

بررسی آزمایشگاهی بهینه‌ترین طرح اختلاط بتن اسفنجی حاوی افزودنی ژل

میکروسیلیس بر پایه بیشینه مقاومت فشاری و نفوذپذیری

مهدی کماسی^{۱*}، شایان خسروی^۲، حسین چوبکار^۳

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده

یکی از ایده‌های جالب و بسیار کارآمد در روسازی‌ها و کفپوش‌ها معایب استفاده از بتنی نفوذپذیر به نام بتن اسفنجی یا متخلخل است. از بتن اسفنجی که دارای مزایای اقتصادی و به خصوص زیست‌محیطی فراوانی است می‌توان در کاهش رواناب سطحی هنگام بارندگی، به تاخیر انداختن ورود آب باران به سیستم فاضلاب به دلیل جذب آن توسط زمین، اصلاح کیفیت آبهای زیرزمینی به دلیل عدم عبور آب از سطح زمین و تماس با آلودگی‌های احتمالی استفاده کرد. در این پژوهش از چهار طرح اختلاط متفاوت برای سه دانه‌بندی سنگدانه که در حالت کلی ۱۲ حالت طرح اختلاط را در بر می‌گیرد، استفاده شده که شامل نمونه بتن‌های معمولی و نمونه‌های دارای افزودنی ژل میکروسیلیس بوده‌اند. در انتها بر روی آن‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری صورت گرفته است. نتایج بدست آمده از پژوهش نشان می‌دهد که بتن‌هایی که چگالی بیشتری یا به عبارتی دانه‌بندی ریزتر داشتند مقاومت فشاری به میزان ۹ مگاپاسکال بیشتر از خود نشان داده اما ۱۵ درصد نفوذپذیری کمتری را دارا می‌باشند. به طور کلی مطابق نتیجه این آزمایشات عوامل موثر بر چگالی بتن اسفنجی را می‌توان اندازه سنگدانه‌ها، کارایی و میزان ژل میکروسیلیس بیان کرد. که ژل میکروسیلیس به دلیل دارا بودن فوق‌روان‌کننده کارایی، مقاومت و دوام بتن را افزایش داده ولی موجب کاهش تخلخل بتن می‌شود اما به گونه‌ای که باز هم نفوذپذیری آن نسبت به بتن معمولی قابل قبول است. در نهایت بهینه‌ترین دانه‌بندی برای مقاومت فشاری و نفوذپذیری مطلوب در دانه‌بندی شماره ۳ این پژوهش بدست آمده است که در آن نصف سنگدانه‌ها از باقی‌مانده‌های الک ۳/۸ و نصف دیگر از باقی‌مانده‌های روی الک ۴ تشکیل شده است و بسته به این که نیاز به مقاومت یا نفوذپذیری بیشتر باشد می‌توان با پارامترهایی همچون نسبت آب به سیمان، نسبت شن به سیمان و افزودن میکروسیلیس ویژگی مورد نظر را بدست آورد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: بتن اسفنجی، ژل میکروسیلیس، نفوذپذیری بتن اسفنجی، طرح اختلاط بتن اسفنجی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.135444.1586	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.135444.1586	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۸/۰۸	۱۳۹۷/۰۶/۱۴	۱۳۹۷/۰۲/۲۰
مهدی کماسی				*نویسنده مسئول:	
komasi@abru.ac.ir				پست الکترونیکی:	

Laboratory study for optimal mixing scheme of pervious concrete containing additive of microsilica fume based on maximum compressive strength and permeability

Mehdi Komasi^{*1}, shayan khosravi², hossein chobkar³

1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran

2 International Institute of Earthquake Engineering and Seismology(IIEES), Tehran, Iran

3 Islamic Azad University- Tehran Southern Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

One of the useful and efficient ideas in pavement and flooring is use of permeable concrete which is called pervious concrete. Pervious concrete that has many economic and especially environmental impacts can be used for reducing surface runoff during rainfall, delaying the entry of rainwater into the sewage system due to its absorption by the ground, improving the quality of groundwater due to lack of water flow from the ground and contact with possible contamination. In this study, four different mix design were used for three types of aggregating aggregates, which contains 12 general mixing states, including samples of simple concrete and examples of microsilica fume additives. At the end, compressive strength and permeability tests have been carried out on them. The results obtained from the research show that the individual with a higher density or, in other words, a finer grain size, exhibited a compressive strength of 9 Mpa, but had a 15% lower permeability. In general, according to the results of these experiments, the factors affecting the density of pervious concrete can be expressed by the size of the aggregates, the efficiency and the amount of microsilica fume. Because of its superplasticizing, the microsilica fume increases the strength and durability of concrete but reduces porosity of concrete, but its permeability is still acceptable to simple concrete. Finally, the optimum aggregate for compressive strength and optimal permeability, is obtained in third type of aggregating in this study, In which half of the aggregates have been formed of residues on the sieve of 3.8 and the remaining half of the residues on the sieve of 4 and depending on the need for greater resistance or permeability, parameters such as water to cement ratio, sand/cement ratio and microsilica fume addition can be obtained, which has been investigated in this study.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 June 2018

Revise Date: 05 September 2018

Accept Date: 30 October 2018

Keywords:

pervious concrete, Microsilica fume, pervious concrete permeability, pervious concrete, mixing design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.135444.1586

*Corresponding author: Mehdi Komasi
Email address: komasi@abru.ac.ir

۱- مقدمه

تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان رشد روزافزونی خواهد داشت و به طور بالقوه به جمعیت شهرها ۲/۵ میلیارد اضافه خواهد شد [۱]. بدین منظور انجمن سیمان پرتلند تحقیقاتی را به منظور استفاده از بتن برای کاربردهای مختلف آغاز نموده است که در این راستا پس از آزمایشات و تحقیقات فراوان موفق شد به راه حل بسیار مناسبی به نام بتن اسفنجی دست یابد که می‌تواند تحولات زیادی را در محوطه‌سازی‌های شهرها ایجاد کند [۲].

بتن اسفنجی یک مخلوط سنگدانه درشت، سیمان، آب و ماسه به میزان اندک و در برخی موارد بدون ماسه می‌باشد. حفره‌های خالی که در این نوع بتن وجود دارد اجازه می‌دهد هوا و آب به راحتی از میان سطوح لایه‌های زیرین عبور کند [۳]. از این نوع بتن که از دسته‌ی بتن با منافذ بالا است [۴] برای مطالعه و بررسی ویژگی‌های نفوذپذیری استفاده می‌شود [۵]. در ساختار این بتن، ۱۵ تا ۳۰ درصد از حجم کل را فضای خالی تشکیل می‌دهد که این امر موجب عبور آب از داخل بتن و هدایت مطلوب هیدرولیکی می‌گردد [۶]. در بتن اسفنجی از آب کمتری نسبت به دیگر انواع بتن استفاده می‌گردد [۷]. تولیدکنندگان سیمان درصد هستند مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان و مقدار گاز انتشار یافته در روند تولید سیمان را کاهش دهند. به همین دلیل در پی جستجوی موادی برای جایگزینی سیمان هستند. ماده‌ای که برای جایگزینی سیمان (یا بخشی از سیمان) در نظر گرفته می‌شود، از یک طرف باید عوامل منفی مانند نیاز به سنگ آهک، تولید CO₂، صرف انرژی و هزینه زیاد را کاهش دهد و از طرفی، باید منجر به افزایش خصوصیات مثبت بتن مانند مقاومت و دوام باشد. راهکار پیشنهادی، استفاده از پوزولان است. در این پژوهش از پوزولان ژل میکروسیلیس که محبوبیت جهانی دارد استفاده شده است [۸]. بتن اسفنجی دارای مزایای اقتصادی و زیست محیطی فراوانی است. از مزایای اقتصادی آن می‌توان به پایین آمدن هزینه‌ها به منظور هدایت آب‌های سطحی حاصل از بارش‌های جوی به تصفیه خانه فاضلاب، رودخانه و... اشاره داشت. از دیگر مزایای زیست محیطی آن می‌توان به جلوگیری از بروز آب گرفتگی در معابر و اماکن به هنگام بارندگی، جلوگیری از آلوده شدن آب بارندگی اشاره نمود. از دیگر مصارف بتن اسفنجی می‌توان به ساخت فیلتر جهت تصفیه آب اشاره کرد [۹].

در سال ۲۰۰۴ تنیس و همکاران به بررسی تاثیر آب و مواد سیمانی بر نفوذپذیری و زهکشی بتن اسفنجی پرداخت و ACI 2010 در گزارش 522R-10 با استفاده از این تحقیق، درصد آب به سیمان را ۲۷ تا ۳۴ درصد لحاظ نمود [۱۰]. و در سال ۲۰۰۶، شافر و همکارانش به تاثیر مصالح ریزدانه به طور میانگین ۵ تا ۷ درصد بر بتن اسفنجی پرداختند [۱۱]. در این راستا کورن و همکاران در سال ۲۰۰۸ این پژوهش را تکمیل نموده و مسایل زیست‌محیطی این ریزدانه‌ها را بررسی نمودند [۱۲]. کاربرد دیگر این بتن توسط لمینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ در رواناب سطحی که تحت تاثیر شیب زمین و نوع پوشش گیاهی قرار دارد مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. از دیگر پژوهش‌هایی که در مورد بتن اسفنجی انجام گرفته در سال ۲۰۰۷ توسط دیلیت و همکاران بوده است. آنها به بررسی تعلیق گرمایی در پروژه‌هایی که از این بتن استفاده شده پرداخته و عملکرد مناسب این نوع بتن جهت ترمیم‌پذیری سطح روسازی در اثر کاهش ۱۵ درصدی جرم این بتن طی فرآیندهای آزمایشگاهی را گزارش نمودند. آنها همچنین دریافتند که نفوذ مصالح ریزدانه درون بستر نفوذپذیر علت اصلی گرفتگی سطح روسازی می‌باشد [۱۴]. ابل در سال ۲۰۰۷ به خواص و ویژگی‌های این بتن از جمله نفوذپذیری، پوکی موثر، وزن واحد حجم و مقاومت فشاری پرداختند [۱۵]. کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و کاهش سر و صدا در پیاده‌روها موضوعات مورد بررسی در مورد این بتن در سال ۲۰۰۸ توسط آسلی می‌باشد [۱۶]. یک سال بعد در سال ۲۰۰۹ کورن و همکارانش در پی تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۸ انجام دادند به موضوع عمل‌آوری و مدت زمان نگهداری رویه‌های بتن اسفنجی پرداختند. سال ۲۰۱۱، سلیمان و همکاران مقرون به صرفه بودن و عملکرد درازمدت بزرگراه‌های بتنی که از جمله فواید بتن اسفنجی است را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. در همین سال بود که ونکورا و همکاران به رفتار سازه‌های بتن اسفنجی از جمله چگالی و... پرداختند [۱۸]. همچنین رادن و همکاران طراحی هیدرولوژیکی روسازی پایدار بتن

اسفنجی را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها برای این کار از نرم افزاری به نام PerviousPave استفاده کردند. از اصلی‌ترین نوآوری‌های این نرم افزار حذف فرسایش ناشی از معیار شکست روسازی است. در این نرم‌افزار ضخامت مورد نیاز دال بتنی توسط الگوریتم طراحی سازه که به طور مستقیم در طراحی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد تعیین می‌شود [۱۹].

با بررسی تحقیقات گذشته در مورد بتن اسفنجی به نظر می‌رسد که به طرح اختلاط مناسبی با رویکرد همزمان مقاومت فشاری و زهکشی مطلوب کمتر توجه شده از این رو در این پژوهش، این جنبه‌ی بتن اسفنجی را برای نمونه‌های معمولی و نمونه‌های با افزودنی ژل میکروسیلیس جهت افزایش مقاومت، تاثیر آن بر تخلخل و نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. و در این راستا نمونه‌های متفاوت بتن ساده معمولی و حاوی ژل میکروسیلیس به منظور مقایسه با نتایج بتن اسفنجی و معمولی آورده شده است.

۱-۱) اجزاء و ساختار بتن اسفنجی

با توجه به اینکه بخش اعظم بتن اسفنجی شامل سنگدانه‌ها می‌باشد بررسی نوع و کیفیت این مصالح اهمیت فراوانی دارد. اندازه سنگدانه مصرفی با کیفیت و کارایی بتن اسفنجی و زیبایی ظاهری سطح آن رابطه مستقیم دارد. استفاده از سنگدانه‌های درشت‌تر باعث زبرتر شدن سطح، کاهش زیبایی ظاهری آن، همچنین باعث بزرگی خلل و فرج موجود در بتن اسفنجی، افزایش میزان نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. همچنین جهت افزایش مقاومت بتن اسفنجی، بایستی از سنگدانه‌های تقریباً هم‌شکل و هم‌اندازه استفاده گردد که جهت برآورده کردن این موضوع بایستی ضریب یکنواختی مصالح سنگی برابر عدد یک و یا عددی نزدیک یک باشد. همچنین هرچه سنگدانه‌ها گردگوشه‌تر باشند خاصیت مویبندی در حفره‌های بتن اسفنجی افزایش یافته و جهت به دست آوردن مقاومت بالاتر حتی می‌توان از مصالح سنگی مقاوم‌تری مانند مصالح کوارتزی و یا گرانیتی نیز استفاده نمود. در زیر به چهار دانه‌بندی مصالح سنگی اشاره شده است. امکان استفاده از مصالح درشت‌تر نیز وجود دارد ولی توصیه می‌گردد که مصالح مصرفی در ساخت بتن اسفنجی از ردیف (ت) کوچکتر نباشند [۲۱].

جدول ۱: مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی

ردیف	رد شده از الک	مانده روی الک	شکل
الف	5.8 inch(15.9 mm)	1.2 inch(12.5 mm)	سمت راست
ب	1.2 inch(12.5 mm)	3.8 inch(9.5 mm)	سمت چپ
پ	3.8 inch(9.5 mm)	1.4 inch(6.4 mm)	-----
ت	1.4 inch(6.4 mm)	3.16 inch(3.75 mm)	-----



شکل ۱: نمایی از سنگدانه‌ها

تمامی سیمان‌های پرتلند و سیمان‌هایی که مشخصات استانداردهای ASTM C1157-08 و ASTM C150-07 را دارا هستند، می‌توانند جهت ساختن بتن اسفنجی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین امکان استفاده از مواد افزودنی نظیر میکروسیلیس، روبره، پوزولان‌ها، خاکستر بادی و متاکائولن نیز وجود دارد. بهتر است جهت چسبانندگی بیشتر، درصد سیمان کمی بیش از درصد اختلاط محاسبه شده در طرح اختلاط در نظر گرفته شود. هر آبی که جهت ساخت بتن معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌تواند در ساخت بتن

اسفنجی نیز بکار رود. بهتر است PH آب مصرفی بین ۵ تا ۸/۵ باشد. همچنین بایستی سلامت آب مصرفی از نظر وجود مواد زیان‌آور تحت آزمایشات دقیق آزمایشگاهی قرار گیرد.

نسبت آب به سیمان در محدوده ۰/۲۷ تا ۰/۳۰ توصیه می‌گردد و با استفاده از برخی مواد افزودنی مانند روان‌کننده‌ها یا فوق روان‌کننده‌ها این نسبت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ظاهری بتن اسفنجی، در حال حاضر هیچ رابطه‌ی دقیقی بین نسبت آب به سیمان با میزان مقاومت بتن اسفنجی در دسترس نیست.

چالش مهم در طراحی بتن اسفنجی، معادل بودن مشخصات مورد نیاز با مشخصات واقعی است. بتن اسفنجی نیاز دارد به اینکه شرایط سطح خشک مصالح سنگی نزدیک به اشباع باشد یا باید اجازه داده شود که رطوبت آزاد برای سنگدانه‌ها محاسبه شود. باید توجه شود که کنترل آب در بتن اسفنجی خیلی مهم است. در اختلاط اگر آب توسط دانه‌های خیلی خشک جذب شود منجر به این می‌شود که کارایی و تراکم خوبی برای بتن وجود نداشته باشد، چون آب جذب شده توسط سنگدانه‌ها سهم و نسبت آب به سیمان را کاهش می‌دهد. باید توجه نمود که مقاومت بتن با نسبت‌های مخلوط معین، به صورت خیلی جدی تحت تاثیر درجه تراکم آن واقع می‌شود و بنابراین بسیار مهم است که روانی مخلوط بتن در حدی باشد که بتوان آن را با سهولت کافی حمل نمود، درجا ریخت، متراکم کرد و سطح آن را پرداخت نمود، بدون آن که در خلال این مراحل جداسازی صورت گیرد [۲۱].

۲-۱) مراحل ساخت بتن اسفنجی

مراحل ساخت و اجرای بتن اسفنجی به چهار مرحله تقسیم می‌شود:

الف) تراکم و آماده‌سازی لایه زیرین:

برای جلوگیری از نفوذ آب درون بتن اسفنجی به داخل لایه‌ی زیرین آن، بایستی از لایه‌های نفوذناپذیر در زیر بتن اسفنجی استفاده شود. همچنین بایستی سطح لایه‌ی زیرین آن صاف و عاری از هرگونه مواد اضافی و مضر بوده و شیب مناسب نیز دارا باشد. بهتر است قبل از اجرای بتن اسفنجی، لایه‌ی زیرین آن کمی بصورت نمناک درآورده شود تا مانع جذب آب بتن اسفنجی توسط لایه‌ی زیرین گردیم. ب) اختلاط بتن و بتن‌ریزی:

تفاوت خاصی در نحوه‌ی اختلاط بتن اسفنجی با بتن معمولی وجود ندارد، توصیه می‌گردد ابتدا مخلوط‌کن را تمیز کرده و سپس همه‌ی سنگدانه‌های درشت را داخل آن ریخته، قدری اختلاط صورت گیرد. سپس نیمی از آب اختلاط را بدان اضافه نموده و اجازه دهید مخلوط‌کن تا حداقل ۳۰ ثانیه اختلاط را ادامه دهد. بعد از این مدت به مرور سیمان و مواد افزودنی را اضافه کرده و عمل اختلاط را نیز هم‌زمان ادامه می‌دهیم. بعد از اتمام سیمان و مواد افزودنی بقیه آب باقی مانده را اضافه، و عمل اختلاط را حداقل به مدت ۲ دقیقه انجام می‌دهیم. با توجه به ساختار بتن اسفنجی، تخلیه آن از مخلوط‌کن دشوار خواهد بود. استفاده از شوتی کوتاه با شیب زیاد جهت تسهیل در تخلیه بتن اسفنجی پیشنهاد می‌گردد. در حال حاضر با استفاده از برخی روان‌کننده‌ها می‌توان روانی بتن اسفنجی را جهت سهولت در تخلیه آن کمی افزایش داد.

پ) تراکم و پرداخت بتن اجرا شده:

انواع مختلف غلتک جهت تراکم بتن اسفنجی اجرا شده استفاده می‌شود. ولی غلتک‌های چرخ فلزی به دیگر غلتک‌ها ارجحتر می‌باشند، انتخاب غلتک جهت تراکم به میزان ضخامت بتن و تعداد لایه‌های آن بستگی دارد. بهترین زمان برای آغاز عملیات غلتک‌زنی حدود ۱۵ دقیقه بعد از ریختن بتن می‌باشد و بهتر است شروع تراکم بوسیله‌ی غلتک چرخ فلزی صورت پذیرد. بهتر است بتن چند سانتیمتر از سطح

تراز لازم، بالاتر ریخته شده، و بر روی آن شمشه کشی و سپس اقدام به تراکم صورت گیرد. مناسب آن است که عملیات پرداخت بر روی بتن اسفنجی انجام نشود و به همان تراکم بسنده شود. چون پرداخت زیاد باعث بسته شدن خلل و فرج بتن اسفنجی شده و از کارایی آن خواهد کاست.

(ت) مراقبت و عمل آوری:

با توجه به خاصیت بتن اسفنجی بهتر است بلافاصله بعد از اتمام عملیات تراکم، عمل کیورینگ (اسپری پاشی) بوسیله مواد شیمیایی

صورت گیرد و سطح کیورینگ شده توسط پوشش های مناسب پوشانده شده، تا مانع از دست رفتن آب بتن اسفنجی گردد. بتن اسفنجی دارای دو مرحله عمل آوری اولیه و نهایی می باشد. عمل آوری اولیه مربوط به زمانی است که قبل از اجرای بتن اسفنجی، در لایه ی زیرین به وسیله ی پخش کردن آب، سطح کمی مرطوب شده و سپس بتن ریزی آغاز شده است. و عمل آوری نهایی نیز بعد از اتمام عملیات تراکم صورت می گیرد. در هر حال حداقل ۷ روز عمل آوری بتن اسفنجی متراکم شده ضروری است [۲۲].

۲- مواد مصرفی و روش آزمایش

در این پژوهش ۱۲ طرح اختلاط برای بتن اسفنجی در نظر گرفته شده که دارای دو پارامتر اصلی نسبت آب به سیمان (W/C) و نسبت شن به سیمان (G/C) می باشند. این چهار طرح اختلاط برای سه دامنه دانه بندی مختلف شن به طور مجزا به کار برده شده است که به طور کلی ۱۲ طرح اختلاط ایجاد می شود. دانه بندی نوع I: شامل نیمی از سنگدانه مانده روی الک ۳/۴ و نصف دیگر مانده روی الک ۱/۲، دانه بندی II: شامل نیمی از سنگدانه مانده روی الک ۱/۲ و نصف دیگر مانده روی الک ۳/۸ اینچ و دانه بندی III: شامل نیمی از سنگدانه مانده روی الک ۳/۸ و نصف دیگر مانده روی الک ۴# می باشد. در هیچ یک از طرح اختلاط های این پژوهش از سنگدانه عبوری از الک ۴# (یا ماسه) استفاده نشده است. و در آخر چند آزمون بتن معمولی و بتن حاوی ژل میکروسیلیس در دو طرح اختلاط کارگاهی و محاسبه شده برای مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال به منظور مقایسه نتایج این دو نوع بتن ساخته شده است.

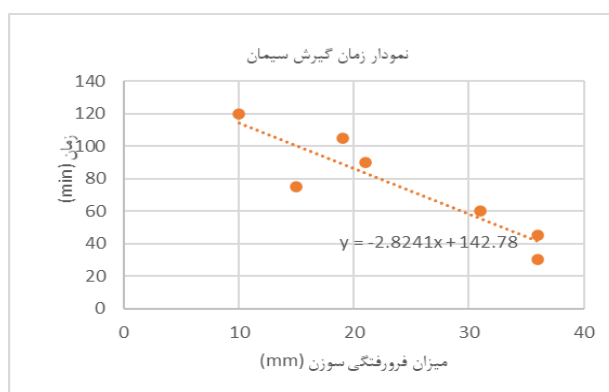
در این پژوهش از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان دلجان استفاده شده است که نسبت عناصر و مشخصات سیمان مصرفی طبق ASTM C150 و جدول ۹-۱۰-۱ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و پیرایش ۹۲ در جدول (۱) و (۲) قرار داده شده است. زمان گیرش اولیه و نهایی با استفاده از دستگاه سوزن و یکات محاسبه شده که نتایج حاصل از این آزمایش مطابق شکل (۱) می باشد.

جدول ۲: نسبت عناصر سیمان مصرفی پژوهش

نوع عنصر	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
درصد عنصر	۶۰	۲۰	۰/۵	۶	۶	۵	۰/۵

جدول ۳: مشخصات سیمان مصرفی پژوهش

وزن مخصوص (gr/cm ³)	نرمی سیمان (cm ² /gr)	غلظت نرمال (cc)	زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)	مقاومت فشاری ملات سیمان ۲۸ روزه (Mpa)	مقاومت کششی ملات سیمان ۲۸ روزه (Mpa)	مقاومت خمشی ملات سیمان ۲۸ روزه (Mpa)
۳/۰۴	۲۸۳۱	۶۱	۷۲/۲	۱۴۱/۴	۷/۳۹	۴/۷۳	۳/۷۴



شکل ۱: نتایج زمان گیرش سیمان بر پایه آزمایش ویکات

مصالح سنگی مصرفی در این آزمایش از مصالح شکسته و شسته تامین شده که نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است. تصاویری از مراحل انجام آزمایش‌های مصالح سنگی در شکل (۲) آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات مصالح سنگی مصرفی

چگالی مصالح (g/cm ²)	درصد رطوبت کلی شن بادامی (%)	درصد رطوبت کلی - شن نخودی (%)	درصد رطوبت کلی ماسه (%)	درصد جذب آب شن (%)	درصد سائیدگی سنگدانه (%)	هم ارز ماسه (%)
۲/۵۶	۳/۳۵	۵/۷	۱۸	۱/۷	۲۰/۷	۹۸
ASTM C128-19	ASTM C566-89			ASTM C127-88	ASTM C131	ASTM D2419-87



شکل ۲: تصاویر انجام آزمایش‌های دانه‌بندی رطوبت، جذب آب و لس آنجلس سنگدانه‌ها

۲-۲) مشخصات ژل میکروسیلیس مصرفی :

ژل میکروسیلیس BC8 بر پایه مشخصات استاندارد ASTM C1240 می‌باشد. این ژل دارای وزن مخصوص ۱/۳۴۵gr/cm³، قابلیت انحلال در آب، ژلی طوسی رنگ، PH=10، فاقد کلر، دارای فوق‌روان‌ساز بتن می‌باشد و میزان مصرف توصیه شده آن حدود ۷ الی ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد که در این آزمایش ۱۰٪ سیمان اضافه شده است.

۲-۳) مراحل تهیه آزمون‌های پژوهش:

برای تهیه آزمون‌های بتن اسفنجی در ابتدای کار تمام مصالح خشک شده در آن را الک نموده و مانده روی الک‌های مختلف تفکیک شده (مطابق شکل ۳) و در چهار ترکیب نسبت آب به سیمان (W/C) و شن به سیمان (G/C) مختلف (طرح اختلاط) با سیمان مخلوط شده که در برخی آزمون‌ها ژل میکروسیلیس هم به مقدار ۱۰٪ وزن سیمان اضافه گردید. و سپس با آب به مقدار مشخص در میکسر حدود دو دقیقه مخلوط کرده و بتن حاصل، در قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ریخته می‌شود. و در آخر هر آزمون به مدت ۲۰ ثانیه روی میز لرزان قرار داده شد تا به خوبی لرزانده و متراکم شوند. پس از ۲۴ ساعت آزمون‌ها از قالب خارج شده و در حوضچه آب قرار داده شدند و بعد از گذشت مدت زمان لازم (۷ روزه و ۲۸ روزه) آزمون‌ها از آب خارج شده و بعد از خشک شدن در مجاورت هوای آزمایشگاه (دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت)، برای خشک شدن کامل یک ساعت هم در آن با دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد کاملاً خشک شده و سپس آزمایش نفوذپذیری و مقاومت فشاری روی آن‌ها صورت گرفته است [۲۳]. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C192 انجام شده است. تصاویر مربوط به این مراحل در شکل ۴ و نتایج کلی آزمایش در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. که با توجه به یکسان بودن کامل مراحل ساخت آزمون برای تمام آن‌ها میانگین ۳ الی ۶ نمونه بسته به تفاوت نتایج آزمایش برای چهار آزمون اول می‌باشد به گونه‌ای که اگر تفاوت محسوس بود آزمون‌های بیشتری تولید شده و میانگین نتایج مورد بررسی قرار داده شده است.



شکل ۴: تصاویر مراحل آماده سازی و ساخت و قالب‌گیری و عمل‌آوری بتن

جدول ۵: نتایج برای بتن با سنگدانه دانه بندی نوع I

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۹/۵۵	۲/۶۲	۴/۸	۱/۴۲
مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۱۵/۳۸	۴/۴۵	۶/۵۴	۲/۳۲
چگالی (Kg/m ³)	۱۸۶۵	۱۷۷۸	۱۷۹۱	۱۷۱۰
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۸
نفوذپذیری (L/min/m ²)	۱۸۷	۱۹۶	۱۸۸	۱۹۸
درصد تخلخل	۳۵	۳۹	۳۶	۴۱
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۱۴/۲۸	۴/۰۳	۷/۵۶	۲/۷۲

مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۲۱/۳۵	۷/۳۱	۱۰/۶۹	۳/۳۶
چگالی (Kg/m ³)	۱۹۲۲	۱۸۷۸	۱۸۱۵	۱۸۰۶
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۸۴
نفوذپذیری (L/min/m ²)	۱۱۲	۱۲۳	۱۱۵	۱۱۸
درصد تخلخل	۲۵	۲۸	۲۷	۲۸

بر اساس جدول ۵ که نتایج آزمایش‌های این پژوهش برای دانه‌بندی نوع I (که بزرگ‌ترین اندازه ترکیب سنگدانه را در بین دانه‌بندی‌های بررسی شده دارد) ارایه شده است که بر اساس آن در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۳، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری به یک چهارم کاهش یافته است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۹ درصد کاهش، نفوذپذیری ۹ واحد افزایش و تخلخل ۴ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً یک سوم شده است. و به ترتیب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پارامترهای چگالی ۴۴ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۵ درصد کاهش، نفوذپذیری ۱۱ واحد افزایش و تخلخل ۳ درصد افزایش یافته‌اند.

در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۶، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری یک سوم مقدار اولیه شده است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۵ درصد کاهش، نفوذپذیری ۱۰ واحد افزایش و تخلخل ۵ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً یک سوم شده است. و به ترتیب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پارامترهای چگالی ۹ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۳ درصد کاهش، نفوذپذیری ۳ واحد افزایش و تخلخل یک درصد افزایش یافته‌اند.

مقایسه پارامترهای مختلف در ۴ طرح اختلاط مورد بررسی پژوهش در شکل‌های ۵ تا ۸ آورده شده است. یک نمونه بتن اسفنجی ساخته شده با دانه‌بندی نوع I در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۶: نتایج برای بتن با سنگدانه دانه‌بندی نوع II

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۶/۶۴	۴/۵۶	۴/۹۶	۱/۴۲
مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۱۱/۷۲	۷/۳۷	۷/۸۵	۲/۴۱
چگالی (Kg/m ³)	۱۹۶۵	۱۸۳۴	۱۷۵۶	۱۶۲۳
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۸۰
نفوذپذیری (L/min/m ²)	۱۷۳	۱۸۰	۱۷۶	۱۸۱
درصد تخلخل	۲۸	۳۰	۲۹	۳۲
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۱۱/۸۱	۸/۱۰	۸/۴۲	۲/۵۷
مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۲۱/۸۸	۱۲/۱۴	۱۳/۵۰	۴/۳۳
چگالی (Kg/m ³)	۲۰۲۶	۱۹۲۷	۱۹۸۸	۱۸۵۲
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۲
نفوذپذیری (L/min/m ²)	۹۶	۱۱۱	۱۱۴	۱۱۷
درصد تخلخل	۱۷	۲۱	۲۰	۲۳

بر اساس جدول ۶ که نتایج آزمایش‌های این پژوهش برای دانه‌بندی نوع II در آن ارایه شده است، در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۳، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری ۳۰ درصد کاهش یافته است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۱۳۱ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۴ درصد کاهش، نفوذپذیری ۷ واحد افزایش و تخلخل ۲ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً ۴۰ درصد کاهش یافته است. و به ترتیب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پارامترهای چگالی ۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۴ درصد کاهش، نفوذپذیری ۱۵ واحد افزایش و تخلخل ۴ درصد افزایش یافته‌اند.

در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۶، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری یک سوم مقدار اولیه شده است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۱۳۳ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۲ درصد افزایش، نفوذپذیری ۵ واحد افزایش و تخلخل ۳ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً یک سوم مقدار اولیه شده است. و به ترتیب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پارامترهای چگالی ۱۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۵ درصد کاهش، نفوذپذیری ۳ واحد افزایش و تخلخل ۳ درصد افزایش یافته‌اند. مقایسه پارامترهای مختلف در ۴ طرح اختلاط مورد بررسی پژوهش در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ آورده شده است. یک نمونه بتن اسفنجی ساخته شده با دانه‌بندی ۲ در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج برای بتن با سنگدانه دانه‌بندی نوع III

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵

ویژگی - پارامتر	شماره طرح اختلاط			
	۱	۲	۳	۴
طرح اختلاط بتن اسفنجی (نسبت آب به سیمان و شن به سیمان)	G/C=۳, W/C=۰/۳	G/C=۶, W/C=۰/۳	G/C=۳, W/C=۰/۵	G/C=۶, W/C=۰/۵
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۱۸/۲۰	۴/۴۵	۸/۸۲	۱/۷۳
مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی معمولی (Mpa)	۲۴/۲۱	۶/۵۲	۱۰/۳۲	۲/۷۸

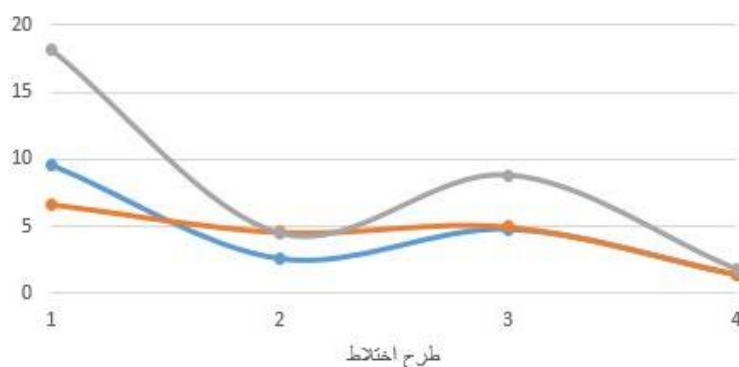
چگالی (Kg/m^3)	۲۱۵۰	۱۹۴۷	۱۹۰۱	۱۸۲۰
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۵
نفوذپذیری (L/min/m^2)	۶۹	۷۱	۸۸	۷۴
درصد تخلخل	۲۰	۱۷	۲۳	۲۵
مقاومت مشخصه فشاری ۷ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۱۸/۷۶	۴/۶۹	۱۴/۸۱	۲/۹۷
مقاومت مشخصه فشاری ۲۸ روزه نمونه بتن اسفنجی با پوزولان ژل میکروسیلیس (Mpa)	۲۴/۸۳	۶/۴۳	۱۱/۷	۴/۶۱
چگالی (Kg/m^3)	۲۲۸۰	۲۱۱۰	۱۹۹۰	۱۸۶۸
کارایی با فاکتور تراکم (C.F)	۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۲
نفوذپذیری (L/min/m^2)	۵۱	۵۶	۵۸	۶۷
درصد تخلخل	۱۴	۱۵	۱۵	۱۶

بر اساس جدول ۷ که نتایج آزمایش‌های این پژوهش برای دانه‌بندی نوع III (که کوچک‌ترین اندازه ترکیب سنگدانه را در بین دانه‌بندی‌های بررسی شده دارد) ارایه شده است که بر اساس آن در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۳، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری به یک چهارم مقدار اولیه کاهش یافته است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۲۰۳ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۳ درصد کاهش، نفوذپذیری ۲ واحد افزایش و تخلخل ۳ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً یک سوم شده است. و به ترتیب در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پارامترهای چگالی ۴۴ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۵ درصد کاهش، نفوذپذیری ۱۱ واحد افزایش و تخلخل ۳ درصد افزایش یافته‌اند.

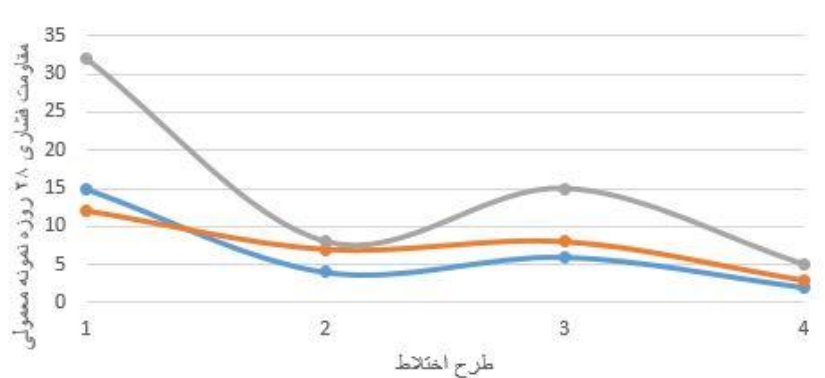
در نسبت آب به سیمان (w/c) ثابت و برابر ۰/۶، با افزایش نسبت شن به سیمان (G/C) از ۳ به ۶ در هر دو نمونه‌های معمولی ۷ روزه و ۲۸ روزه حدوداً مقاومت فشاری یک چهارم مقدار اولیه شده است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۱۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۵ درصد کاهش، نفوذپذیری ۱۰ واحد افزایش و تخلخل ۵ درصد افزایش یافته‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حدوداً یک سوم شده است. و به ترتیب در نمونه‌های معمولی پارامترهای چگالی ۹ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش، کارایی ۴ درصد کاهش، نفوذپذیری ۵ واحد افزایش و تخلخل یک درصد افزایش یافته‌اند.

مقایسه پارامترهای مختلف در ۴ طرح اختلاط مورد بررسی پژوهش در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ آورده شده است. یک نمونه بتن اسفنجی ساخته شده با دانه‌بندی ۳ در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

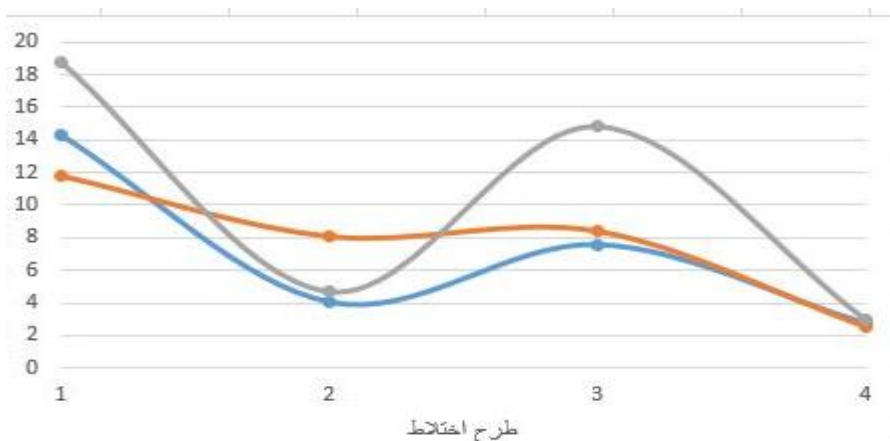
در نمودارهای زیر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه آزمون‌های معمولی و حاوی ژل میکروسیلیس در طرح اختلاط و دانه‌بندی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در اشکال زیر منحنی خاکستری مربوط به دانه‌بندی شماره ۳، نارنجی مربوط به دانه‌بندی شماره ۲ و آبی مربوط به دانه‌بندی شماره ۱ می‌باشد.



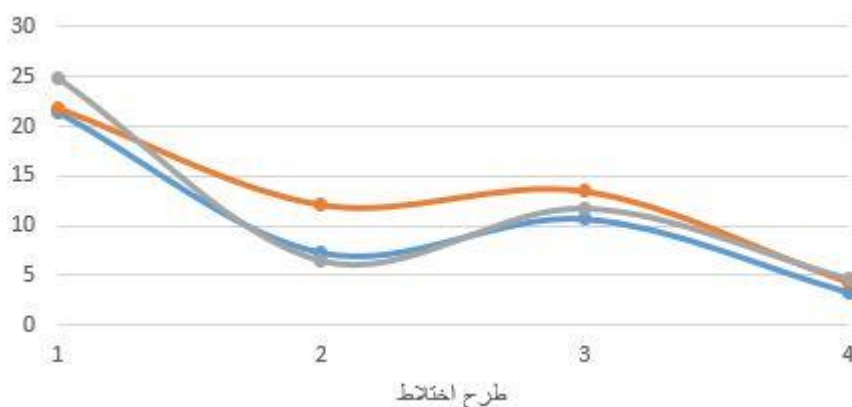
شکل ۵: مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه آزمون‌های معمولی طرح اختلاط‌های چهارگانه در دانه‌بندی‌های سه‌گانه



شکل ۶: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های معمولی طرح اختلاط‌های چهارگانه در دانه‌بندی‌های سه‌گانه

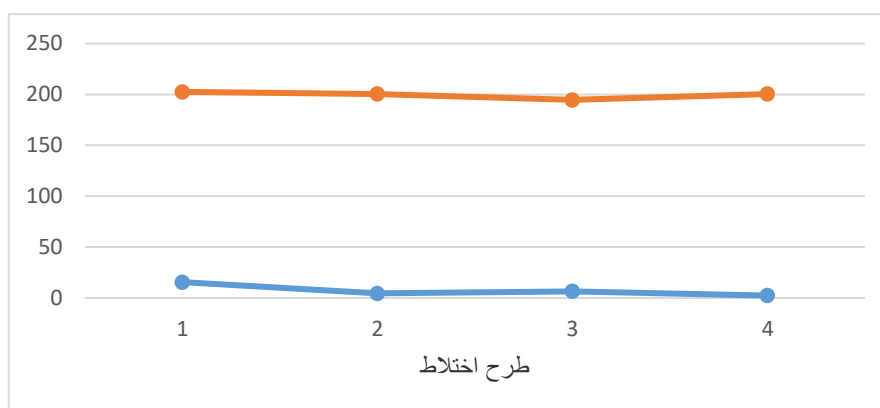


شکل ۷: مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه آزمون‌های حاوی ژل میکروسیلیس طرح اختلاط‌های چهارگانه در دانه‌بندی‌های سه‌گانه

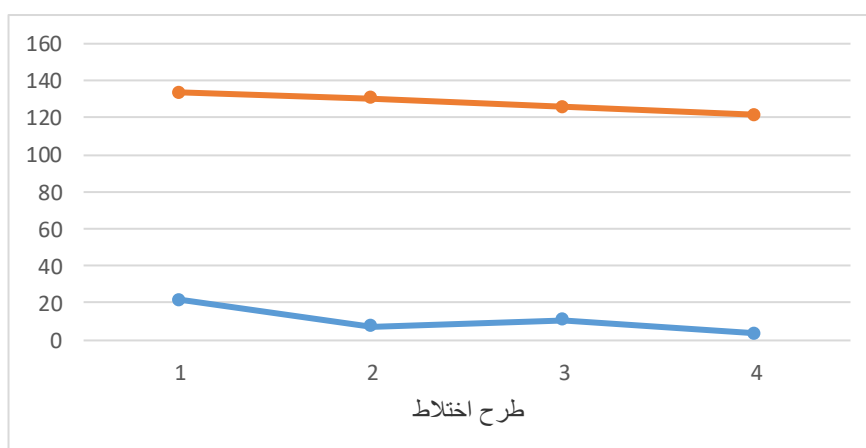


شکل ۸: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های حاوی ژل میکروسیلیس طرح اختلاط‌های چهارگانه در دانه‌بندی‌های سه‌گانه

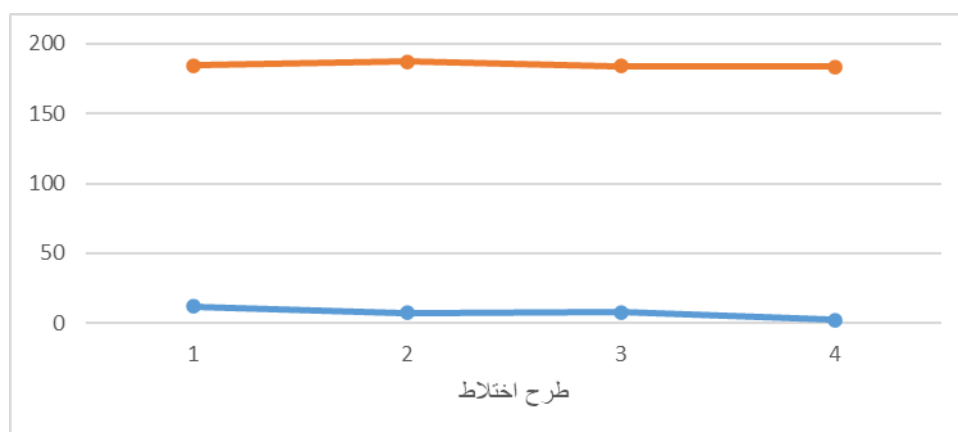
مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های معمولی و حاوی ژل میکروسیلیس در طرح اختلاط و دانه‌بندی‌های مختلف نیز به صورت زیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در اشکال زیر نمودار نارنجی مربوط به نفوذپذیری و نمودار آبی مربوط به مقاومت فشاری می‌باشد.



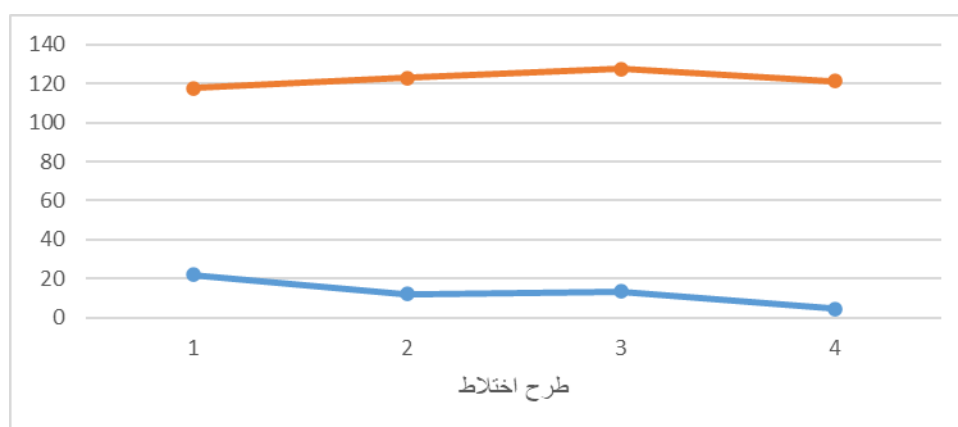
شکل ۹: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های معمولی طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی I



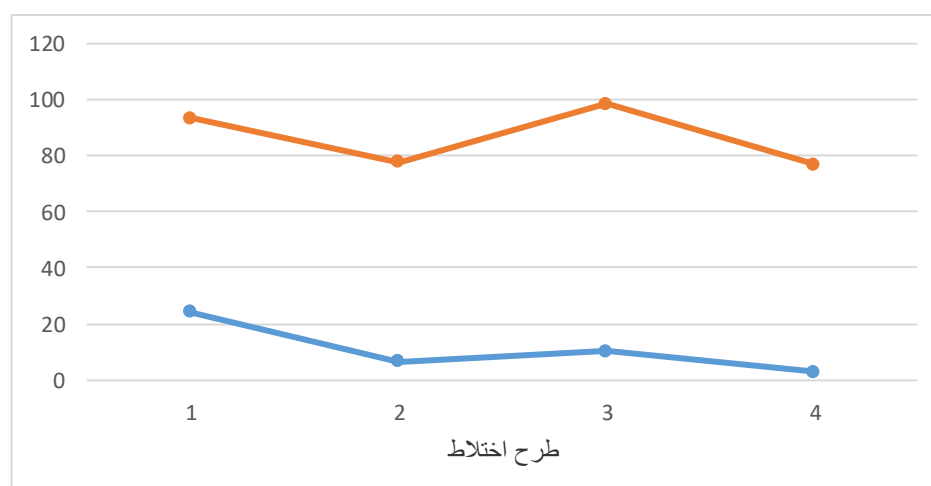
شکل ۱۰: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های حاوی ژل میکروسیلیس طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی I



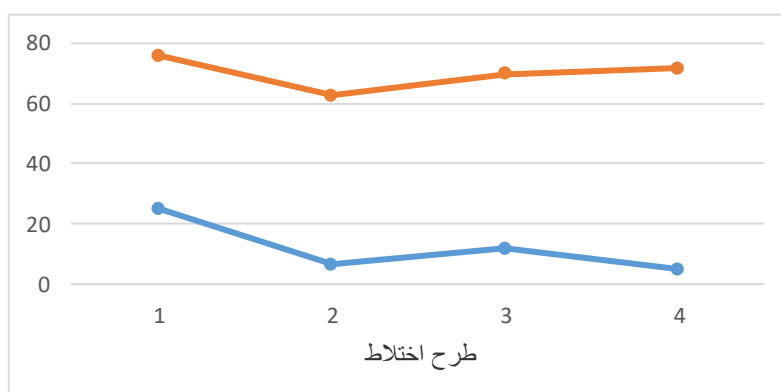
شکل ۱۱: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های معمولی طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی II



شکل ۱۲: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های حاوی ژل میکروسیلیس طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی II



شکل ۱۳: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های معمولی طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی III



شکل ۱۴: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نفوذپذیری آزمون‌های حاوی ژل میکروسلیس طرح اختلاط‌های چهارگانه دانه‌بندی III

به طور کلی نتایج حاصل از این آزمایشات در مقدار مقاومت فشاری بتن اسفنجی و تناسب آن با مقدار تخلخل و چگالی با نتایج پژوهش لیان و همکاران قرابت داشت [۲۴].

اما مقادیر مقاومت فشاری حاصل از این پژوهش به مقدار قابل توجهی (حدوداً ۴۰ درصد) از مقادیر حاصل از پژوهش ابراهیم و همکاران بیشتر بود [۲۵].



شکل ۱۹: چند نمونه از بتن اسفنجی تولیدی با دانه بندی نوع I ، II ، III (از راست به چپ)

در این پژوهش به منظور مقایسه کلی مقاومت فشاری بتن اسفنجی با بتن معمولی چند نمونه بتن معمولی با دو طرح اختلاط مختلف یکی کارگاهی و دیگری محاسبه شده برای مقاومت مشخصه فشاری $f_c = 20 \text{ Mpa}$ می باشد که جزییات آن مطابق جداول (۷) و (۸) می باشد.

جدول ۸: طرح اختلاط ۱ (کارگاهی)

نسبت آب به سیمان (W/C)	نسبت سیمان	نسبت ماسه	نسبت شن نخودی	نسبت شن بادامی
۰/۵	۱	۲	۱	۱

جدول ۹: طرح اختلاط ۲ (طرح برای مقاومت مشخصه فشاری $f_c = 20 \text{ Mpa}$)

چگالی بتن (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	سیمان (Kg/m^3)	نسبت آب به سیمان (W/C)	ماسه (Kg/m^3)	شن نخودی (Kg/m^3)	شن بادامی (Kg/m^3)
۲۴۵۰	۱۹۰	۲۸۰	۰/۵	۷۶۰	۵۷۰	۵۷۰

که نتایج تست مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای هر دو طرح اختلاط مطابق جداول (۹) تا (۱۰) می باشد.

جدول ۱۰: نتایج تست مقاومت فشاری بر روی نمونه های طرح اختلاط

شماره طرح اختلاط	نمونه ۳ (Mpa)	نمونه ۲ (Mpa)	نمونه ۱ (Mpa)	میانگین مقاومت (Mpa)
۱	۱۶/۹	۱۵/۸	۱۴/۷	۱۵/۸
۲	۲۲/۴	۲۰/۲	۱۹/۶	۲۰/۷۳
۱ با ۱۰ درصد ژل میکروسیلیس	۲۰/۵	۱۹/۱۱	۱۷/۲	۱۸/۹۴
۲ با ۱۰ درصد ژل میکروسیلیس	۲۶/۷	۲۵/۸	۲۳/۵	۲۵/۳۳

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های بتن معمولی می توان پی برد که بتن اسفنجی با دانه بندی ۳ و افزودنی ژل میکروسیلیس می تواند مقاومتی بیشتر از بتن معمولی ساده با دو طرح اختلاط این پژوهش هم داشته باشد که از نظر مقاومتی بسیار مطلوب است.

۳- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج حاصل از این آزمایش ها در ۱۲ طرح اختلاط متشکل از ۳ دانه بندی که هر کدام دارای ۴ نسبت آب به سیمان و شن به سیمان بوده - اند به طور کلی بیانگر موارد زیر است:

- مناسب ترین دانه بندی برای بدست آوردن بیشترین مقاومت فشاری بتن اسفنجی دانه بندی نوع III می باشد که دانه های آن در بین سایر دانه بندی ها ریزتر است و موجب افزایش توپری و چگالی، افزایش مقاومت (در صورتی که در نگاه اول به نظر می رسد مانند بتن معمولی هر چه اندازه سنگدانه بزرگتر باشد مقاومت بیشتری را نشان می دهد)، افزایش صافی و صیقلی سطح می شود. اما قدرت زهکشی کمتری نسبت به سایر دانه بندی ها دارد که بسته به شرایط اقلیمی منطقه از قبیل میزان بارندگی و خاک زیر بتن جاده یا کفپوش باید استفاده از بتن با این دانه بندی مورد بررسی قرار گیرد. البته برای استفاده در کفپوش معابر می توان حتی از بتن با دانه بندی نوع I هم که کمترین مقاومت را داشت استفاده کرد چون مقاومت آن برای معابر کافیسیت. اما علاوه بر مقاومت کم، به علت زبری سطح آن زیبایی، دوام و (ایمنی در برابر برخورد عابرین با زمین) کمتری دارد.
- به طور کلی بتن اسفنجی کارایی پایینی دارد و در نمونه هایی که آزمایش اسلامپ برای آنها قابل قبول بود در نهایت اسلامپ ۲ سانتی متر ثبت شد. اما در اکثر نمونه ها به خصوص آن هایی که نسبت آب به سیمان ۰/۵ داشتند اسلامپ به علت ریزش بتن قابل محاسبه نبود و به جای آن از آزمایش فاکتور تراکم استفاده گردید، که نتایج حاصله کارایی بتن برای آزمونه های مختلف تفاوت چندانی با هم نداشته و به نتایج خاصی منجر نگردید.
- افزودن ژل میکروسیلیس به بتن اسفنجی مقداری نفوذپذیری بتن را کاهش می دهد اما تاثیر مطلوبی بر مقاومت فشاری و دوام بتن می گذارد که در روسازی های بتنی که در مناطق کم بارش واقع شده اند می تواند گزینه مناسبی باشد اما در مناطق پر بارش باید میزان میکروسیلیس را کاهش داد تا نفوذپذیری مطلوب و در عین حال مقاومت فشاری مورد نیاز حاصل شود. در نمونه های با نسبت آب به سیمان بالا (بیش از ۰/۳) و حاوی ژل میکروسیلیس یک لایه شیرابه بتن در زیر قالب شکل می گیرد و موجب نفوذناپذیری نوع پیش- ساخته بتن می شود که برای جلوگیری از این کار باید نسبت آب سیمان را کاهش داد.
- این نوع بتن نسبت به نوع مشابه آسفالتی آن از لحاظ اقتصادی و عمر مفید برتر می باشد و از لحاظ اجرایی هم مناسب و بدون مشکل می باشد. و به خاطر صلبیت بهتر آن نسبت به آسفالت متخلخل نیاز به لایه های متعدد و با ضخامت زیرسازی نمی باشد.

- با توجه به نتایج ارائه شده در این گزارش بسته به مقاومت و زهکشی مطلوب و بسته به شرایط محیطی محل از قبیل میزان بارش و رواناب حاصل، سطح آب‌های زیرزمینی، جنس خاک بستر (مقدار رس موجود و روانی آن به منظور جلوگیری از روان‌گرایی خاک و تورم حاصل از یخ‌زدگی آب در خاک بستر معبر)، جاده و حتی کفسازی یک استادیوم ورزشی از قبیل زمین چمن فوتبال یا تنیس روباز که مقدار بارش در آن منطقه زیاد است) و... می‌توان طرح اختلاط مطلوب را اتخاذ کرد.

مراجع

- [1] A, Yashia., K, Kabagire. (2014). New approach to proportion pervious concrete. *Constructions and buliding materials*, Volume 62, Page 38.
- [2] R, Zhong., K, Wille. (2015). Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Constructions and buliding materials*, Volume 98, Page 51.
- [3] Portland Cement Association. (2006). Hydrological Design And Resources. Skokie: Illinois, Page 63.
- [4] R, Zhong., K, Wille. (2016). Comprehensive response of normal and high strength pervious concrete. *Constructions and buliding materials*, 109, 177.
- [5] A, Yashia., K, Kabagire. (2014). New approach to proportion pervious concrete. *Constructions and buliding materials*,
- [6] A, Chandrapa., K, Bligiri. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete. *Constructions and buliding materials*, Volume 123, , Page 627.
- [7] Zhong, R.(2016). Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. *Cement and concrete composites*, Volume 70, Pages 130-138.
- [8] V, Henderson., S, Tishe. (2012). Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. Pages 197-208.
- [9]A, Soltani., A, Tarighat., A, Rostami. (2017). Effect of Calcified Clays and Microsilica on Compressive Strength of Concrete. *Scientific & Research Journal of Structural Engineering and Construction*, Pages 33-50.
- [10] WHO, Technical Note for Emergencies. (2011). Emergency simple Treatment of Drinking Water at Point-of-Use (POU) Water, Engineering and Development Centre, Loughborough University.
- [11] V.R, Schaefer., K, Wang., M. T, Suleiman., J. T, Kevern. (2006). Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. , Ames: Iowa Department of Transportation. Pages 16-18.
- [12] J, Kevern., V.R, Schaefer., K,Wang. (2009). The Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, Volume 37, Page4.
- [13] M.L, Leming., H.R, Malcom., P.D, Tennis. (2007). Hydrologic Design of Pervious Concrete. Silver Spring: Portland Cement Association, Skokie, IL, National Ready Mixed Concrete Association. Page 5.
- [14] N, Delatte., D, Miller., D, Mrkajic. (2007). Portland Cement Pervious Concrete Pavement: Field Performance Investigation on Parking Lot and Roadway Pavements. Final Report. Silver Spring, MD:RMC Research & Education Foundation, National Ready Mixed Concrete Association. Pages 21-28.
- [15] K.H, Obla. (2007). Pervious Concrete for Sustainable Development. Proceedings, *First International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Washington, DC. Pages 2-3.
- [16] E, Ashley. (2008). Using Pervious Concrete to Achieve LEED™ Points. Silver Spring, MD: *National Ready Mixed Concrete Association*, Pages 1-6.
- [17] M, Suleiman., K, Gopalakrishnan., J, Kevern. (2011). Structural Response of Pervious Concrete Pavement Systems Using Falling Weight Deflectometer Testing and Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 137, Page 12.
- [18] M, Vancura., L, Khazanovich., K, MacDonald. (2011). Structural Analysis of Pervious Concrete Pavement. Washington, DC, Pages 1-16.
- [19] R, Rodden., G, Voigt., T, Smith. (2011). Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements. Proceedings, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Edmonton: Alberta*, Pages 3-15.
- [20] A, Amanzadeh .(2013). Porous Concrete. *National Conference on Applied Civil Engineering and New Achievements*. Karaj. Pages 1-4.
- [21] Management and planning organization, (2003). Iran Concrete Regulation, Page 47.
- [22] A, Amanzadeh. (2013). Porous concrete is used as a drain in homogeneous short dams. *First National Conference on Civil, Architecture and Urban Environment*, Page 2.
- [23] Portland Cement Association. (2004). Pervious Concrete Pavements. Skokie: Illinois, Pages 7-9.

[24] C, Lian., Y, Zhuge., S, Beecham. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Pages 4294-4298.

[25] A, Ibrahim., E, Mahmoud., M, Yamin., V.C, Patibandla. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and building materials*, Volume 50, Pages 524-529.