

ساخت بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از دانه‌های سبک، پودر سنگ و میکروسیلیس*

(یادداشت پژوهشی)

مرتضی حسینعلی بیگی⁽¹⁾ سید باقر حسینیان⁽²⁾ پیام شفیق⁽³⁾

چکیده این مقاله تحقیقی است به منظور تعیین نسبت‌های اختلاط بتن سبک سازه ای با مقاومت بالا که برای کاهش وزن آن از دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) که در ایران توسط صنعت تولید می‌شود، استفاده شده است. برای دستیابی به بتنی با مقاومت بالا از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی استفاده گردید. همچنین از پودر سنگ به منظور کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری استفاده شد. با در نظر داشتن جنبه‌های اجرایی این نوع از بتن، متغیرها در طرح‌های مختلف عبارتند از: نسبت آب به مصالح سیمانی، مقدار دانه‌های سبک در کل حجم بتن، مقدار سیمان و پودر سنگ. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه بتن دانشگاه مازندران تا روز آزمایش در زیر آب قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر عمل آوری بر مقاومت فشاری این گونه بتن‌ها، از هر طرح نمونه‌هایی نیز در هوای آزاد قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از دانه‌های سبک لیکا، بتن سبک سازه ای در محدوده وزن مخصوص خشک 1610 - 1965 کیلوگرم بر متر مکعب با مقاومت فشاری مکعبی از 34 تا 71 مگا پاسگال دست یافت. همچنین ملاحظه گردید که نقش پودر سنگ در بهبود خواص مکانیکی بتن دانه سبک لیکا قابل ملاحظه است.

واژه‌های کلیدی بتن سبک، مقاومت فشاری، وزن مخصوص، دانه سبک رس منبسط شده (لیکا)، پودر سنگ

Construction of Light Weight Concrete by using Light Weight Aggregates, Stone Powder and Micro Silica

M.H.A. Beygi S.B. Hosseinian P. Shafigh

Abstract This article is an investigation to determine mixture proportion of high strength structural light weight concrete in order to reduce the weight of concrete by using expanded aggregate clay (Leca), which in Iran is produced by industry. In order to reach to high strength concrete mineral and chemical admixtures additives have been used. Also stone powder has been used to reduce porosity and to increase compressive strength. Regarding the performance of this type of concrete, the variables in different mix designs are as follow: The ratio of water to cementitious materials, the amount of light weight aggregate to the total volume of concrete, the amount of cement and stone powder. Test for compressive strength, indirect tensile strength and flexural strength were carried out on the specimens. The specimens made in the concrete laboratory of Mazandaran University were kept under the water. In order to investigate the effect of curing on the compressive strength of these types of concrete from each mix design some specimens were kept in the open air. The results of this research show that by using light weight aggregate (Leca) it is possible to reach to a light weight structural concrete with dry unit weight of 1610 - 1965 kg / m³ with cube compressive strength of 34 to 71 MPa. Also, it has been observed the role of stone powder for the improvement of mechanical properties of concrete with light weight aggregate is very important.

Key Words Light Weight Concrete, Compressive Strength, Unit Weight, Light Weight Expanded Aggregate Clay (Leca), Stone Powder

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ 83/4/1 و نسخه نهایی آن در تاریخ 85/2/11 به دفتر نشریه رسیده است.

(1) استادیار دانشگاه مازندران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی بابل، دانشکده عمران

(2) استادیار دانشگاه مازندران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی بابل، دانشکده عمران

(3) عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی شمال - آمل

مقدمه

در این پژوهش هدف آن بوده است که اولاً با استفاده از دانه‌های رس منبسط شده سبک بتوان به یک بتن با مقاومت سازه ای مناسب که کاربردی نیز باشد، دست یافت. ثانیاً عوامل مؤثر بر افزایش بهبود خواص مکانیکی این گونه بتن‌ها، از جمله عیار سیمان، نوع دانه بندی لیکا و درصد‌های وزنی مختلف بکارگیری آن، نسبت آب به مصالح سیمانی و استفاده از پودر سنگ، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به خاطر بررسی تأثیر نوع عمل آوری بر مقاومت فشاری، از هر طرح 5 نمونه فشاری مانده در هوا با نمونه‌های مشابه موجود در آب مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جزئیات آزمایش

پژوهش‌های صورت گرفته درباره نوع سیمان نشان می‌دهد که بتن سبک ساخته شده با سیمان نوع II، هم در سنین پایین و هم در سنین زیاد نسبت به سیمان نوع I دارای مقاومت فشاری بالاتری است و افزایش مقاومت فشاری در حدود 6MPa است [4]. در این تحقیق نیز از سیمان پرتلند نوع II که دارای وزن مخصوص 3150 kg/m^3 و سطح مخصوص بروش بلین (Blain) $0/306 \text{ m}^2/\text{gr}$ استفاده گردیده است. گیرش اولیه این سیمان 175 دقیقه و گیرش ثانویه آن 230 دقیقه است. دارای مقاومت فشاری 3 روزه معادل $7,17/4 \text{ MPa}$ ، روزه 7، $21/4 \text{ MPa}$ و 28 روزه $34/1 \text{ MPa}$ می‌باشد.

میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش تولید کارخانجات فروسیلیس ایران است که دارای وزن مخصوص 2200 kg/m^3 و بلین $20/2 \text{ m}^2/\text{gr}$ می‌باشد. حداقل مقدار استفاده از این افزودنی معدنی در تحقیقات گذشته 10 درصد وزن سیمان و به صورت جایگزین آن می‌باشد که به خاطر ملاحظات اقتصادی از این مقدار در طرح اختلاط‌ها، بدون حل کردن در آب و

یکی از مشکلات مهم در طراحی و اجرای ساختمان‌ها، بخصوص ساختمان‌های مرتفع و پل‌های بزرگ بتنی، وزن مرده قابل توجه بکار رفته در آن است. از این رو در صورت استفاده از بتن سبکی که دارای خواص مکانیکی مطلوب باشد، امتیازات قابل توجهی را می‌توان به دست آورد که از جمله آن کاهش مقاطع در تیر، ستون، دال و پی است که در نهایت به اقتصادی شدن طرح منجر خواهد شد.

تاکنون تلاش‌های زیادی برای ساختن بتن سبک سازه ای صورت گرفته است. بررسی‌های نوشچنو و ویتکومب نشان داد که با استفاده از سبکدانه‌های سیلیسی منبسط شده با مصرف سیمان تا 520 kg/m^3 و میکروسیلیس تا 20٪ وزن سیمان می‌توان به مقاومتی معادل $70/5 \text{ MPa}$ با وزن مخصوص 1860 kg/m^3 دست یافت [1]. کیهی، آتیز، یاسر، وازکان نشان دادند که می‌توان با دانه‌های بازالت - پومیس، 450 kg/m^3 سیمان و 10٪ وزنی سیمان استفاده از میکروسیلیس به صورت جایگزین، می‌توان به مقاومت فشاری $43/8 \text{ MPa}$ با وزن مخصوص خشک در حدود $43/8 \text{ kg/m}^3$ بعد از گذشت 3 ماه دست یافت [2]. تحقیقات روسیگنولو، آگسینی و مورایس نشان داد که با استفاده از دانه‌های سبک برزیلی می‌توان به مقاومت فشاری 28 روزه معادل $53/6 \text{ MPa}$ با وزن مخصوص خشک در حدود 1605 kg/m^3 دست یافت [3]. مالهوترا نیز توانست با استفاده از سنگدانه‌های سنگ رسی منبسط شده به بتن سبکی با مقاومت فشاری 70 MPa در 365 روز که دارای وزن مخصوص 2000 kg/m^3 بوده است، دست یابد و به این نتیجه رسید که بهترین نسبت اختلاط، هنگامی به دست می‌آید که از مواد سیمانی به میزان 500 kg/m^3 متشکل از سیمان نوع III طبق استاندارد آمریکا برای آزمایش مصالح، خاکستر بادی و محلول میکروسیلیس استفاده گردد [4].

و 1040 کیلوگرم بر متر مکعب برای ساخت بتن سبک برابر مورد استفاده قرار می‌گیرند [5]. در این تحقیق از دانه‌های لیکا ریزدانه استفاده شده است که جذب آب 0/5 و 72 ساعته آن 13/5 و 29 درصد بوده است.

ماسه مورد استفاده از نوع رودخانه ای بوده که دارای ارزش ماسه ای 70 و مدول نرمی 3 است و دانه‌بندی آن مطابق استاندارد آمریکا برای آزمایش مصالح می‌باشد. فوق روان کننده مورد استفاده در کلیه طرح‌ها، از نوع سولفونات نفتالین فرم آلدئید بوده است.

نسبت‌ها و مقادیر اجزاء مخلوط‌های آزمایش.

دانه‌های لیکا به علت سبکی، تمایل به جدا شدن از سایر اجزاء مخلوط بتن را دارند و هر چه اسلامپ بتن بیشتر باشد امکان جدایش بیشتر خواهد بود. برای رفع این مورد می‌توان از میکروسیلیس همراه با فوق روان کننده مناسب استفاده کرد و قوام بتن را نیز افزایش داد. در کلیه طرح‌ها از ده درصد میکروسیلیس به صورت جایگزین سیمان استفاده گردید و برای دست یابی به روانی مناسب، از درصدهای مختلف فوق روان کننده استفاده شد. نسبت‌های اختلاط به صورت وزنی برای 8 مخلوط به کار گرفته شده در این مطالعه در جدول 2 آورده شده است. در طرح‌های 1، 2 و 3 کلیه شرایط یکسان بوده و تنها تفاوت در اندازه دانه‌های لیکا است. در این طرح‌ها که دانه‌های لیکا 35 درصد از وزن مصالح سنگی (لیکا + ماسه) را تشکیل می‌دهند از دانه بندی گسسته و به ترتیب از دانه‌های با قطر 4-2، 2-1 میلی و 5-0/5 میلی متر استفاده شده است. در طرح 4 و 5 برای دست یابی به مقاومت بالاتر، از آب کمتر و سیمان بیشتری استفاده شده است ضمن آنکه دانه‌های لیکا، 30 درصد وزن مصالح سنگی را تشکیل داده است. بالاترین میزان عیار سیمان در طرح شماره 6 با دانه بندی لیکا از نوع پیوسته با ماکزیمم قطر 4 mm مورد

به صورت خشک، به مخلوط بتن اضافه شده است. آنالیز شیمیایی آن در جدول (1) آمده است.

جدول 1 آنالیز شیمیایی سیمان، میکروسیلیس و دانه‌های لیکا

ترکیب شیمیایی	سیمان پرتلند نوع 2	میکروسیلیس	لیکا	پودر سنگ
اکسید سیلیم	22	-96/4	66/05	0/50
اکسید آهن	3/2	0/87	7/10	-
اکسید آلومینوم	4/44	1/32	16/57	0/50
اکسید کلسیم	64/92	0/49	2/46	55/4
اکسید منیزیم	1/42	0/97	1/99	0/0
اکسید سدیم	0/27	0/31	0/69	-
اکسید پتاسیم	0/58	1/01	2/69	-
اکسید فسفر	-	0/16	0/21	-
اکسید گوگرد	1/67	0/1	0/03	-
سایر اکسیدها	1/3	-	0/84	-
کلر	-	-	-	0/02
افت سرخ شدن	-	-	-	43/13

دانه‌های لیکا که آنالیز شیمیایی آن در جدول (1)

آورده شده است، با حرارت دادن خاک رس در کوره‌های متحرک در دمای بالاتر از 1100 °C تهیه می‌شود. این دانه‌ها دارای شکل نسبتاً گرد و سطح زبر و ناهموار هستند و در اندازه‌های مختلف قابل تولید می‌باشند. داخل دانه‌ها دارای بافت اسفنجی سیاه رنگ است که 73 تا 88 درصد فضای آن خالی است. این میزان فضای خالی بین دانه‌ها سبب ایجاد ویژگی‌های مهمی چون وزن کم، هدایت حرارتی پایین، افت صوتی، مقاومت در برابر آتش و غیره می‌گردد. پوشش خارجی آن به قطر 50 تا 100 میکرون است و قابلیت جذب آب کمتری نسبت به بافت درون دانه دارد. رنگ آن وابستگی زیادی به ماده معدنی، روش و کیفیت تولید دارد و اغلب به رنگ اخرازی و قهوه ای است. این دانه‌ها در اندازه‌های ریزدانه، درشت دانه و مخلوط به ترتیب با بیشینه وزن مخصوص خشک 880، 1120،

جدول 2 اجزاء مخلوط‌های آزمایشی در یک مترمکعب بتن (kg) و وزن مخصوص نمونه‌های مکعبی (kg/m^3)

شماره طرح	سیمان	میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب	(میکروسیلیس + سیمان) آب	آفت بتن (پلیمر)	ماسه	پودر سنگ	دانه‌های سبک لیکا (mm)					وزن مخصوص 28 روزه	
									2.4	1-2	0.5-1	0.25-0.5	0-0.25	تر	خشک
1	450	50	9	200	0.4	40	660.4	-	355.6	-	-	-	-	1658 ± 29	1610 ± 13
2	450	50	9	200	0.4	50	660.4	-	-	355.6	-	-	-	1700 ± 23	± 18 1653
3	450	50	9	200	0.4	65	660.4	-	-	-	355.6	-	-	1766 ± 26	1675 ± 34
4	495	55	11	176	0.32	250	639.1	-	273.9	-	-	-	-	1769 ± 26	1727 ± 36
5	495	55	11	176	0.32	260	485.1	220	-	207.9	-	-	-	1862 ± 29	1810 ± 28
6	540	60	9	192	0.32	250	434.8	180	35.1	128.8	42.1	16.4	11.8	1810 ± 23	1759 ± 39
7	495	55	6.6	154	0.29	100	553.6	165	35.1	128.8	42.1	16.4	11.8	1984 ± 25	1965 ± 21
8	495	55	6.6	192	0.35	75	474.5	165	46.8	171.7	56.1	21.9	15.7	1757 ± 24	1720 ± 29

C: سیمان، sf: میکروسیلیس، sp: فوق روان کننده، w: آب

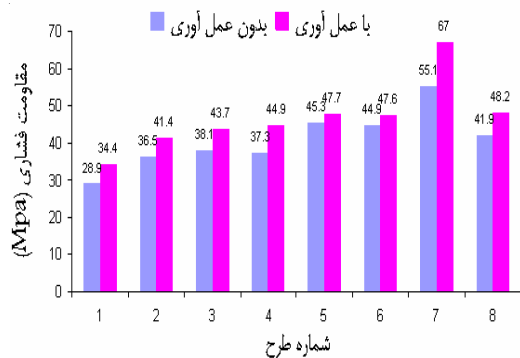
قرار گرفتند. نمونه‌های کششی و خمشی نیز در سن 28 روز و هر یک به تعداد 3 نمونه آزمایش شدند. نمونه‌ها بعد از 24 ساعت از قالب بیرون آورده شده و در محیط آزمایشگاه در آب 2 ± 20 درجه سانتیگراد تا روز آزمایش نگهداشته شده‌اند. برای بررسی تأثیر نوع عمل آوری بر مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها برای هر طرح تعداد 5 نمونه مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری 28 روزه، در هوای آزاد با رطوبت نسبی 15 ± 60 درجه نگهداری شده‌اند.

تحلیل نتایج آزمایش

مقاومت فشاری. نتایج مقاومت فشاری به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از دانه‌های سبک رس منبسط شده (لیکا) می‌توان به مقاومت‌های فشاری مطلوب دست یافت. در نمونه‌هایی که بدون پودر سنگ بوده‌اند بعد از شکستن نمونه‌ها خلل و فرج‌هایی به وضوح قابل مشاهده بوده‌اند اما در نمونه‌هایی که در آنها از پودر سنگ استفاده شده بود

استفاده قرار گرفته است. طرح‌های 7 و 8 نیز با هدف رسیدن به بالاترین مقاومت فشاری و حداقل وزن مخصوص طراحی شده‌اند. سبک بودن دانه‌های لیکا موجب می‌شود که حباب‌های هوا در هنگام ویبره کردن، به طور کامل از بتن تازه خارج نشوند و در طرح‌های آزمایشی بعد از شکستن نمونه‌ها، مشاهده گردید که علیرغم ویبره کردن مناسب حباب‌های هوایی که با چشم نیز دیده می‌شوند، به طور یکنواخت در بتن پراکنده‌اند. از این رو برای ایجاد بافتی پیوسته تر در بتن و کاهش تخلخل در آن، از پودر سنگ در طرح‌های 5 الی 8 استفاده شده است.

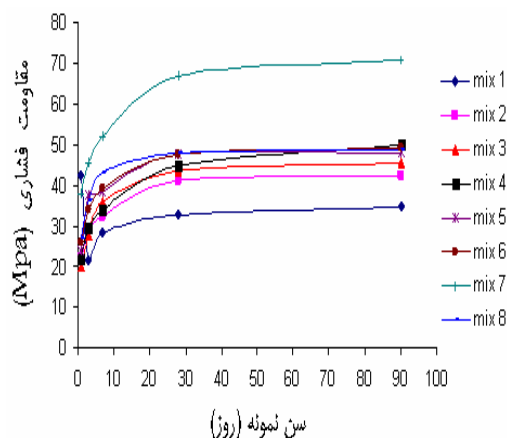
برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ mm، برای آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم از قالب‌های استوانه‌ای به قطر 100 mm و ارتفاع 200 mm و برای آزمایش مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری $100 \times 100 \times 500$ mm استفاده شده است. نمونه‌های فشاری در سن 1، 3، 7، 28 و 90 روز و برای هر سن 6 نمونه مورد آزمایش



شکل 2 تأثیر عمل آوری بر مقاومت فشاری

وزن مخصوص. متوسط وزن مخصوص‌های تر و خشک برای طرح‌های 1 تا 8 در جدول (2) آورده شده است. منظور از وزن مخصوص تر، وزن واحد حجم بتن بعد از 24 ساعت با سطح خشک و منظور از وزن مخصوص خشک، وزن واحد حجم بتن بعد از 28 روز نگهداری در هوای آزاد است. اگر وزن مخصوص بتن‌های نرمال سخت شده را 2400 Kg/m^3 در نظر بگیریم خواهیم دید که وزن بتن بین 18 تا 33 درصد کاهش یافته است و این نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این نوع بتن‌ها می‌توان نیروهای زلزله حاصل از وزن مرده سازه را به نحو چشمگیری کاهش داد. وزن مخصوص بتن‌های حاوی دانه‌های لیکا بستگی زیادی به میزان مصرف این دانه‌ها در بتن دارد. به طوری که هر چه این میزان بیشتر باشد وزن مخصوص پایین‌تری خواهیم داشت. همچنین برای بررسی تأثیر نوع دانه بندی بر وزن مخصوص بتن لیکا، در طرح‌های 1 تا 3 از سه نوع دانه بندی استفاده شده است. دیده می‌شود که با ریزتر شدن دانه‌های لیکا وزن مخصوص افزایش یافته است؛ به طوری که این افزایش با تغییر اندازه دانه‌ها از 2-4 میلی متر به 1-2 میلی متر حدود 2/7 درصد و از 1-2 میلی‌متر به 0/5-1 میلی متر حدود 1/3 درصد بوده است. در طرح‌های 4 و 5 که

تعداد زیادی از آنها حذف گردیدند. همچنین نمونه‌ها دارای سطح ظاهری مطلوبتری نیز بوده‌اند. با حذف همین خلل و فرج‌ها مقاومت فشاری نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. روند افزایش مقاومت فشاری کلیه طرح‌ها نسبت به زمان در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل 1 روند توسعه مقاومت فشاری با زمان

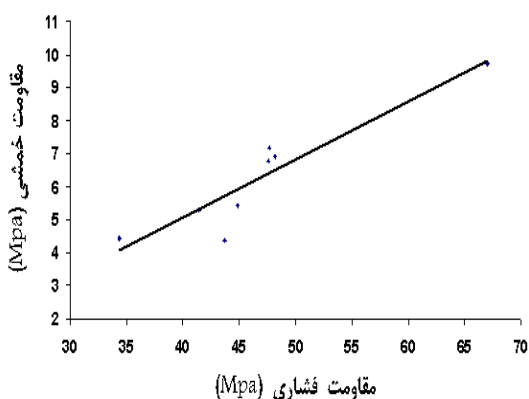
در حالت اخیر به طوری که در شکل (2) مشاهده می‌شود در کلیه طرح‌ها، مقاومت فشاری کاهش یافته که این کاهش بین 5 تا 18 درصد بوده است. تغییر دانه‌بندی دانه‌های لیکا در مقاومت فشاری مؤثر می‌باشد؛ به طوری که در طرح‌های 1 تا 3 مشاهده می‌شود با ریزتر شدن دانه‌ها مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و این افزایش با تغییر دانه‌ها از 2-4 mm به 1-2 mm و 0/5-1 mm حدود 20 و 27 درصد خواهد بود. انحراف معیار مقاومت فشاری نمونه‌های 1 روزه 2 تا 10 درصد، 3 روزه 2 تا 9 درصد، 7 روزه 5 تا 8 درصد و 28 روزه 4 تا 8 درصد بوده است.

که در جدول (3) آورده شده است. با استفاده از روش رگراسیون، بر طبق نتایج به دست آمده، ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (شکل 4) با دو فرمول زیر بیان می‌شود:

$$f_r = 0.76\sqrt{f_{cu}} \quad \text{بتن سبک بدون پودر سنگ}$$

$$f_r = 1.06\sqrt{f_{cu}} \quad \text{بتن سبک با پودر سنگ}$$

که در آن f_r مقاومت خمشی و f_{cu} مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی برحسب MPa است.



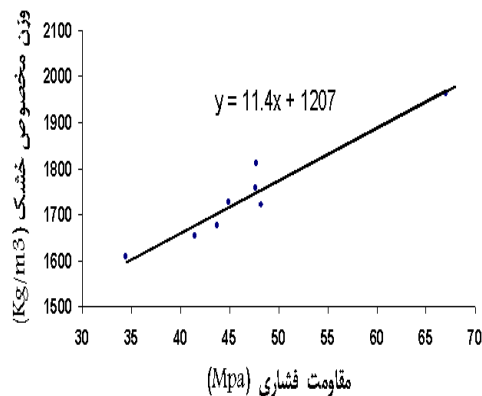
شکل 4 ارتباط مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

به دلیل اینکه پودر سنگ از خلل و فرج‌های داخلی بتن می‌کاهد مقاومت خمشی مطلوب تری نسبت به بتن سبکی که بدون پودر سنگ است، به دست می‌دهد. بنابراین وجود پودر سنگ علاوه بر اینکه به بتن از نظر ظاهری سطحی عاری از خلل و فرج می‌دهد، در بالا رفتن سایر خواص مکانیکی بتن، اثر بسیار مطلوبی نیز دارد. طبق نتایج این تحقیق مقاومت خمشی بتن لیکا با پودر سنگ در حدود 40 درصد بیشتر از بتن لیکای بدون پودر سنگ خواهد بود.

در ارائه یک فرمول تجربی که ارتباط بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن‌های سبک را نشان می‌دهد، کوئی و لی معادله زیر را پیشنهاد داده‌اند [6]:

$$f_r = 0.69\sqrt{f_{cu}}$$

تفاوت در میزان پودر سنگ و اندازه لیکا است، وزن مخصوص خشک از 1727 به 1810 کیلوگرم بر متر مکعب افزایش یافته است. با توجه به تأثیر نوع دانه‌های لیکا در طرح‌های 1 و 2، مشاهده می‌شود که استفاده از پودر سنگ در طرح 5، حدود 2 درصد افزایش وزن مخصوص را دربر داشته است و می‌توان به این نتیجه رسید که هر ده درصد پودر سنگ، به صورت درصدی از وزن مصالح سیمانی، وزن مخصوص این نوع بتن سبک را حدود 0/5 درصد افزایش خواهد داد. بنابراین در مقابل مزایایی که استفاده از آن در بتن سبک ایجاد می‌نماید این مقدار افزایش ناچیز خواهد بود. در طرح 7 دانه‌های لیکا 30 درصد مصالح سنگی را تشکیل داده و با افزایش آن تا 40 درصد در طرح 8، شاهد کاهش وزن مخصوص در حدود 12 درصد می‌باشیم، که قابل ملاحظه است. در کلیه این طرح‌ها مشاهده می‌گردد که به ازاء افزایش وزن مخصوص، مقاومت فشاری نیز افزایش یافته است. ارتباط بین مقاومت فشاری و وزن مخصوص خشک در شکل (3) نشان داده شده است. به کمک معادله این خط، در هنگام طراحی سازه می‌توان با توجه به مقاومت فشاری در نظر گرفته شده، وزن مخصوص بتن سبک را به دست آورد.



شکل 3 رابطه مقاومت فشاری و وزن مخصوص

مقاومت خمشی. مقاومت خمشی 28 روزه نمونه‌های آزمایش شده بین 4/36 MPa و 9/71 MPa بوده است

مقاومت کششی. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم 28 روزه به روش برزیلی صورت گرفته است و نتایج به دست آمده در جدول (3) آورده شده است. ضمناً ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم در شکل (5) ارائه شده است. همچنین فرمول تجربی زیر برای این نوع از بتن‌های سبک با و بدون پودر سنگ، پیشنهاد می‌شود:

$$f_t = 0.55\sqrt{f_{cu}} \quad \text{بتن سبک بدون پودر سنگ}$$

$$f_t = 0.65\sqrt{f_{cu}} \quad \text{بتن سبک با پودر سنگ}$$

که در آن f_t مقاومت کششی برزیلی و f_{cu} مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر حسب MPa است.

زنگ و گجرو برای بتن‌های سبک با مقاومت بالا فرمول زیر را پیشنهاد کرده اند [7]:

$$f_r = 0.73\sqrt{f_{cu}}$$

شورت و کینیرگ برای بتن‌های دانه رس منبسط شده سبک به معادله تجربی زیر دست یافته اند [8]:

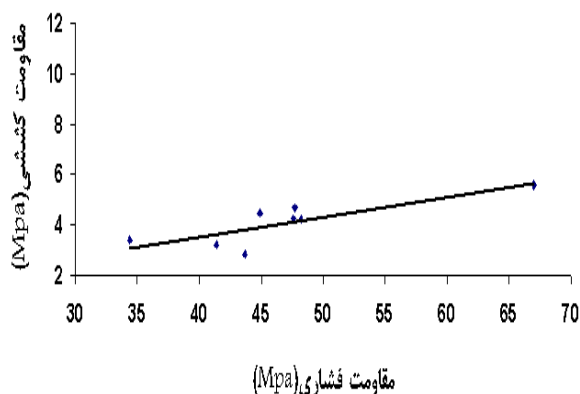
$$f_r = 0.76\sqrt{f_{cu}}$$

با مقایسه روابط تجربی ارائه شده گذشته و نتایجی که در این تحقیق به دست آمده است نقش قابل

ملاحظه پودر سنگ در افزایش مقاومت خمشی بتن لیکا کاملاً مشهود است.

جدول 3 مقاومت فشاری، کششی غیر مستقیم (روش برزیلی) و خمشی 28 روزه بتن بر حسب MPa

شماره طرح	مقاومت فشاری در شرایط عمل آوری	مقاومت فشاری بدون عمل آوری	مقاومت خمشی	مقاومت کششی غیرمستقیم (روش برزیلی)
1	34/4	28/9	4/44	3/42
2	41/4	36/5	5/28	3/24
3	43/7	38/1	4/36	2/86
4	44/9	37/3	5/43	4/50
5	47/7	45/3	7/17	4/68
6	47/6	44/9	6/76	4/27
7	67/0	55/1	9/71	5/59
8	48/2	41/9	6/89	4/21



شکل 5 ارتباط مقاومت فشاری و مقاومت کششی

نتیجه گیری

مکانیکی بتن سبک لیکا دارد.
 4- در صورت استفاده از پودر سنگ در بتن سبک لیکا، مقاومت خمشی حدود 40 درصد افزایش خواهد یافت بدون آنکه افزایش وزن مخصوص، قابل ملاحظه باشد.
 5- در این تحقیق ملاحظه گردید که عمل آوری بتن دانه سبک لیکا در مقاومت فشاری نهایی بسیار مؤثر است به طوری که بدون عمل آوری تا 18 درصد کاهش مقاومت مشاهده گردید.

1- با استفاده از دانه‌های سبک لیکا و میکروسیلیس می‌توان به بتن سبک با مقاومت بالا دست یافت.
 2- نوع دانه بندی دانه‌های لیکا و مقدار مصرف آنها نقش تعیین کننده‌ای در وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن دارند، به طوری که هر چه دانه‌ها ریزتر و یا مقدار آن کمتر باشد وزن مخصوص و مقاومت فشاری بالاتری به دست خواهد آمد.
 3- پودر سنگ اثر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود خواص

مراجع

1. "How to obtain – strength concrete using Density Aggregate," by V. Norok shchenov and w. whit comb .ACI. SP 121-33, P.683, (1990).
2. "High – Strength light weight concrete made with Scoria aggregate Containing mineral admixtures," by A. Kilic, C.D. Atis, E. Yasar, F. Ozcan, Cement and Concrete research, (2003).
3. "Properties of high – Performance LWAC for pre-cast structures with Brazilian light weight aggregates," by J.A. Rossignolo, M.V.C. Agnesinin, J.A. Morais, cement & concrete composites, (2001).
4. "Properties of High – strength Lightweight concrete Incorporating Fly Ash, Silica & Fume," by V.M. Malhotra, ACI. SP121-31, P.645, (1990).
5. "Complete directory for Leca and light weight expanded clay and its products," Mohamady, Tehrany, Fariborz, First edition, (1377).
6. "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of light weight concrete," by T.Y.Lo, H.Z/cui, Z.G.Li, waste Management, (2003).
7. "Mechanical properties of High – strength Lightweight concrete," by zhang, Gjorv, ACI materials journal 88(3), 240 –247, (1991).
8. "Lightweight concrete" by short, kinnburgh, applied science publishers Ltd, London, (1978).