



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی سبک

بررسی تأثیرات میکروسیلیس بر خصوصیات مقاومتی و دوام بتن سبک سازه‌ای و بحث در مورد توجیه پذیری اقتصادی آن

بهرام جبل عاملی^۱، آرش صداقت دوست^{۲*}، نویدرضا امیدقائم^۳، نیما امیدقائم^۴

۱. عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، bahramjabalameli@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، ۰۹۱۳۲۶۹۳۴۹۷، arashedaghat7099@yahoo.com

۳. دانشجوی کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، navid_oghaemi@yahoo.com

۴. دانشجوی کارشناسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، RDX_K98@yahoo.com

چکیده

کاهش وزن مصالح سازه‌ای سازه‌های بتنی و در نتیجه کاهش هزینه آن همیشه مورد توجه بوده است. بتن نیمه سبک ساخته شده با لیکای صنعتی به علت وزن مخصوص پایین و خصوصیات مقاومتی قابل قبول، به عنوان گزینه‌های برتر و مفید جهت کاهش وزن مخصوص بتن مطرح می‌شود. از طرفی، تخلخل زیاد بتن ساخته شده با لیکا، عاملی تهدید کننده برای بتن در برابر خوردگی و هوازگی و دیگر عوامل است. افزودن مواد پوزولانی به بتن خصوصیات مقاومتی و دوامی آن را بهبود میبخشد.

در این مطالعه با افزودن میکروسیلیس به بتن سبک سازه‌ای، نتایج حاصل شده در زمینه‌های مختلف شامل مقاومت فشاری و دوام در برابر عواملی چون نفوذ آب و حمله اسیدها بررسی شده است. مقاومت فشاری مطلوب، شرط لازم برای جایگزین کردن بتن سبک ساخته شده به جای بتن معمولی است و همچنین محیط مقاوم در برابر نفوذ اسید و آب، بتن را در برابر بارانهای اسیدی و سیکلهای یخبندان و آرماتورها در برابر خوردگی محافظت می‌کند.

میکروسیلیس با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ جایگزین سیمان شد و طرح اختلاط بر حسب این جایگزینی تنظیم شد. سپس مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد و آزمایشهای مربوط به دوام در برابر محیط‌های اسیدی و جذب آب نمونه‌ها انجام شد. در پایان با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایشات قبلی و برآورد هزینه‌های هر طرح و روش امتیاز دهی به خصوصیات طرحها، در مورد توجیه پذیری اقتصادی استفاده از این پوزولان در بتن سبک بحث شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن سبک سازه‌ای، پوزولان، لیکا، میکروسیلیس،

۱- مقدمه

سبک‌سازی از مسائل مهم و کلیدی در سازه‌های بتن آرمه می‌باشد که اخیراً در کشور ما توجه ویژه‌ای به آن شده است. سبک‌سازی سازه‌ها نه تنها باعث کاهش نیروهای زلزله‌وارد بر ساختمان و افزایش سطح ایمنی لرزه‌ای آن می‌شود، بلکه عاملی جهت

حفظ محیط زیست و مبدل ساختن صنعت ساختمان به صنعتی پایدار به دلیل کاهش مصرف مصالح سازه ای همچون میلگرد و سیمان می گردد[۱].

اگرچه بتن سبک باعث کاهش وزن سازه ها می شود ولی هزینه بالا، مقاومت فشاری کم و تخلخل زیاد از جمله معایب آن است. به نظر می رسد پوزولانها با توجه به خواص مفیدی که در بتن ایجاد می کنند بتوانند معایب فوق را تا حدودی بر طرف نمایند[۲]. در این مقاله سعی شده است این موضوع بررسی شود که میکروسیلیس به عنوان یک پوزولان تا چه اندازه می تواند معایب سه گانه ذکر شده فوق را در بتن سبک بهبود بخشد. میکروسیلیس به دلیل فعالیت بسیار بالای پوزولانی و همچنین بهبود ریز ساختار ناحیه انتقال میتواند گزینه مناسبی باشد.

در این تحقیق میکروسیلیس به مقادیر ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ به صورت جایگزین وزنی سیمان در بتن سبک استفاده شد. مقاومت فشاری به عنوان بیانگر خصوصیات مقاومتی بتن و میزان جذب آب به عنوان نماینده ای از خصوصیات دوامی بتن و دوام خمیر سیمانی در برابر محیط اسیدی به عنوان بیانگر توانایی بتن در حفاظت از آرماتورها در برابر عوامل اسیدی و دوام بتن در برابر محیطهای اسیدی بررسی شد. در پایان صرفه اقتصادی استفاده از میکروسیلیس در بتن سبک بررسی شد.

۲- برنامه آزمایش ها

در این آزمایش از هر طرح اختلاط چهار نمونه بتن $15 \times 15 \times 15$ و دو نمونه $10 \times 10 \times 10$ و پنج نمونه $5 \times 5 \times 5$ از خمیر سیمانی استفاده شده در بتن، ساخته شد. که دو نمونه $15 \times 15 \times 15$ در سن ۷ روز و دو نمونه ی دیگر در سن ۲۸ روز مورد آزمون مقاومت فشاری قرار گرفته شد و دو نمونه $10 \times 10 \times 10$ در سن ۲۸ روز برای آزمون جذب آب و دو نمونه سیمانی $5 \times 5 \times 5$ برای تست دوام در برابر اسید کلردریک مورد استفاده قرار گرفته شد.

۲-۱- مصالح خام

۲-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱ اصفهان (گرید ۴۲.۵، سطح مخصوص بلین $342 \text{ m}^2/\text{kg}$) همراه با استاندارد ایران (ISIRI) می باشد. ویژگیهای فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان در جدول ۱ و ۲ به ترتیب داده شده است.

جدول ۱: ویژگیهای فیزیکی سیمان استفاده شده در این پژوهش

ویژگی	چگالی (g/cm^3)	Blaine سطح مخصوص (cm^2/g)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	چگالی انباشته (g/cm^3)
مقدار	۳.۱۵	۳۴۲۰	۴۴.۵	۱.۰۷

۲-۱-۲- دوده سیلیسی (میکرو سیلیس)

میکرو سیلیس پودری بسیار نرم سفید رنگ و تشکیل شده از بلورهایی با قطرهای بین $0/1$ و $0/2$ میکرون می باشد. به دنبال عمل هیدراتاسیون سیمان، هیدروکسید کلسیم آزاد شده حدوداً ۲۰ درصد حجم ملات را به خود اختصاص می دهد و این جزء می تواند به سادگی در آب حل شود و به خارج از بتن انتقال یابد. خواص مکانیکی و دوام آنرا تضعیف کند. واکنش های قلیایی سنگدانه ها نیز با وجود هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان تشدید می گردد. بدین ترتیب هیدروکسید کلسیم جزء تضعیف کننده مخلوط بتن بوده و به علت ناپایداری، منشاء ضعف بتن است [۳]. استفاده از میکرو سیلیس، موجب می شود که پیوستگی بین خمیر سیمان - مصالح سنگی بهبود یابد. ترکیب شیمیایی میکروسیلیس نیز در جدول ۲ قابل ملاحظه می باشد.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی سیمان و میکروسیلیس

اکسیدهای تشکیل دهنده	سیمان پرتلند	میکرو سیلیس
SiO ₂	۲۱/۰۰	۹۱/۱۰
Al ₂ O ₃	۴/۶۰	۱/۵۵
Fe ₂ O ₃	۳/۲۰	۲/۰۰
CaO	۶۴/۵۰	۲/۴۲
MgO	۲/۰۰	۰/۰۶
SO ₃	۲/۹۰	۰/۴۵
Na ₂ O+K ₂ O	۱/۰۰	-
LOI	۱/۵۰	۲/۱۰

۲-۱-۳ سنگدانه سبک (لیکا)

واژه لیکا از عبارت (Light Expanded Clay Aggregate) دانه رس منبسط شده) گرفته شده است. در کشور ما تنها، شرکت لیکای ایران به تولید این سبکدانه های رس منبسط شده می پردازد. محصولات این کارخانه از نوع خاصی از رسها که قابلیت تورم دارند، درست می شود. به این ترتیب که این رسها را با یک سری مواد که موجب تسریع تورم می شوند، مخلوط می کنند. سپس از داخل یک کوره گردان عبور داده می شوند. کوره به وسیله ترکیبی از زغال سنگ و نفت مشتعل می شود و دما را تا حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد می رساند تا در نهایت مصالح سبکی با ساختار داخلی متخلخل تشکیل می گردد.[۴] در این کار پژوهشی لیکای مورد استفاده بطور مستقیم از شرکت لیکای ایران واقع در ساوه تهیه شد.

۲-۱-۴ ماسه

در این پژوهش ماسه ی مورد استفاده از نوع ماسه ی شسته رودخانه ای ۵-۰ می باشد که از معدن صدف ی اصفهان تهیه گردید. وزن مخصوص این ماسه در حالت کاملاً خشک برابر ۲۷۰۰ Kg/m³ می باشد.

۲-۱-۵ ابر روان کننده

ابر روان کننده مورد استفاده پلی کربوکسیلات با درصد مواد جامد ۴۰٪ ساخت شرکت آبادگران می باشد. درصد ابر روان کننده با توجه به مقادیر گوناگون ذرات میکرو سیلیس در طرح های اختلاط مختلف تنظیم شد. قیمت هر کیلو گرم از این روان کننده برابر ۵۷۰۰۰ ریال می باشد.

۲-۲ روش اختلاط

میکسر مورد استفاده در این پژوهش از نوع چرخان با حداکثر حجم ۵۰ لیتر است و روش اختلاط مصالح به صورت زیر می باشد : ابتدا مصالح خشک در میکسر به مدت ۲ دقیقه کاملاً با هم مخلوط شدند. سپس ۵۰ درصد آب و کل مواد سیمانی نیز وارد میکسر و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند و در نهایت از بقیه ی آب و فوق روان کننده محلولی ساخته شد و به بتن اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه کاملاً با هم مخلوط شدند. سپس بتن را در قالبهای مورد نظر ریخته و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها را از قالب خارج کرده و در حوضچه آب ۲۳ درجه قرار گرفت.

همچنین برای ساخت نمونه های خمیر سیمانی، ابتدا سیمان و میکروسیلیس با همان درصد استفاده شده در بتن، با دست مخلوط شدند و سپس آب به میزان ۲۷٪ کل مواد سیمانی اضافه شد و پس از مخلوط کردن بادیست، قالب گیری شدند.

۲-۳ طرح اختلاط:

جزئیات طرح اختلاط در جدول ۱ نمایش داده شده است. نسبت آب به مواد سیمانی برای همه ترکیبها ۰.۴ در نظر گرفته شده. اسلامپ همه بتن‌ها به وسیله روان کننده ثابت نگه داشته شده است.

جدول ۳: طرح اختلاط ها

نام مخلوط	S0	S1	S2	S3	S4
درصد میکروسیلیس	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰
سیمان (kg/m ³)	۴۰۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰	۳۲۰
میکروسیلیس (kg/m ³)	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰
ماسه لیکا	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵
۴-۱۰ لیکا	۱۸۳.۷	۱۸۳.۷	۱۸۳.۷	۱۸۳.۷	۱۸۳.۷
۱۰-۲۵ لیکا	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵	۱۲۲.۵
ماسه شسته	۳۰۶.۲	۳۰۶.۲	۳۰۶.۲	۳۰۶.۲	۳۰۶.۲
آب (kg/m ³)	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰
فوق روان کننده	۵۴.۴۵	۶۵.۰۹	۸۱.۳۷	۹۵.۷۷	۹۵.۷۷
آب/مواد سیمانی	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴
فوق روان کننده/مواد سیمانی	%۰.۷۵	%۱	%۱.۲۵	%۱.۵	%۱.۵

۲-۴ آزمون مقاومت فشاری:

برای هر طرح اختلاط نمونه های مکعبی ۱۵ سانتی متری با سن ۲۸,۷ روز آزمایش شدند و میانگین دو نمونه به عنوان مقاومت فشاری ثبت گردید آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه ها با دستگاه پرس استاندارد با کنترل بارگذاری 0.68 Mpa/s انجام شد.

۲-۵ تست جذب آب کوتاه مدت:

ضریب جذب آب به عنوان یکی از روشها و پارامترهای اندازه گیری نفوذ پذیری بتن مطرح می باشد. بنابر استاندارد ASTM C1585، این ضریب با اندازه گیری میزان آب جذب شده توسط نمونه های بتن خشک در مدت زمان یک روز بدست می آید. نمونه های بتنی به این صورت مورد آزمایش قرار گرفتند: ابتدا در آون ۱۰۵ درجه به مدت ۷ روز قرار داده شدند تا خشک شوند و وزن آنها ثابت شود. سپس در یک محیط خشک به مدت ۳ روز خنک شدند، در مرحله بعد ۴وجه کناری نمونه ها با چسب اپوکسی شفاف پوشانده شد و انتهای نمونه به ضخامت ۳ mm در آب فرو برده شد و انتهای دیگر نمونه توسط یک پلاستیک و کش پلاستیکی پوشانده شد. مقدار آب جذب شده در زمان های ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۳۰۰ دقیقه برای همه نمونه ها ثبت شد.

۲-۶ تست دوام در برابر اسید:

برای هر طرح اختلاط پنج نمونه مکعبی ۵ سانتی متری با سن ۲۸ روز آزمایش شدند و میانگین نمونه های صحیح به عنوان نمایانگر دوام در برابر محیط اسیدی ثبت گردید. آزمایش دوام در برابر اسید روی نمونه ها با استفاده از اسید هیدروکلریک ۳ درصد جرمی انجام شد. نمونه ها پس از خشک شدن به مدت ۱۵ دقیقه در محیط اسیدی قرار گرفتند. پس از آن نمونه ها شستشو و اسید زدایی شدند و دوباره خشک گردیدند. اختلاف جرم ایجاد شده در نمونه ها نمایانگر میزان خوردگی در برابر یون H⁺ (اسید) است. درصد اختلاف جرم برای هر نمونه محاسبه شد و میانگین نتایج به دست آمده از نمونه های هر طرح محاسبه و با هم مقایسه شدند.

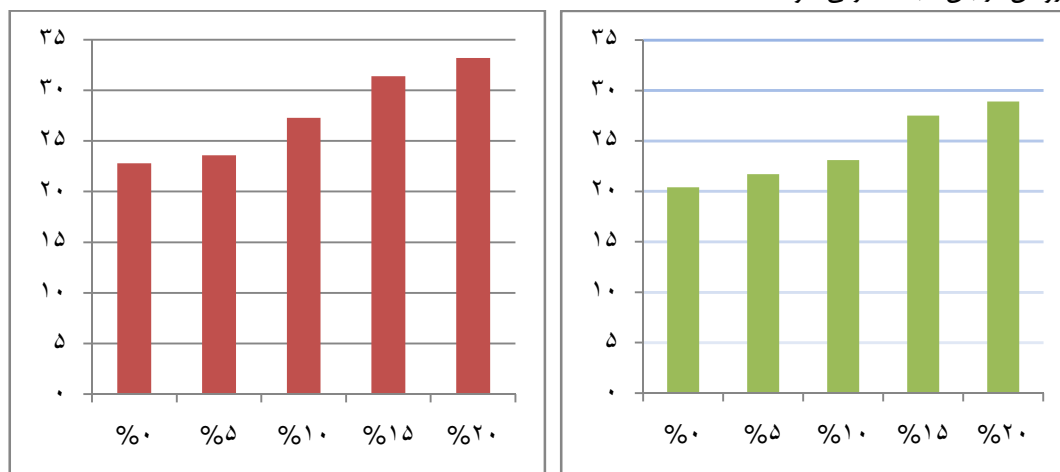
۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث در مورد آنها

۳-۱ مقاومت فشاری

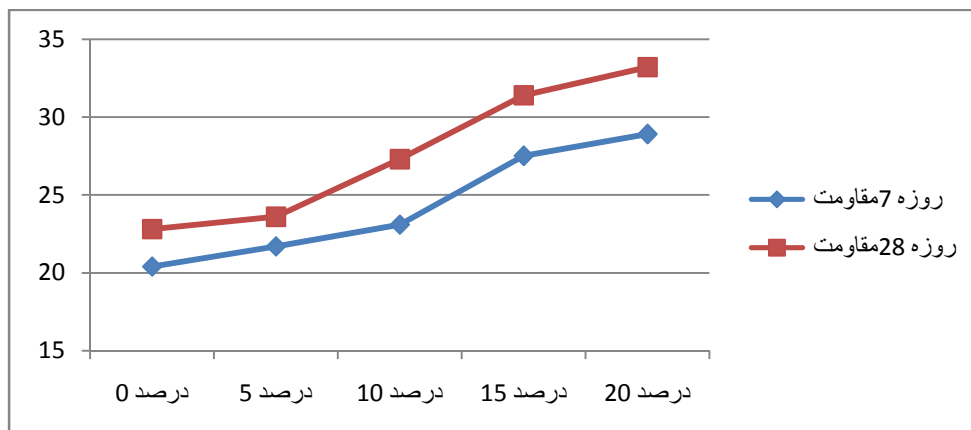
جدول ۴: نتایج تست مقاومت فشاری

درصد میکرو سیلیس	مقاومت فشاری در ۷ روز (Mpa)	مقاومت فشاری در ۲۸ روز (Mpa)
۰	۲۰.۴	۲۲.۸
۵	۲۱.۷	۲۳.۶
۱۰	۲۳.۱	۲۷.۳
۱۵	۲۷.۵	۳۱.۴
۲۰	۲۸.۹	۳۳.۲

با مطالعه و داده های فوق، به این نتیجه می رسیم که با جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد میکروسیلیس با مواد سیمانی در همه درصد ها رشد مقاومت داشته ایم. با توجه به نمودار های ۱ و ۲ که مقاومت های فشاری به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روز می باشد، "بیشترین رشد مقاومت" مربوط به مقدار جایگزینی ۱۵ درصد میباشد که نسبت به بتن شاهد حدود ۳۸ درصد افزایش داشته است و رشد مقاومت در مقادیر بیش از ۱۵ درصد میکروسیلیس کندتر می باشد. شاید مقدار ۱۵ درصد میکرو سیلیس به عنوان مقدار اوپتیمم این پوزولان در بتن سبک معرفی شود.



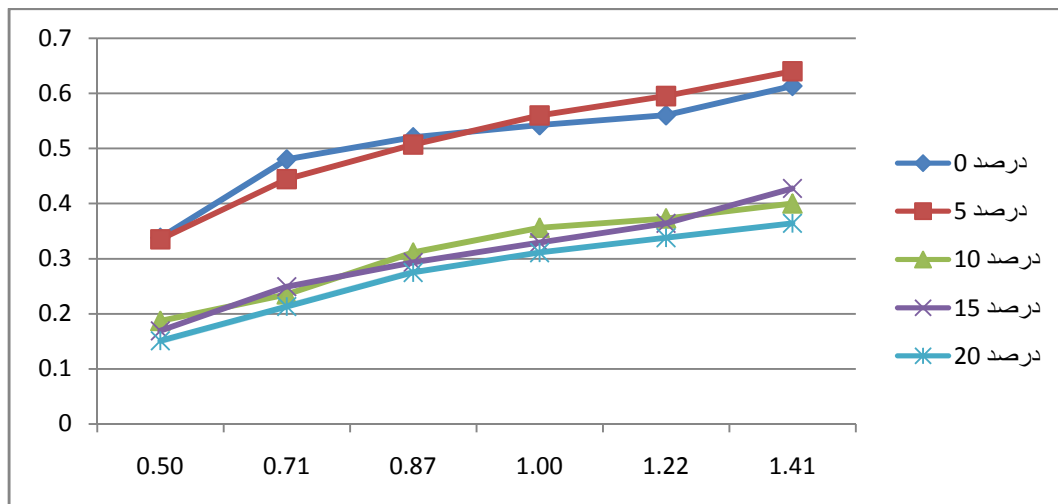
نمودار ۱ - مقاومت فشاری ۷ روزه نمودار ۲ - مقاومت فشاری ۲۸ روزه



نمودار ۳ - مقایسه ای از مقاومت های فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز

۲-۳ تست جذب آب

تست جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C1585 بدین صورت انجام می شود که نمودار مقدار آب جذب شده از سطحی که در تماس با آب است با پارامتر Kg/M^2 بر حسب جذر زمان رسم می شود تا مقایسه ای از میزان جذب آب فراهم شود. به نمودار ۴ توجه کنید.



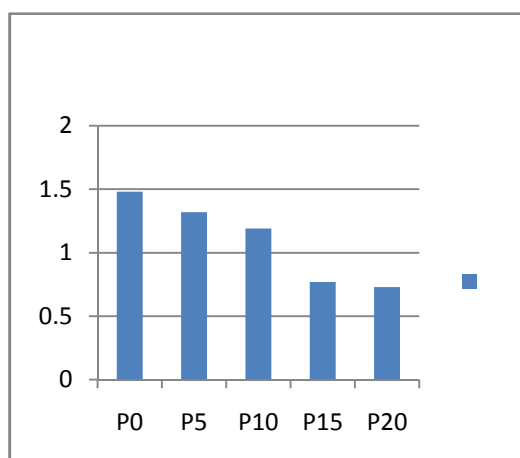
نمودار ۴- جذب آب نمونه ها در واحد سطح بر حسب جذر زمان

همانگونه که از نمودار برداشت می شود، افزایش میزان میکرو سیلیس مرتبا موجب کاهش میزان جذب آب می شود. و همچنین مابین ۵ و ۱۰ درصد یک پرش وسیع در کاهش میزان نفوذپذیری مشاهده می شود.

۳-۳-۳ تست دوام در برابر اسید

این آزمایش طبق روشی که گفته شد روی پنج نمونه مکعبی به ضلع ۵ سانتیمتر انجام شده است. درصد خوردگی در برابر اسید کلریدریک برای هر طرح مطابق جدول ۵ به دست آمده است.

جدول ۵-درصد خوردگی طرحها



نمودار ۵- درصد خوردگی طرحها

طبق نتایج به دست آمده میزان خوردگی خمیر سیمان در محیط اسیدی، با افزایش مقدار میکروسیلیس، کاهش میابد. همچنین

تفاوت زیاد در میزان احلال در اسید بین درصدهای ۱۰ و ۱۵ کاملاً مشهود است. در حالی که تفاوت بین درصدهای ۱۵ و ۲۰ کم است. اینکه دوام در برابر محیطهای اسیدی تا چه اندازه مهم است، بستگی به کاربری بتن دارد که آیا بتن در معرض حمله اسیدها قرار میگیرد یا نه. مثلاً بتن در برابر بارانهای اسیدی قرار میگیرد یا نه.

۴- صرفه اقتصادی

در کل هدف از انجام اینگونه پژوهش ها بدست آوردن نتایجی جهت بهبود و ارتقا کیفیت ساخت و ساز می باشد. به همین جهت در این قسمت ضمن برآورد هزینه ی طرح ها و با در نظر گرفتن خصوصیات مقاومتی آن ها مقایسه ای صورت گرفته که شرح آن در ادامه آورده شده است.

برآورد هزینه طبق رابطه ی زیر صورت گرفته است :

$$PC = \frac{1}{500} (0.6 \times C + 57 \times SP + 0.65 \times L + 0.075 \times A + 3.5 \times PZ)$$

لازم به ذکر است در این رابطه PC برابر با ضریب هزینه ی یک متر مکعب بتن و C برابر مقدار سیمان و SP برابر مقدار روان کننده و L برابر مقدار لیکا و A برابر مقدار ماسه ی معمولی و PZ برابر با مقدار میکرو سیلیس بر حسب کیلوگرم در یک متر مکعب بتن می باشد. همچنین در این رابطه ضریب SP که عدد ۵۷ می باشد از تقسیم قیمت یک کیلو گرم فوق روان کننده بر حسب ریال بر ۱۰۰۰ بدست آمد.

بعنوان مثال برای طرح ۰٪ میکرو سیلیس مقدار PC بصورت زیر بدست می آید:

$$P0 = \frac{1}{500} (0.6 \times 400 + 57 \times 3 + 0.65 \times 428.7 + 0.075 \times 306.2 + 3.5 \times 0)$$

حال پارامتری دیگر تحت عنوان CEF و به صورت $CEF = \frac{f_c}{PC}$ معرفی می کنیم که در آن f_c مقاومت ۲۸ روزه ی نمونه و PC ضریب هزینه ی طرح می باشد. پس هرچه CEF برای یک طرح میزان بالا تری باشد آن طرح برای استفاده مطلوب تر است.

جدول ۶- CEF و PC طرح ها

درصد میکروسیلیس	PC	CEF
۰	۲۲.۸	۱۵.۹۹۷۳
۵	۲۳.۶	۱۴.۵۱۸۳
۱۰	۲۷.۳	۱۴.۴۸۰۹
۱۵	۳۱.۴	۱۴.۸۴۴۶
۲۰	۳۳.۲	۱۴.۸۷۹۶

با توجه به این مقادیر میتوان نتیجه گرفت که بهترین طرح از نظر مقاومت فشاری و قیمت، طرح ۲۰ درصد می باشد. که البته این مقایسه ما بین بتن های حاوی میکروسیلیس صورت گرفته است و بتن بدون میکروسیلیس به دلیل فاکتور هزینه پایین بیشترین CEF را دارد. همچنین با توجه به جداول ۵ و ۶، اگرچه افزودن میکروسیلیس باعث افزایش ضریب قیمت می شود ولی افزایش مقاومت فشاری موجب ثابت نگه داشتن CEF میشود.

۵- نتیجه گیری

- اینگونه برداشت میشود "بیشترین رشد مقاومت" مربوط به مقدار جایگزینی ۱۵ درصد میباشد.
- ملاحظه میشود که افزایش مقدار میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری شده است و افزایش بیش از ۱۵ درصد میکروسیلیس باعث رشد کمتر مقاومت میشود و در نتیجه استفاده از ۱۵ درصد میکروسیلیس به جای سیمان بهترین مقدار ممکن میباشد.
- در تست جذب آب بین ۵ درصد و ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس یک بهبود عمده مشاهده میشود یعنی استفاده از ۱۰ درصد

میکروسیلیس باعث کاهش شدید نفوذپذیری می‌گردد.

در تست دوام در برابر اسید، بین درصدهای ۱۵ و ۱۰ میکروسیلیس، یک بهبود عمده مشاهده میشود. یعنی استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس باعث افزایش زیاد دوام در برابر محیط اسیدی می‌شود.

۶- منابع

- [۱] **Historical Background of Lightweight Aggregate Concrete**, Satish Chandra and Leif Berntsson, [۱] Lightweight Aggregate Concrete, 2002, Pages 5-19
- [۲] **Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates**, Min-Hong Zhang, Cement and Concrete Research, and Odd E. GjØrv, November 1990, Pages 884-890, Volume 20, Issue 6
- [۳] **بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن های سبک به منظور تهیه بتن سبک مقاومت بالا**، احمدی مقدم، حق بین، قادر، اصغری نیا، ششمین کنگره ملی مهندسی ایران، سمنان، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۰
- [۴] **بتن سبک ساخته شده با لیکا و مقایسه آن با بتن معمولی از لحاظ مقاومت فشاری به روش پیچش و جک فشاری**، محمود نادری، علیرضا بنیادی، ششمین کنگره ملی مهندسی ایران، سمنان، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۰