J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 21, Issue 2, summer 2024
Issn: 2821-0999
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
آنالیز سازه - زلزله
فصلنامه علمی
ASE
دوره 21، شماره 2، تابستان 1403

Experimental Investigation of Leca Different Volume Lightweight Aggregate Effect on the Mechanical Properties of Lightweight Concrete

Allah dad Ahmadi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Firoozabad branch, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran.

Babak mansoori *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Firoozabad branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran
babak.mansoori@iau.ac.ir

Keywords:
lightweight concrete,
Leca,
density,
mix design,
mechanical properties

Abstract

In this paper, the mechanical properties of lightweight concrete (LWC) with Leca light grains were investigated. For this purpose, Concrete mixing designs LWC with different amount of Leca light grains (size 0-4 and 4-10 mm) were produced. Due to the high-water absorption Property of porous Leica Light aggregates in lightweight concrete, the ratio of water to cement (w / c) is not a criterion for the mixing design. In a number of mix schemes, a percentage of Leca light aggregate with sand (size 0-5 mm) was replaced. Strength parameters to identify the behavior of lightweight aggregate concrete (LWAC), include compressive and tensile strengths. For each mix of the Leca LWC, cubic samples with dimensions of 15 *15 *15 cm for finding compression strength and cylindrical specimens with dimensions of 30 *15 cm for achieving Tensile sstrength were prepared and cured and tested. Evaluation of compressive and tensile strength of samples at 28 days of age, which is the basis of structural design was performed. The results showed that in order to obtain lightweight structural concrete, a percentage of lightweight Leca aggregate should be replaced with sand. Due to the fact that increasing the sand increases the specific weight of concrete to keep the specific weight in the range of light concrete by increasing the amount of cement and micro silica and superplasticizer can reach the desired density. Also, by increasing the amount of adhesives using stone dust, micro silica and superplasticizer, the mechanical properties of lightweight concrete can be improved.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

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

فصلنامه علمی
آنالیز سازه - زلزله
دوره 21، شماره 2، تابستان 1403

بررسی آزمایشگاهی اثر مقادیر مختلف سبک‌دانه لیکا بر مشخصات مکانیکی بتن سبک

الله داد احمدی

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران.

بابک منصوری*

استاد یارگروه مهندسی‌عمران،واحد فیروزآباد، مرکز میمند،دانشگاه آزاد اسلامی،میمند، ایران.

babak.mansoori@iau.ac.ir

تاریخ دریافت : 20 آذر 1402 تاریخ پذیرش: 17 فروردین 1403

چکیده

در این مقاله مشخصات مکانیکی بتن سبک حاوی سبک‌دانه لیکا بررسی می‌شود. برای این منظور، طرح‌های اختلاط بتن سبک با مقادیر مختلف سبکدانه لیکا (با سایز ۴-۰ و ۱۰-۴ میلیمتر) ساخته شده‌اند. بدلیل خاصیت جذب آب سبک‌دانه‌های متخلخل لیکا در بتن سبک، نسبت آب به سیمان (w/c) معیار طرح اختلاط نمی‌باشد. در تعدادی از طرح‌های اختلاط، درصدی از سبک‌دانه لیکا با ماسه (اندازه ۵-۰ میلیمتر) جایگزین شده است. پارامترهای مقاومتی که به منظور شناسایی رفتار بتن سبک انتخاب شده‌اند شامل: مقاومت‌های فشاری و کششی بوده‌اند. جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر و برای آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۵ ×۳۰ سانتی‌متر تهیه و عمل‌آوری شده است. ارزیابی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸روزه انجام شده که منطبق بر مبنای طرح سازه‌ها می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که جهت بدست آوردن بتن سبک سازه‌ای باید درصدی از سبکدانه لیکا با ماسه جایگزین شود. با توجه به اینکه افزایش مقدار ماسه باعث افزایش چگالی بتن می‌شود، برای نگه داشتن چگالی در محدوده بتن سبک، با افزایش مقدار سیمان ،پودر سنگ، میکروسیلیس و همچنین فوق روان کننده می‌توان به چگالی مورد نظر رسید. همچنین با افزایش میزان مواد چسپاننده با استفاده از پودر سنگ ، میکرو سیلیس و روان‌کننده‌های ممتاز، مشخصات مکانیکی بتن سبکدانه به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: بتن سبک، لیکا، چگالی، طرح اختلاط، مشخصات مکانیکی

1- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

سبک‌سازی در سازه‌ها به دلایلی همچون کاهش اتلاف انرژی در ساختمانها، بهبود عملکرد لرزه‌ای و نظایر آن بسیار مورد توجه بوده است. از جمله راهکارهای مناسب جهت داشتن عملکردی مناسب و اقتصادی، استفاده از بتن سبک می‌باشد؛ لذا برای داشتن بتن سبک سازه‌ای مناسب، تأمین سنگدانه های مرغوب و با کیفیت الزامی است. در بتن سبکدانه نسبت به بتن معمولی، پیوند بین سنگدانه ها و ماتریس قویتر است. خمیر سیمان به خاطر طبیعت متخلخل سنگدانه ها، به داخل آن نفوذ می‌کند. بنابراین ناحیه انتقالی واسطه بین سنگدانه ها و ماتریس وجود ندارد و یا در صورت وجود خیلی کوچک است. این موضوع از حیث پایایی بتن خیلی اهمیت دارد چون این ناحیه در بتن معمولی ضعیف ترین ناحیه است. یکی از فناوری‌های نوین در راستای سبک‌سازی ساختمان استفاده از بتن سبک با استفاده از سبک‌دانه‌ها می‌باشد. پوکه‌ی صنعتی لیکا جزء سبک‌دانه‌هایی هستند که دارای اندازه های گوناگون با جرم حجمی کم هستند ، به همین دلیل می‌توان از آنها در ساخت بتن سبک سازه‌ای استفاده کرد.

دردهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین بر روی سبک‌سازی با استفاده از بتن با سنگدانه‌های سبک در ساخت بناها معطوف شده است. بطوریکه استفاده از مصالح طبیعی و مصنوعی سبک وزن، به عنوان یک راه حل مؤثر در جهت کاهش ابعاد سازه و به حداقل رساندن نیروی زلزله وارد بر ساختمان، در نهایت افزایش سرعت و سهولت اجرا و اقتصادی شدن طرح مورد توجه است. با توجه به تحقیقات انجام شده در سالهای اخیر در زمینه‌های مختلفی از بتن سبک، گام‌های موثری در تکنولوژی بتن سبک برداشته شده است، بخصوص در زمینه افزایش مقاومت سنگدانه ها و تولید سبک‌دانه‌ها در انواع و اقسام مختلف با چگالی‌های کم و با مقاومت بالا،که باعث شده است تا ساخت و سازها با بتن سبک رونق چشمگیری داشته باشد، از همه مهم‌تر مزیت اقتصادی این نوع بتن‌ها در زمینه حمل و نقل، حرارتی، صوتی، پایایی در مقابل عوامل شیمیایی و به خصوص حفاظت محیط زیست و غیره باعث شده است بسیاری از مهندسین تلاش‌های مضاعف در زمینه ارتقاء کیفیت این نوع بتن انجام دهند. ساختن سازه‌های سبک با مقاومت کافی در برابر نیروهای جانبی زلزله و نیز پایداری آن در برابر عوامل جوی عامل مهمی برای تحقیق در این زمینه است.

کاربرد بتن سبکدانه (LWAC) را می‌توان از ۳۰۰۰سال قبل از میلاد مشاهده کرد، هنگامی که در طول تمدن، شهرهای معروفی مانند Mohenjo-Daro و Harappa ساخته شدند. اولین سبک‌دانه‌ها، سبک دانه‌های طبیعی با منشاء غالباً آتشفشانی مانند پومیس (Pumice)، اسکوریا (scoria)، توف(tuff) و نظایر آن بودند که در بعضی سازه‌های قدیمی مورد استفاده قرار گرفته اند. کاربرد بتن سبک‌دانه پس از تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی و فرآوری شده در اوایل قرن بیستم وارد مرحله جدیدی شد. در سال ۱۹۱۸ S.J.Hayde با استفاده از کوره دوار اقدام به منبسط کردن رس و شیل کرد و بدینوسیله سبک‌دانه‌های مصنوعی تولید کرد که از آنها در ساخت بتن استفاده شد. در عصر جدید به دلیل مزایای بتن سبکدانه و به ویژه خاصیت چگالی کم آن و عایق بودن در برابر حرارت، تقاضا برای استفاده از آن افزایش یافت. بطوری که در سال‌های اخیر بتن سبک‌دانه به یکی از مهمترین مصالح سازه ای در ساخت و سازها تبدیل شده است. با افزایش تقاضا برای استفاده از بتن سبک‌دانه و عدم دسترسی به سنگدانه‌های طبیعی، فناوری تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی ظهور کرد و منجر به گسترش سبک‌دانه‌های مصنوعی شد که از مصالح خام طبیعی مثل رس، اسلیت، شیل و نظایر آن همچنین از محصولات جانبی صنایع مانند خاکستر بادی، خاکسترهای رو باره‌ای و نظایر آن تولید می‌شوند.

تحقیق گسترده و توسعه سبک‌دانه (LWA) و بتن سبک (LWAC) در اروپا، ژاپن و آمریکای شمالی انجام گرفته است. در آمریکا، تحقیق بر روی بتن سبک سازه‌های دریایی شمال تحت عنوان the state of the Art تشریح شدکه در چهارچوب ACI ولی با نتایج و توصیه‌های ارزشمند نسبت به کاربرد بتن دانه سبک برای اهداف دیگر نیز انتشار یافت[1]. بطوریکه ناوگان آمریکا دریافت که برای استفاده از بتن سبک در سازه

کشتی، وزن مخصوص بتن نباید از ۱۷۶۰ کیلو گرم بر متر مکعب بیشتر و مقاومت فشاری آن نیز باید تقریباً برابر با ۲۸ مگا پاسکال باشد. با استفاده از سنگدانه‌های رسی منبسط شده در کوره‌های گردان بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۷۶۰کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد[2].

تحقیقات و بررسی های Rossignolo و همکارانش در سال۲۰۰۱ نشان داد که با استفاده از دانه های سبک می‌توان به مقاومت ۵۳/۶ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۶۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب دست یافت[3].رنجبر و همکارانش در سال 2011 خواص بتن سبک خود متراکم حاوی پلی استایرن را بررسی کردند، دریافتند اضافه کردن الیاف به بتن خواص مکانیکی بتن سبک پلی استایرن را بهبود می بخشد[4].

انجمن سیمان انگلیس (the British Cement Association) گزارش جامع درباره بتن سبک سازه‌ای تهیه کرده است. یکی از شفاف-ترین نتایج مطالعات، تفاوت در کاربرد و پذیرش عمومی سبک‌دانه از کشوری به کشور دیگر بوده است[5].

هدف از انجام این تحقیق ، تعیین نسبتهای اختلاط بتن سبک سازه ای با حداقل وزن مخصوص و حداکثر مقاومت به صورت اجرایی است که برای کاهش وزن از دانه های رس منبسط شده به نام لیکا استفاده شده است. این دانه ها در کوره های گردان و در حرارت ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، از انبساط خاک رس تولید می‌شوند. همچنین ماسه طبیعی به منظور افزایش کارایی، کاهش انقباض مخلوط بتن و افزایش مقاومت آن به سبکدانه های لیکا اضافه شده است.

۲- سبکدانه مصنوعی لیکا

عموما سبک‌دانه‌هایی را که بوسیله فرایند انبساط رس تولید می‌شود با نام لیکا می‌شناسند. واژه لیکا از عبارت Light Expanded Clay Aggregate(دانه رس منبسط شده) گرفته شده است. پوکه صنعتی لیکا جزء سبکدانه‌هایی هستند که دارای سایزهای مختلف با جرم حجمی کم هستند. به همین دلیل می‌توان از آنها در ساخت بتن سبک سازه‌ای استفاده کرد.

بدلیل محدودیت منابع و ذخایر مربوط به سبک‌دانه‌های طبیعی در دنیا، لزوم تولید یکنواخت و انبوه سبک‌دانه صنعتی به عنوان یک ضرورت در صنعت ساختمان مطرح گردید. به همین منظور در اوایل قرن بیستم فردی بنام S.J.Hayde با استفاده از کوره دوار اقدام به منبسط کردن رس و شیل کرد و بدین ترتیب سبک‌دانه مصنوعی تولید نمود. ابتدا تحت عنوان هایدیت و بعدها در برخی کشورها از جمله دانمارک، نروژ، سوئیس، سوئد، پرتغال، انگلیس و ایران با نام تجاری لیکا (Leca) نام گرفت.

امروزه دانه‌های سبک خاک رس منبسط شده در بیش از ۳۰ کشور جهان با نام‌های تجاری گوناگون تولید و عرضه می‌شوند. در اروپا و آمریکا این دانه‌ها را با عناوینی نظیر لایتگ، لیکا، آگلایت و آرژکس می‌شناسند. این دانه‌ها به طور مشابه در ایران با نام لیکا تولید می‌شوند. در ایران روش تولید سبک‌دانه لیکا به این ترتیب است که ابتدا خاک رس به عنوان مواد اولیه سبک‌دانه از معدن خاک رس به واحد فناوری کارخانه حمل شده پس از نمونه‌گیری و کنترل مواد شیمیایی و اطمینان از نداشتن مواد شیمیایی و آهکی بعد از آب‌دهی بصورت گل رس وارد کوره گردان می‌شوند. وقتی گل رس در درجه حرارتی حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار می-گیرد گازهای ایجاد شده دانه‌ها را منبسط کرده و هزاران سلول هوای ریز درون آنها تشکیل می‌گردد. با سرد شدن سبک‌دانه‌ها حباب‌های هوا بصورت فضاهای منفک باقی مانده و سطح آنها سخت می‌شود . بعد از مرحله تولید، محصولات به صورت دانه‌بندی مخلوط ۲۵-۰ میلیمتر وارد سرند شده و به سه رده دانه‌بندی ۰-۴ ، ۴-۱۰ و۱۰-۲۵ میلیمتر تفکیک می‌شوند.

۲-۱- ویژگیهای عمومی

بافت متخلخل ناشی از انبساط خاک رس که در نتیجه ایجاد و محبوس شدن گازها در جرم به حالت خمیری روان درآمده در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به وجود می‌آید، موجب ویژگیهای اساسی دانه لیکا است. مقادیر کمی این ویژگی ها و حتی ظاهر دانه ها بر حسب

روش تولید با کوره ذوب نواری یا گردان می تواند متفاوت باشد. دانه‌های حاصل از کوره گردان دارای شکل تقریبا گرد و سطح زبر و ناهموارند. قشر میکروسکوپی خارجی آنها دارای خلل و فرج ریز است. داخل دانه ها دارای بافت اسفنجی و سیاه رنگ است رنگ پوشش خارجی بستگی زیادی به ماده معدنی، روش و کیفیت فرآوری دارد و اغلب نزدیک به رنگ اخرایی و قهوه ای است. (شکل۱). وجود تخلخل و فضای خالی بین دانه ها سبب ایجاد فضای خالی برابر با ۷۳ تا ۸۸ درصد فضای کل می‌گردد. این میزان فضای خالی بین دانه ها سبب ایجاد ویژگیهای مهمی چون وزن کم، رسانایی حرارتی پایین، افت صوتی، جلوگیری از نفوذ رطوبت و زهکشی می‌شود. همچنین بافت این دانه ها و روش تشکیل آنها سبب مقاومت در برابر آتش و دوام و پایداری شیمیایی می گردد[6].

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی لیکا

دانه بندی (میلیمتر)	25-0	25-10	10-4	4-0
متوسط چگالی	300	250	320	510
حداکثر چگالی	350	300	370	560

شکل۱- پوکه صنعتی لیکا

آنالیز شیمیایی دانه‌های لیکا در جدول۱ نشان داده شده است. آزمایشات انجام شده نشان داده استPH این دانه‌ها حدود۷/۲ است و دانه‌های لیکا از نظر شیمیایی خنثی هستند[6].

جدول ۲- چگالی دانه‌های لیکا(کیلوگرم بر متر مکعب)

ترکیبات شیمیایی	درصد
SiO_2	66/05
Al_2O_3	16/57
Fe_2O_3	7/10
CaO	2/46
MgO	1/99
TiO_2	0/78
P_2O_5	0/21
MnO	0/09
SiO_3	0/03
Na_2O	0/69
K_2O	2/69

۲-۱-۲- چگالی دانه‌های لیکا

وزن مهمترین عامل شناسایی و طبقه‌بندی دانه‌های سبک است. وزن مخصوص دانه‌های لیکا رابطه مستقیمی با اندازه آنها و در نتیجه با روش تولید و مواد اولیه آن دارد ، و به طور کلی با افزایش اندازه دانه‌ها وزن مخصوص کاهش می‌یابد. این قاعده نتیجه منطقی پدیده انبساط حجم است. تعیین وزن مخصوص توده‌ای لیکا براساس استاندارد ASTM انجام گرفته است[6].

3- برنامه آزمایش و روش تحقیق

بتن سبک دانهٔ لیکا ، بتنی است که از دانه های لیکا ساخته می شود و بسته به نوع سبکدانه‌ها و فرایند تولیدشان و نیز چگالی دانه‌های بکار رفته در آن مقاومت‌های متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. بطوریکه می‌تواند بعنوان بتن سبک سازه‌ای بکار گرفته شود. این تحقیق با هدف بررسی تاثیر دانه بندی سبک‌دانه لیکا بر مشخصات مکانیکی بتن سبک به انجام آزمایش‌هایی جهت تهیه بتن سبک سازه‌ای با استفاده از سبک‌دانه‌های لیکا و بهبود خواص مقاومتی آن به میزان مطلوب می‌پردازد. در ادامه به شرح هر کدام از مولفه‌های مقاومتی و رفتار بررسی شده در این تحقیق پرداخته می‌شود.

۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق برای ساخت بتن سبک سازه‌ای از سبک‌دانه لیکا تولید کارخانه لیکا ایران واقع در کیلومتر ۱۰۵جاده تهران – ساوه استفاده شده است. سبک‌دانه‌های صنعتی کارخانه مذکور در اندازه‌های ریزدانه، درشت دانه و مخلوط به ترتیب با وزن مخصوص خشک ۲۷۰ الی ۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب تولید می‌شوند. در این تحقیق از سبک‌دانه لیکا در دو اندازه کلی ۰-۴ ، ۴-۱۰ میلی‌متراستفاده شده است (شکل۲).

الف. ۱۰-۴ میلی‌متر ب. ۴-۰ میلی‌متر

شکل۲- سبکدانه لیکا استفاده شده در تحقیق

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ دوکارخانه سیمان فیروزآباد استفاده شده است برای رسیدن به کارایی مورد نظر در بتن مورد آزمایش و کاهش نسبت آب به سیمان(w/c) از فوق روان کننده فرکوپلاست شرکت شیمی ساختمان با نام تجاری P200-3R استفاده شده است. آب مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها آب شرب شهر شیراز می‌باشد. جهت بهبود خواص مقاومتی بتن سبک به میزان مطلوب در تعدادی از نمونه ها از ماسه کارخانه سنگ شکن دوکوهک شیراز با حدود اندازه ۵-۰ میلیمتر جایگزین استفاده شده است.

۳-۲- طرح اختلاط

هدف از طرح اختلاط بتن ارائه فرمول و یا راهنما متناسب با مشخصات داده شده است. هر چه مقاومت فشاری بالاتر برای بتن مورد نظر باشد، لازم است نسبت به انتخاب نوع مصالح و کیفیت آنها توجه بیشتری شود. فرآیند تولید بتن‌های سبک‌دانه اغلب بسیار پیچیده‌تر از فرآیند تولید بتن‌های با وزن معمولی است. چون در ساخت آنها باید دو عامل رادر نظر گرفت. یکی اینکه سنگدانه‌های متخلخل، بسته به تخلخل آنها از خمیر سیمان تازه، آب جذب می‌کنند و دیگری اینکه، سنگدانه‌های سبک از ماتریس احاطه‌کنندهٔ آن، یعنی خمیر سیمان، چگالی و مقاومت کمتری دارند. لذا دانه‌های سبک با چگالی کمتر دچار جدایی شده و به سمت سطوح بالایی بتن حرکت می کنند. تغییرات چگالی دانه‌ها موجب تغییر چگالی و مقاومت بتن می‌شود [2].

استفاده از روش حجم مطلق، که اساس روش ACI برای مخلوط‌های بتنی با وزن معمولی را تشکیل می‌دهد، برای طرح اختلاط بتن سبک مناسب نیست. دلیل آن هم این است که اولاً در آن از رابطه بین مقاومت و نسبت آب به سیمان نمی‌توان استفاده کرد، زیرا مقدار آبی که جذب سنگدانه می‌شود ، قابل اندازه گیری نیست؛ ثانیاً علاوه بر این که قسمتی از آب (۱۰ تا ۲۰ درصد) جذب سنگدانه‌های متخلخل می شود، عمل جذب بعضی از آنها نیز ممکن است چندین روز زمان ببرد. بنابراین تخمین واقعی رطوبت، براساس حالت اشباع با سطح خشک (SSD) مشکل است[7]. جذب آب دانه‌های لیکا به دو عامل زمان و اندازه دانه بستگی دارد. از آنجا که میزان انبساط و در نتیجه تخلخل در دانه‌های کوچکتر کمتر است، مقدار جذب آب نیز در این دانه‌ها کمتر است و روند کندی دارد. از آنجا که میزان رطوبت دانه ها تأثیر مستقیم بر سایر ویژگیهای آن نظیر وزن و هدایت حرارتی دارد، بنابراین اندازه‌گیری آن برای تعیین ویژگیهای مؤثر در کاربرد مورد نظر بسیار مهم است. جذب آب سنگدانه‌ها مطابق شماره های C70,C128 ,C566,11.2.A23استاندارد ASTM انجام می‌گیرد. با توجه به سبک‌تر بودن دانه‌های لیکا از آب باید ابزارها و روشهای مخصوص سبکدانه‌ها به کار گرفته شوند[6]. با توجه به مطالب گفته شده، بهترین و مطمئن‌ترین روش برای طراحی و ساخت این نوع بتن این است که ابتدا با مصالح موجود و طرح اختلاط اولیه، نمونه‌های آزمایشی ساخته شود، آنگاه با توجه به نتیجه بدست آمده، در صورتی‌که قوام یا کارپذیری، چگالی بتن متراکم شده و نیز کسب مقاومت مورد نظر مطابق انتظار نباشد. با تغییر یک یا چند جزء بتن می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت. یعنی با استفاده سعی و خطا بتوانیم بتنی با کارآیی مناسب و خصوصیات فیزیکی مورد نیاز بدست آوریم. دراین

تحقیق مطالعات آزمایشگاهی با هفت طرح اختلاط جهت بدست آوردن طرح اختلاط بهینه به شرح ذیل انجام شده است(جدول۳).

جدول۳- طرحهای اختلاط بتن سبک (کیلو گرم بر متر مکعب)

شماره طرح	ماسه (kg)	لیکا (0-4)	لیکا (4-10)	فوق روان کننده (kg)	آب (liter)	اب/سیمان (w / c)	سیمان (kg)
1	0	200	360	1/9	160	0/4	400
2	0	112	448	0/4	160	0/4	400
3	56	224	319	0/54	160	0/4	400
4	400	124	291	0/85	160	0/4	400
5	800	81	215	1/25	160	0/4	400
6	1000	65	172	2	200	0/45	450
7	1200	43	135	1/42	160	0/4	400

۳-۳ ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتن سبک

مقدار وزنی مصالح جهت طرح اختلاط با توجه به نوع بتن برای مقدار معین بتن جهت انجام آزمایش محاسبه شده است سپس مصالح توزین گردیده است. فرآیند اختلاط در داخل دستگاه بتونیر صورت گرفت، به این ترتیب که ابتدا سیمان، ماسه، سبک‌دانه‌ها به مقدار لازم، وزن و در داخل دستگاه بتونیر ریخته شده است و دستگاه به مدت ۵-۳ دقیقه جهت اختلاط مصالح خشک بدون آب روشن نگه داشته شده است. در مرحله بعد دوسوم آب اختلاط در داخل دستگاه بتونیر ریخته و به مدت سه دقیقه مخلوط گردیده است تا با جذب آب اولیه توسط سبک‌دانه‌ها امکان جدایی دانه‌ها کمتر شود. در این مرحله نصف فوق روان کننده نیز به مخلوط اضافه شد سپس باقیماندهٔ آب و فوق روان کننده جهت تأمین کارایی مناسب و اسلامپ مورد نظر به دستگاه بتونیر اضافه شد، وضعیت به مدت دو دقیقهٔ دیگر مخلوط گردیده است. بتنی که با این روش مخلوط می‌شود دارای خاصیت همگنی خوب و عملکردی مناسب است تا مصالح بطور کامل در هم مخلوط شوند. با آزمایش های متعدد و مقدماتی این نتیجه حاصل شده است که اختلاط صحیح چه از نظر مخلوط کردن و چه از نظر مدت زمان اختلاط، تاثیر قابل توجهی روی مقاومت بتن دارد. لذا مدت زمان اختلاط بر این اساس بوده است و با تعداد چرخش مناسب بتونیر سعی شدکه همه مواد به خوبی با هم مخلوط شوند. بعد از اتمام اختلاط و ساخت بتن، مقداری از آن جهت تعیین اسلامپ مورد استفاده قرار گرفته است(شکل۳). بتن تولید شده در قالب‌های تمیز و روغن‌کاری شده مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ در دو لایه ریخته و قالب‌های استوانه‌ای ۳۰×۱۵ در سه لایه ریخته و هرلایه به صورت دستی با میله کوبه و چکش پلاستیکی مخصوص مطابق ضوابط متراکم (ویبره) شده است(شکل۴). نمونه‌ها پس از ویبره شدن سطح آنها صاف شده و به مدت ۲۴ ساعت با پوشش پارچه کرباسی نم‌دار درون قالب نگهداری شده سپس با دقت زیاد و بدون ضربه به قالب و صدمه خوردن، از قالب‌ها خارج شده تا قبل از آزمایش در حوضچه آب با دمای ۲ ± ۲۰ درجه سانتیگرادو رسیدن به سن ۷ و ۲۸ روزه نگهداری شده است.

جدول۴- مشخصات نمونه‌های مکعبی (۲۸ روز)

شماره طرح	مقاومت فشاری (kg/cm2)	چگالی (kg/m3)	نیروی شکست (kg)
1	34	879	7600
2	40	899	8900
3	41	946	9265
4	65	1120	14650
5	88	1510	19800
6	126	1792	28400
7	108	1864	24165

الف – طرح اختلاط دارای ماسه ب– طرح اختلاط بدون ماسه

شکل ۳. اسلامپ گرفتن از بتن سبکدانه لیکا

شکل۴- نمونه‌گیری بتن سبک در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای

۳-۴ – آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد(ASTM C239,2003)[8] با استفاده از دستگاه بارگذاری به فرم نیرو – کنترل بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ ×۱۵ ×۱۵ سانتیمتر عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روزه انجام گرفته است و نتایج انها با هم مقایسه گردیده است. بدین ترتیب نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح آنها خشک شده است. سپس وزن و ابعاد دقیق نمونه‌های مکعبی مورد آزمایش اندازه‌گیری شده و از جهتی که سطح نمونه در تماس با قالب مکعبی می‌باشد بین دو صفحه دستگاه بارگذاری قرار داده شده است(شکل۵). حال نیروی قائمی با سرعت ثابت به نمونه معکبی اعمال می‌شود تا نمونه بتن در اثر نیروی فشاری بشکند و عقربه دستگاه برگردد. نیرو از روی مانیتوری که روی صفحه جک ثابت می‌ماند یادداشت می‌شود (جدول۴) و از تقسیم این نیرو به سطح مکعب مقاومت فشاری نمونه حاصل می شود.

شکل۵ – آزمایش مقاومت فشاری بتن سبک با پوکه لیکا

۳-۵- آزمایش مقاومت کششی(برزیلی)

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن (splitting tensile strength)یا تست برزیلی شناخته می‌شود.

مقاومت کششی بتن یکی از اساسی ترین و مهم ترین ویژگی‌هایی است که بر میزان ترک خوردگی سازه‌ها تاثیر زیادی دارد. علاوه بر این بتن به سبب ماهیت شکنندگی‌اش از لحاظ تنش بسیار ضعیف است. بنابراین زمانی که نیروهای کششی از مقاومت کششی بتن فراتر رود در بتن ترک ایجاد می‌گردد. جهت تعیین مقدار نیرویی که احتمال دارد در عضو بتنی ترک ایجاد کند مقاومت کششی بتن را مشخص می‌کنیم.

در این تحقیق آزمایش مقاومت کششی طبق استاندارد (ASTM C496,2004)[9] با استفاده از دستگاه بارگذاری به فرم نیرو – کنترل بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰میلی‌متر عمل‌آوری شده است در سن ۲۸ روزه انجام گرفته است و نتایج آنها با هم

جدول۵- مشخصات نمونه‌های استوانه‌ای

شماره طرح	مقاوت کششی (Kg/cm2)	نیروی شکست (kg)
1	7	5200
2	8	6000
3	8/5	6400
4	11	8150
5	18	13668
6	27	20450
7	21	15504

مقایسه گردیده است. بدین ترتیب که ابتدا وزن و ابعاد (قطر و طول) دقیق نمونه استوانه‌ای اندازه‌گیری شده است سپس نمونه بتنی استوانه‌ای را داخل گیره نگهداره مخصوص آزمایش برزیلی بطور افقی قرار داده و داخل دستگاه بارگذاری قرار گرفته است. نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار از ناحیه سطح جانبی قرار گرفته‌اند به گونه‌ای که نمونه استوانه‌ای حین گسیختگی دو نیم شود (شکل۶و۷).

شکل۶- دستگاه آزمایش مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای

شکل۷-دو نیم شدن نمونه استوانه‌ای بعد از آزمایش کششی

پس از گسیختگی نمونه‌های استوانه‌ای نیروی گسیختگی که حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه‌ها می‌باشد جهت بدست آوردن مقاومت کششی یاداشت می‌شود. جهت محاسبه مقاومت کششی (جدول۵) از رابطه (۱) استفاده گردیده است:

$$F = ۲P / \pi LD \qquad (۱)$$

P: بار اعمال شده به نمونه

L: طول نمونه بر حسب سانیمتر

D : قطر نمونه بر حسب سانتیمتر

F : مقاومت کششی نمونه استوانه ای (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)

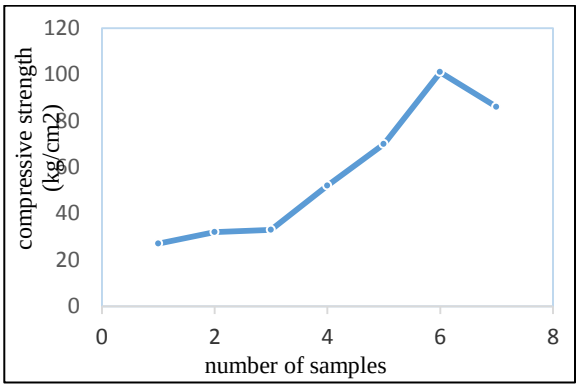
4- نتایج آزمایش

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در جدول (۴) و نتایج مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به توضیح است که وزن مخصوص ارائه شده، وزن مخصوص تر در سن ۲۸ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد.

۴-۱- مقاومت فشاری و چگالی

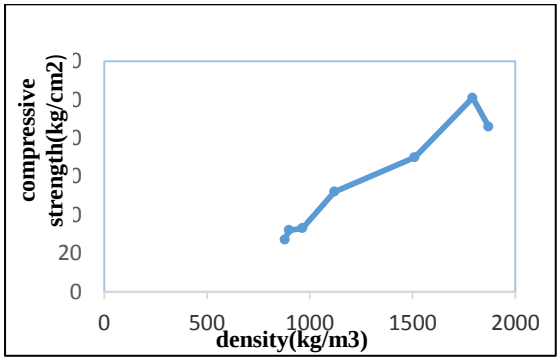
روند افزایش مقاومت فشاری۲۸روزه طرح‌های اختلاط بتن سبک انتخابی در شکل(۸) نشان داده شده است. برای اینکه در طرح‌های اختلاط بتن سبک، کمبود مصالح ریز (فیلر) جبران شود در تعدادی از نمونه‌ها از ماسه استفاده شده است. لذا بعد از شکستن نمونه‌ها

مشاهده گردید در طرح‌هایی که مقدار ماسه بیشتری استفاده شده است سطح بتن صاف‌تر بوده و خلل و فرج‌ها بسیار کمتر است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که جهت ایجاد بافتی پیوسته تر در بتن‌های سبک و کاهش تخلخل آنها از ماسه به عنوان مصالح مناسبی به جای در صدی از سبک‌دانه استفاده کرد. نمونه‌های دارای ریزدانه (فیلر) بیشتر بدلیل حذف خلل و فرج‌ها ، از مقاومت فشاری و مقاومت کششی مطلوب‌تری نسبت به نمونه مشابه بدون ماسه یا فیلر کمتر برخوردار بوده‌اند.



شکل۸- مقاومت فشاری بتن سبک طرح‌های اختلاط بتن سبک

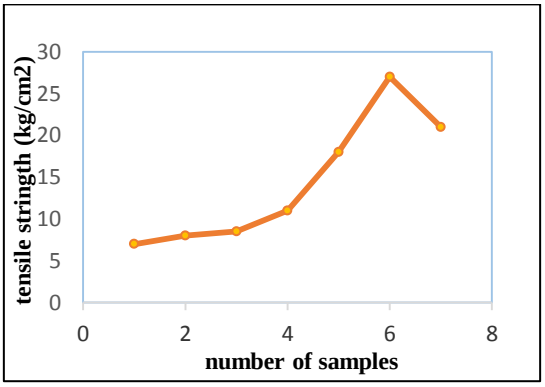
همان‌طور که در جدول(۴) مشاهده می‌شود نمونه‌های ساخته شده با مخلوط پوکه لیکا دارای وزن مخصوص کمتر نسبت به نمونه های ساخته شده با سبکدانه لیکا و ماسه هستند و با افزایش مقدار ماسه وزن مخصوص نیز بیشتر شده است. نتایج ۲۸ روزه مقاومت فشاری در جدول(۴) نشان می‌دهد افزایش سیمان تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت دارد به نحوی که در مقایسه طرح۶و۷ مشاهده می‌شود در طرح شش با اضافه کردن مقدار ۱۲/۵ درصد به وزن سیمان و کاهش ۲۰ درصدی وزن ماسه، وزن مخصوص۴ درصد کاهش و مقاوت فشاری ۱۸درصد افزایش داشته است. شکل۹ روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به وزن مخصوص را برای طرح‌های انتخاب شده نشان می‌دهد.



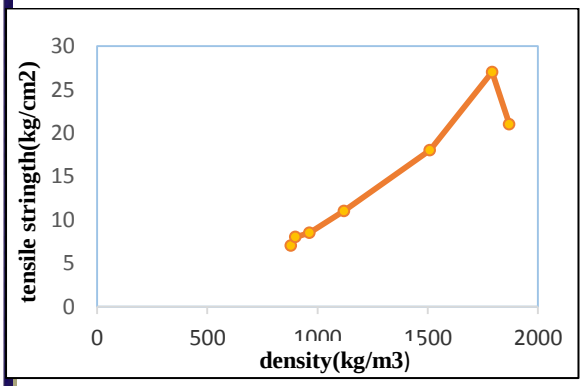
شکل۹- مقاومت فشاری بتن سبک نسبت به چگالی نمونه‌ها

۴-۲- مقاومت کششی (برزیلی)

روند افزایش مقاومت کششی بتن‌های سبک انتخابی در شکل۱۰ و۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقاومت کششی مانند مقاومت فشاری در بتن سبک مورد مطالعه متناسب با وزن مخصوص نبوده بلکه بستگی به مقدار ریزدانه و فیلر موجود در طرح اختلاط دارد.

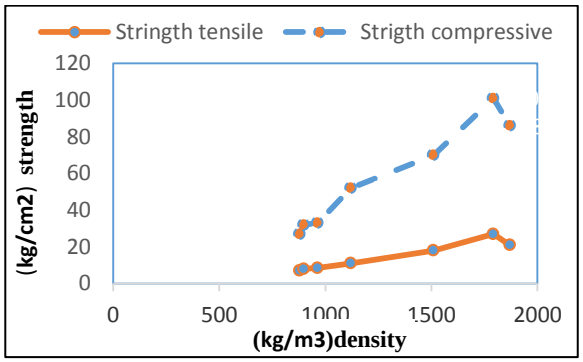


شکل۱۰- مقاومت کششی طرحهای اختلاط بتن سبک



شکل۱۱- مقاومت کششی بتن سبک نسبت به وزن مخصوص

مقایسه نتایج مقاومت کششی با مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبک مورد مطالعه، همان‌طور که در شکل۱۲مشاهده می‌شود مشخصات مکانیکی بتن سبک با سبکدانه مصنوعی لیکا، تابع وزن مخصوص نمی باشد و بستگی زیادی به مقدار سیمان بعنوان مواد چسپنده و میزان کارایی بتن سبکدانه دارد، بنحوی که در طرح اختلاط شماره ۶ نسبت به طرح اختلاط شماره ۷ با وزن مخصوص بیشتر، مقاومت فشاری و کششی طرح شماره ۶ به ترتیب ۱۸و۲۹ درصد افزایش داشته است.



شکل۱۲- مقاومت بتن سبک نسبت به وزن مخصوص نمونه‌ها

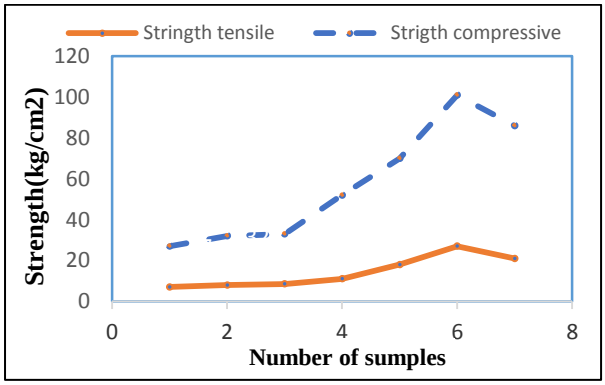
5- نتیجه‌گیری کاربردی

نظر به اینکه نیروهای زلزله وارد بر سازه تابع وزن سازه می‌باشد (V=CW)، و قسمت اعظم وزن سازه (W) بار مرده است. بنابراین کاهش وزن سازه مهمترین عامل در کاهش اثر زلزله بر آن است [10]. یکی از راهکارهای نوین در راستای سبک‌سازی ساختمانها استفاده از بتن با دانه‌بندی سبک می‌باشد. پوکه صنعتی لیکا جزء سبک‌دانه‌ها می‌باشد که در این تحقیق در ساخت بتن سبک مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق اثرات استفاده از سبکدانه‌های لیکا با توجه به مقاومت فشاری بتن سبک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور،7طرح اختلاط بتن سبک با مقادیر مختلف سبکدانه لیکا (با سایز ۴-۰ و ۱۰-۴- میلیمتر) ساخته شده‌اند. سبک‌دانه‌های متخلخل، بسته به تخلخل آنها از خمیر سیمان تازه آب جذب می‌کنند. میزان آب مورد نیاز(W/C) و اتصال میان خمیر سیمان و سبک‌دانه به خلل و فرج سبکدانه‌ها و طبیعت‌پوسته خارجی آنها وابسته است. بنابراین در بتن سبک با سبکدانه‌های متخلخل نسبت آب به سیمان (w/c) معیار طرح اختلاط نمی باشد.

در این تحقیق جهت بدست آوردن بتن سبک سازه‌ای در تعدادی از طرح اختلاط‌ها، درصدی از سبک‌دانه لیکا با ماسه (اندازه 5-0 میلیمتر) جایگزین شده است. با توجه به اینکه افزایش مقدار ماسه باعث افزایش وزن مخصوص بتن می‌شود برای نگه داشتن وزن مخصوص در محدوده بتن سبک با افزایش مقدار سیمان و میکروسیلیس و همچنین فوق روان‌کننده می‌توان به وزن مخصوص و مقاومت مورد نظر رسید. بنابراین می‌توان با افزایش میزان مواد چسپاننده ، پودر سنگ ، میکرو سیلیس و کاهش نسبت آب به سیمان (W/C)، خواص بتن سبک را تا حد بالایی ارتقاء داد.

نمونه‌های آزمایشگاهی نشان دادند در طرح اختلاط‌هایی که ماسه استفاده شده است سطح بتن صاف‌تر بوده و خلل و فرج‌ها بسیار کمتر است. از این رو برای جبران کمبود مصالح ریز (فیلر) و ایجاد بافتی پیوسته‌تر در بتن‌های سبک و کاهش تخلخل آنها می‌توان از ماسه به عنوان مصالح مناسب به جای درصدی از سبک‌دانه استفاده کرد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی نشان داد نمونه‌های دارای ماسه بدلیل حذف خلل و فرج‌ها مقاومت مطلوب‌تری نسبت به نمونه مشابه بدون ماسه هستند.

مقایسه نتایج مقاومت کششی با مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبک مورد مطالعه، همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نشان داد مقاومت کششی حدود ۲۵ درصد مقاومت فشاری می‌باشد. که احتمالا بدلیل خاصیت ارتجاعی سبک‌دانه‌های لیکا می‌باشد.



شکل 13- مقایسه مقاومت فشاری و کششی بتن سبک

۶- نتایج

نتایج این تحقیق نشان داد در بین تمامی طرحهای اختلاط آزمایش شده با هدف بهبود مشخصات مکانیکی بتن سبک حاوی سبکدانه‌لیکا تنها طرحاختلاط شماره ۶ دارای شرایط مناسبی از نظر کارایی و مشخصات مکانیکی است. در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده، بطور خلاصه به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱- در بتن سبک‌دانه لیکا ، می‌توان با استفاده از مصالح افزودنی مانند روان‌کننده‌های ممتاز، پودر سنگ و میکروسیلیس به بتن سبک سازه‌ای با مقاومت بالا و وزن مخصوص در حد استاندارد دست یافت.

۲- استفاده از ماسه، خلل و فرج‌های بتن را کاهش می‌دهد و باعث بهبود خواص مهندسی بتن و زیبایی سطح ظاهری آن می‌شود. به نظر می‌رسد به علت کمبود ریزدانهٔ سبک‌دانه‌ها استفاده از ماسه در داخل بتن سبک‌دانه یک الزام باشد.

۳- با توجه به تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری و نیاز به کم کردن این نسبت برای رسیدن به مقاومت بیشتر، استفاده از فوق روان‌کننده برای حفظ کارایی بتن الزامی است.

۴-وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده از مخلوط سبک‌دانه‌های لیکا، می‌تواند 25 ٪ تا۳۰ ٪ سبکتر از بتن معمولی با مقاومت مساوی باشد.

۵- در بتن سبک مورد مطالعه افزایش مقاومت کششی مانند مقاومت فشاری در تناسب با وزن مخصوص نبوده بلکه بستگی به مقدار ریزدانه و فیلر موجود در طرح اختلاط دارد.

۶- مقایسه نتایج مقاومت کششی با مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه مورد مطالعه مشاهده شد مقاومت کششی حدود ۲۵ درصد مقاومت فشاری می‌باشد. در حالی که در بتن معمولی این تناسب بین۱۰ تا ۱۵ درصد می‌باشد که احتمالا بدلیل خاصیت ارتجاعی سبک‌دانه‌های لیکا می‌باشد.

۷-با توسعه استفاده از بتن سبک‌دانه، برای افزایش مقاومت و پایایی بتن‌های سبک‌دانه، مواد چسپاننده مختلفی شامل؛سیمان پرتلند، خاکستر بادی ، روباره کوره آهن‌گدازی، دوده سیلیسی و سیلیس‌کلوئیدی استفاده می‌شوند.

۸- با افزایش مقدار سیمان بعنوان مواد چسپنده و میزان روان‌کننده در طرح اختلاط شماره ۶ نسبت به طرح اختلاط شماره ۷ با وزن مخصوص بیشتر، مقاومت فشاری و کششی طرح شماره ۶ به ترتیب ۱۸و۲۹ درصد افزایش داشته است.

۹- برای بدست آوردن مقاومت و چگالی بهینه طرح اختلاط بتن سبک‌دانه، نتایج به مقاومت، چگالی و اندازه سبک‌دانه‌های مورد استفاده وابسته است. در بعضی مواقع جواب بهتری را می‌توان با تغییر یک یا دو جزء بتن بدست آورد.

۱۰-تنها تفاوت میان بتن سبکدانه و بتن معمولی در نوع سنگدانه‌ها است. سنگدانه‌های طبیعی معدنی در بتن معمولی با سنگدانه‌های متخلخل با منشاء و اندازه متفاوت جایگزین می‌شوند. با این جایگزینی، بسیاری از ویژگیها تغییر می‌کند که بر تولید بتن سبکدانه تاثیر می‌گذارند.

۱۱- اتصال میان خمیر سیمان و سنگدانه به طبیعت پوسته خارجی سنگدانه وابسته است . قفل و بست‌های مکانیکی نقش مهمی در مقاوم کردن لایه مرزی بازی می‌کند.

مراجع

[1].Chia,KS. Kho, C. Chem., MH. "Stability of fresh lightweight aggregate concrete under vibration" ACI Mater 2005; 102(5):347–54.

[2].Chandra, S. Berntsston, L. Translators: Shekarchizadeh,M.and et.al. Lightweight aggregate concrete. “Science, Technology and Applications University of Thran Press. 2008; First Edition (In Persian).

[3]. Rossignolo, J.A. Agenesini, MVC. Morais, J.A. Properties of High-performance LWAC for pre-cast structure with Brazilian lightweight aggregates. 2001. severe marine environments", us army crorps of engineers, engineer research and development centre, 2000.

[4]. Madandoust, R. Ranjbar, M. Mousavi,S "An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene” Construction and Building Materials, 2011; 25 pages 3721–3731

[5]. Thomas, A. Holm and Theodore, B." state of the Art Report on high strength, Durability structural Low-density concrete for application in

severe marine environments", us army crorps of engineers, engineer research and development centre, 2000.
[6]. Mohamadi, M, and et.al. Leica Comprehensive Guide. Omidan Publications. 2009; First Edition. (In Persian)
[7].Kumar Mehta,P. and Monteiro, D.J.M. Translators: Ramezanianpor, A. and et.al. "Microstructure, Properties and Materials of Concrete. "Amir Kabir University of Technology Publications.Ninth Edition. 2019.
[8].ASTM C239. Compressive Strength of Cylindrical Concrete Speciments, American Society for Testing and Materials, 2003; Vol 04.02, USA
[9]. ASTM C496. Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials, 2004; vole 04.02, USA.
[10]. Ergul Yassar, High Strength Light Weight Concrete Made with Ternary Mixtures of Cement - Fly Ash–silica Fume and Scoria Aggregate.in Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, January 2004;28(2):95-100·