/۸ است. در این آزمایش مطابق با دیگر آزمایشات کارایی بتن خودتراکم بیشترین تاثیر را شکل ظاهری سبکدانه‌ها گذاشته است مطابق با شکل ۵ اختلاف ارتفاع در بتن خودتراکم با استفاده از سبکدانه اسکوریا به ۰/۸ نزدیکتر است تا سبکدانه لیکا. وهابی و همکاران در تحقیقشان نشان داده‌اند که h_2/h_1 برای بتن خودتراکم سبک لیکا بیشتر از بتن خوتراکم اسکوریا است و با نتایج تحقیق ما مطابقت می‌کند.

شکل‌های ۶ و ۷ نتایج دو آزمایش حلقه J و جعبه U را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر گفته شد EFNARC آزمایش حلقه J را حداکثر اختلاف ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و آزمایش جعبه U۳۰ میلی‌متر گزارش کرد است. نتایج نشان داده شده در شکل ۶ حداکثر اختلاف ارتفاع را برای آزمایش حلقه J را کمتر از ۱۰ میلی‌متر و در محدوده مشخص استاندارد نشان داده است. همچنین شکل ۷ آزمایش جعبه U را نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف ارتفاع در حدود ۲۰ میلی‌متر و کمتر از ۳۰ میلی‌متر و محدودیت استاندارد را براورده کرده است.

شکل ۸ میانگین وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های مخلوط را نشان می‌دهد. مطابق با شکل هرچه درصد سبکدانه‌ها افزایش پیدا کرده است وزن مخصوص بتن کاهش پیدا کرده است و مطابق با استاندارد ACI213 تمامی وزن مخصوص طرح‌ها در محدوده بتن سبک است.

۲-۴- تحلیل نتایج بتن سخت شده

۱-۲-۴- نتایج مقاومت فشاری

جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری بتن خودتراکم سبک را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۴ هرچه درصد جایگزینی سبکدانه‌ها وزن بتن سبک خودتراکم بیشتر شده است بتن سبک خودتراکم کاهش مقاومت داشته است که این به دلیل حفرات سبکدانه‌ها و پایین بودن وزن مخصوص آن‌ها نسبت به سنگدانه معمولی است. تمامی طرح‌ها به جز طرح L50 در سن ۲۸ روزه به مقاومت بتن سازه‌ای رسیده‌اند. و می‌توان از آن‌ها برای استفاده در مقاطع سازه‌ای هم استفاده کرد.

۲-۲-۴- نتایج مقاومت فشاری در محیط اسیدی

جدول ۵ نتایج نمونه‌های مقاومت فشاری بتن خودتراکم سبک را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۵ درسن ۷ روزه قرار گیری نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک بتن کاهش مقاومتی تا حدود سن عمل آوری سه روزه خود دارد و هرچه بیشتر در محیط اسیدی قرار می‌گیرد این کاهش مقاومت بیشتر می‌شود. همچنین جدول ۵ نشان می‌دهد که نسبت کاهش مقاومت بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه لیکا در سن پایین بیشتر از بتن سبک خودتراکم با استفاده از سبکدانه اسکوریا است و در سن بالا نسبت کاهش مقاومت بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه اسکوریا بیشتر از بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه لیکا است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سبکدانه لیکا در بتن سبک خودتراکم در سن پایین می‌تواند به کاهش مقاومت بیشتری منجر شود درحالی‌که در سن بالا استفاده از سبکدانه اسکوریا ممکن است کاهش مقاومت بیشتری به همراه داشته باشد. این می‌تواند ناشی

از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی متفاوت بین سبکدانه لیکا و اسکوریا باشد. به‌عنوان مثال وزن مخصوص و خصوصیات شیمیایی هر سبکدانه می‌تواند تأثیر متفاوتی بر روی ترکیب و خصوصیات بتن داشته باشد. برای مطالعه دقیق‌تر و تحلیل علل دقیق ترکیبات بتن و عوامل مؤثر بر مقاومت آن نیاز به بررسی‌های تکمیلی و آزمایش‌های مکمل است.

۳-۲-۴- نتایج کاهش وزن بتن خودتراکم سبک در محیط اسیدی

جدول ۵ و شکل ۱۰ نتایج کاهش وزن بتن خودتراکم سبک را برای دو سبکدانه لیکا و اسکوریا نشان می‌دهند. مطابق با جدول ۵ هرچه سن قرار گیری نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک بیشتر می‌شود کاهش وزن نمونه‌ها بیشتر می‌شود. و برای مقایسه بهتر تاثیر کاهش وزن نمونه‌ها در محیط اسیدی دو طرح که وزن نزدیک به هم داشته‌اند در شکل ۱۰ بررسی شده است مطابق با شکل ۱۰ کاهش مقاومت هر دو بتن خودتراکم سبک تا سن ۱۴ روز شب زیادی دارد و از سن ۱۴ روزبه بعد این شیب به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و محیط اسیدی تاثیر کمتری بر کاهش وزن نمونه‌ها داشته است.

۵- نتیجه گیری

بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش نتایج زیر حاصل شده است:

- سه عامل مهم که بر کارایی بتن خودتراکم سبک تاثیر می‌گذارند وزن مخصوص شکل ظاهری و درصد جذب آب سبکدانه‌ها هستند. هرچه وزن مخصوص سبکدانه‌ها بیشتر باشد وزن مخصوص و کارایی بتن سبک بیشتر می‌شود هرچند تاثیر وزن مخصوص بتن سبک به جز در آزمایش اسلامپ T50 چشمگیر نیست. شکل ظاهری و جذب آب سبکدانه‌ها بیشترین تاثیر را بر کارایی بتن دارند به این‌صورت که هرچه سطح سبکدانه‌ها گردتر باشد کارایی بتن سبک بیشتر و هرچه سبکدانه‌ها شکسته تر باشد بتن سبک خودتراکم خشن‌تر و کارایی آن کاهش پیدا می‌کند. از طرفی هرچه جذب آب سبکدانه‌ها بیشتر باشد کارایی بتن کاهش پیدا می‌کند.
- وزن مخصوص بتن نقشی اصلی در نشان دادن مقاومت فشاری آن دارد به این صورت که با افزایش وزن مخصوص مقاومت آن بیشتر و با کاهش آن مقاومت بتن کاهش پیدا می‌کند.
- با مقایسه دو مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سبکدانه لیکا و اسکوریا به این نتیجه می‌رسیم که با جایگزینی ۵۰٪ سبکدانه اسکوریا در بتن خودتراکم سبک وزن مخصوص آن به ۱۵۶۷ کیلوگرم‌برمترمکعب و مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روزه به ۲۷ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین با جایگزینی ۲۰٪ سبکدانه لیکا در بتن خودتراکم سبک وزن مخصوص آن به ۱۷۶۹ کیلوگرم‌برمترمکعب و مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روزه به ۲۴/۶ مگاپاسکال می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهند که بتن خودتراکم سبک با استفاده از سبکدانه اسکوریا با وزن مخصوص کمتر و درصد بیشتری سبکدانه مقاومت قابل توجه بیشتری را نیز داراست. به طور خاص با جایگزینی مشابه سبکدانه‌ها بتن سبک با استفاده از ۶۰٪ سبکدانه اسکوریا مقاومت بیشتری را به ارمغان می‌آورد.
- بتن خودتراکم سبک ساخته شده با سبکدانه لیکا بعد از قرارگیری در محیط اسیدسولفوریک در سن ۷ روزه کاهش مقاومت در حدود ۲۷٪ و در سن ۲۸ روزه کاهش مقاومت ۳۰٪ دارد و بتن خودتراکم سبک ساخته شده با سبکدانه اسکوریا بعد از قرارگیری در محیط اسیدسولفوریک در سن ۷ روزه کاهش مقاومت در حدود ۸٪ و در سن ۲۸ روزه کاهش مقاومت ۲۵٪ دارد.که نشان می‌دهد بتن خودتراکم سبک ساخته شده با سبکدانه لیکا بیشتر کاهش مقاومتش تا سن ۷ روزه اتفاق افتاده است و حدود۳٪ کاهش مقاومت تا سن ۲۸ روزه داشته است در مقابل بتن خودتراکم سبک ساخته شده با سبکدانه اسکوریا کاهش مقاومت چشمگیری تا سن ۷ روزه نداشته است و بیشترین کاهش مقاومت از سن ۷ تا ۲۸ روزه آن که در حدود ۱۶٪ است اتفاق افتاده است.

● نمونه‌های بتن سبک قرار گرفته در محیط اسیدی از اولین روز قرار گیری در محیط اسیدی تا سن ۲۸ روزه آن کاهش وزن تا سن ۱۴ روزه آن در حدود ۹۳٪ و تنها ۷٪ از سن ۱۴ تا ۲۸ روزه کاهش وزن دارند. و نسبت به وزن اولیه نمونه‌ها حدود ۱٪ تا ۲٪ کاهش وزن دارند که این کاهش وزن بسیار ناچیز است.

۶- تقدیر و تشکر

از شرکت فیدار بتن و آقای مهندس جمال حیدری و سازمان کتابخانه‌ها موزه‌ها و مرکزاسناد آستانه قدس رضوی که فضا را برای انجام این تحقیق فراهم کرده‌اند صمیمانه تشکر می‌کنم.

منابع

[1] Verzegnassi, E., Altheman, D., Gachet, L. A., & Lintz, R. C. C. (2022). Study of the properties in the fresh and hardened state of self-compacting lightweight concrete. Materials Today: Proceedings.

[2] Mohamed, S. H., Asran, A. G., Noman, M. T., & Azim, M. A. (2022). PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT HIGH STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETE. GEOMATE Journal, 23(96), 50-60.

[3] Elshahawi, M., Hückler, A., & Schlaich, M. (2021). Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review). Structural Concrete, 22, E152-E168.

[4] Mehany, S., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2021). Contribution of lightweight self-consolidated concrete (LWSCC) to shear strength of beams reinforced with basalt FRP bars. Engineering Structures, 231, 111758.

[5] Azari Jafari, H., Tajadini, A., Rahimi, M. and Berenjian, J., (2018). "Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials." Construction and Building Materials, 166, 889-897.

[6] Wan, D. S. L. Y., Aslani, F. and Ma, G., (2018). "Lightweight self-compacting concrete incorporating Perlite, Scoria, and polystyrene aggregates." Journal of Materials in Civil Engineering, 30(8), 04018178.

[7] Nepomuceno, M. C. S., Pereira-de-Oliveira, L. A. and Pereira, S. F., (2018). "Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates." Construction and Building Materials, 166, 373-385.

[8] Hubertová, M., & Hela, R. (2013). Durability of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete. Procedia Engineering,65, 2-6. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.002.

[9] Parker, C. (1945). The Corrosion Of Concrete. Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science,23(2), 81-90. doi:10.1038/icb.1945.13.

[10] Irico, S., De Meyst, L., Qvaeschning, D., Alonso, M. C., Villar, K., & De Belie, N. (2020). Severe sulfuric acid attack on self-compacting concrete with granulometrically optimized blast-furnace slag-comparison of different test methods. Materials, 13(6), 1431.

[11] Miao, Y., Zhang, Y., Li, B., Chai, L., & Ma, G. (2022). Effect of Graphene Oxide on Chemical Shrinkage Behavior of Cement-Based Composite Paste. KSCE Journal of Civil Engineering, 26(4), 1858-1879.

[12] Bačuvčík, M., Martauz, P., Janotka, I., & Cvopa, B. (2020). The Resistance of New Kind of High-Strength Cement after 5 Years Exposure to Sulfate Solution. In Cement Industry-Optimization, Characterization and Sustainable AppLECAtion. IntechOpen.

[13] Song, H., Yao, J., Luo, Y., & Gui, F. (2021). A chemical-mechanics model for the mechanics deterioration of pervious concrete subjected to sulfate attack. Construction and Building Materials, 312, 125383.

[14] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., Belie, N. D., Taerwe, L., Gemert, D. V., & Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. Cement and Concrete Research,30(4), 623-634. doi:10.1016/s0008-8846(00)00219-2.

[15] Ahmad, S., Al-Amoudi, O. S. B., Khan, S. M., & Maslehuddin, M. (2022). Effect of siLECA fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. Case Studies in Construction Materials, 17, e01255.

[16] Suryanita, R., Maizir, H., Zulapriansyah, R., Subagiono, Y., & Arshad, M. F. (2022). The effect of siLECA fume admixture on the compressive strength of the cellular lightweight concrete. Results in Engineering, 14, 100445.

[17] Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E., & Nakhla, G. (2007). Effect of Mixture Design Parameters and Wetting-Drying Cycles on Resistance of Concrete to Sulfuric Acid Attack. Journal of Materials in Civil Engineering,19(2), 155-163. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:2(155).

[18] Kharun, M., & Ehsani, A. (2022, August). Investigation and comparison of the effect of using Leca and scoria lightweight aggregates on the strength of lightweight concrete. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2559, No. 1, p. 050008). AIP Publishing LLC.

[19] Askari Dolatabad, Y., Abolpour, B., & Tazangi, M. A. J. (2021). Investigating effects of Nano particles of siLECA on the properties of self-compacting concrete containing Perlite, Leca, and Scoria light weight aggregates. Arabian Journal of Geosciences, 14(10), 1-13.

[20] ASTM C150-07, (2012). "Standard Specification for Portland Cement." Shipping & Handling, Pennsylvania: ASTM Internatinal. DOI: 10.1520/C0150-07

[21] ASTM C33/C33M-18, (2018). "Concrete and aggregate." West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Internatinal.

[22] ASTM D1129, (2013). "Standard terminology relating to water." USA: American Society for Testing and Materials International .

[23] ACI 237R-07, (2007). "Self-consolidating concrete." Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.

[24] EFNARC, (2002). "Specification and guidelines for self-compacting concrete." UK Hampshire: EFNARC Association House.

[25] ACI 213R-87, (1999). "Guide for structural lightweight aggregate concrete." Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.

[26] BS 1881-116, (1983). "Method for determination of compressive strength of concrete cubes." London: The British Standard Limited.