نشریه علمی

پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران

سال چهارم، جلد 4، شماره 1، بهار و تابستان 1396 صص 49 الی 60

تاریخ دریافت مقاله: 1395/3/19

تاریخ تصویب مقاله: 1395/11/27

پایگاه نشریه: **http://jerce.sru.ac.ir**

مطالعه آزمایشگاهی اثر افزودنی‌های روان‌کننده و ضدیخ بر بهبود مشخصات مقاومتی و رسانایی هیدرولیکی بتن متخلخل

حمید مسائلی[1*]، شایان خسروی[2] و حسین چوبکار[3]

[1] **استادیار**، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی

[2] **دانشجو**، کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[3] **دانشجو**، کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

masaeli@abru.ac.ir

چکیده: بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست که یکی از عمده‌ترین کاربردهای آن در روسازی می‌باشد. بطور معمول بتن متخلخل فاقد مصالح ریزدانه بوده که با ماتریس سیمانی، مصالح درشت‌دانه به هم چسبانده به طوری که فضاهایی خالی بین مصالح ایجاد می‌شود. استفاده از افزودنی‌ها همچون روان‌کننده جهت تامین بهتر مشخصات مورد نظر به‌خصوص مقاومت بتن می‌تواند مفید واقع شود. بتن متخلخل باید طوری طراحی شود که در سیکل ذوب و یخ‌های متوالی زود تخریب نشده، و بتواند با دوام مطلوب آب را از خود عبور دهد. در این پژوهش در شش طرح اختلاط شامل سه دانه‌بندی سنگدانه در دو نسبت آب به سیمان (W/C) و سنگدانه به سیمان (G/C) نمونه‌های بتن متخلخل معمولی و حاوی افزودنی‌های روان‌کننده و ضدیخ تولید شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری کارایی، چگالی، تخلخل و مقاومت فشاری 7 روزه و 28 روزه گزارش شده است. به طور خلاصه طبق نتایج بررسی شده در سه نوع دانه‌بندی و افزودنی‌های مصرفی به طور میانگین در سه نوع دانه‌بندی با افزودن روان‌کننده به بتن، میانگین مقاومت فشاری آن حدود 11 درصد افزایش، تخلخل آن حدود 6 درصد کاهش و با افزودن ضدیخ در بتن حدودا 4 درصد افزایش مقاومت و 1 درصد کاهش تخلخل حاصل شده است.

کلمات کلیدی: بتن متخلخل، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، افزودنی، روان‌کننده.

Effects of Superplasticizer and Antifreeze Additives on Strength and Permeability Properties of Pervious Concrete Based on Experiments

H. Masaeli, Sh. Khosravi and H. Choobkar

Abstract: Pervious concrete being a particular type of high porosity concrete, is mainly used for pavement purposes. Pervious concrete is usually free of fine aggregates and the coarse aggregates are only coated by cement matrix. The use of additives including superplasticizer and the consequent effects on engineering characteristics of pervious concrete is outlined in this study. The pervious concrete should be designed in such a way that to resist against deterioration during freezing and thawing cycles, while keeping the permeability index within reasonable limits. In this study, six sets of pervious concrete tests including three granular aggregates in two water to cement (W/C) ratios and the aggregate to cement ratio (G/C) of typical pervious concrete samples containing lubricating additives and antifreeze, were conducted. Measuring the efficiency, density, porosity and compressive strength in two main characteristics of this concrete, namely compressive strength and porosity obtained the following results. According to the obtained results of the study, the compressive strength of the pervious concrete was increased by about 9 MPa, and the porosity decreased at most by 15%.

Keywords: Pervious, Concrete, Compressive, Strength, Permeability, Additives, Super plasticizer.

1- مقدمه

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالاست که یکی از عمده‌ترین کاربردهای آن اجرای روسازی می‌باشد [1]. تخلخل بالا توسط فضاهای خالی به هم چسبیده ایجاد می‌شود. بطور معمول بتن متخلخل فاقد مصالح ریزدانه می‌باشد و تنها با ملات سیمانی، مصالح درشت دانه را به هم می‌چسباند به طوری که فضاهای خالی را ایجاد می‌کند. بتن متخلخل به طور مرسوم در مناطقی با ترافیک کم، پیاده‌رو و گلخانه‌ها و مناطق سردسیر که باعث کاهش یخبندان و تسریع ذوب برف می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن متخلخل با کاهش رواناب موجب کاهش نیاز به تاسیسات جداگانه‌ای برای کنترل رواناب یا سیلاب می‌شود. این بتن در جایی که بتن معمولی، خروج رواناب از سایت را کاهش نمی‌دهد، استفاده می‌شود که به منظور افزایش تراوش و نفوذ به زمین می‌باشد. بتن متخلخل به کاهش مقدار آلاینده‌های حمل شده به زهکش یا آبراه‌ها و به کاهش نقطه اوج سرعت و کاهش حجم رواناب کمک می‌کند.

در جوامع در حال توسعه برای زمین‌های مسکونی، تجاری و اقتصادی برای جلوگیری و کاهش اثر زیان‌آور افزایش روزافزون مقدار سطوح نفوذ ناپذیر نظیر جاده‌ها، آسفالت پیاده‌روها و پارکینگ‌ها؛ از بتن نفوذپذیر استفاده می‌شود. در طی بارندگی جریان رواناب روی سطح نفوذناپذیر تحت تاثیر قرار می‌گیرد و آلودگی‌هایی نظیر خاک، گریس، روغن و... را به نهر و سیستم جاری فاضلاب منتقل می‌کند.

در پاسخ به این پی‌آمد طراحان روسازی سیستم سنگ‌فرش متخلخل را توسعه دادند. این سیستم روسازی نوین اجازه عبور رواناب از میان کف سنگ‌فرش شده به سمت مخزن سنگی قبل از تراوش از خاک و تغذیه ذخایر آب‌های زیرزمینی را می‌دهد. با اجرا و نگهداری صحیح از سنگ‌فرش‌های متخلخل، حجم تراوش سالیانه‌ی بیش از 80 درصد رواناب کل را ممکن می‌سازد. مطالعات بیشتر نشان می‌دهد که سیستم بتن متخلخل می‌تواند تا 65 درصد مواد حل نشدنی و تا 95 درصد رسوبات رواناب‌ها را برطرف کند [2].

دوام هر بتن در برابر سیکل ذوب و یخ، بستگی به فضاهای خالی آن، درجه‌ی اشباع شدن بتن، مقدار آب قابل یخ زدن، میزان برودت هوا و میانگین ماکزیمم فاصله‌ی ذرات بهم چسبیده در سطح آزاد بتن یا کلا هر جایی از بتن که یخ به آسانی می‌تواند شکل بگیرد، می‌باشد [3]. بتن متخلخل باید طوری طراحی شود که سیکل ذوب و یخ‌های متوالی زود تخریب نشده، و بتواند آب را از خود عبور دهد و در خود نگه ندارد علت آن است که سیکل ذوب و یخ می‌تواند با درجه‌ی اشباع شدن بتن که آن نیز به فاصله‌ی سطح آزاد سنگدانه‌ها بستگی دارد، ارتباط داشته باشد. طراحی و تولید درست این نوع بتن باعث می‌شود که همانند یک سیستم مکنده، آب باران و آب ناشی از ذوب برف و دیگر رواناب‌ها را به داخل خود کشیده و زهکشی کند. بخاطر همین خصوصیات ذکر شده باید مقداری فضای عمدی در داخل بتن ایجاد شود که این کار با یکسان گرفتن انداه دانه‌ها انجام می‌شود.

1-1- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

در بتن متخلخل از مصالحی همانند بتن معمولی استفاده می‌شود با این تفاوت که در این بتن مصالح ریزدانه حذف می‌شود و توزیع درشت‌دانه نیز بطور یکنواخت و در یک اندازه نگه داشته می‌شود. این ویژگی باعث افزایش سختی بتن می‌شود. مصالحی که در این نوع بتن استفاده می‌شود به ضرح زیر می‌باشند [4]:

1-1-1- مواد سیمانی

مورد مصرف در این نوع بتن شامل سیمان پرتلند با سیمان‌های مخلوط شده‌ای که طبق استاندارد (ASTM C150-C1157) در بتن معمولی بکار می‌روند. چون این نوع بتن‌ها به لحاظ ساختار و شکل ظاهری خود بیشتر می‌توانند در معرض مواد زیان‌آور قرار گیرند، از این رو می‌توان از مواد شبه سیمانی نظیر میکروسیلیس، خاکستر بادی، روباره و... برای افزایش دوام، کاهش نفوذپذیری و ترک‌خوردگی استفاده کرد.

2-1-1- مصالح سنگی

با توجه به اینکه بخش اعظم بتن اسفنجی شامل سنگدانه‌ها می‌باشد، بررسی نوع و کیفیت این مصالح اهمیت فراوانی دارد. در زیر به چهار دانه‌بندی مصالح سنگی اشاره شده‌است. به طور کلی امکان استفاده از مصالح درشت‌تر نیز وجود دارد ولی توصیه می‌گردد که مصالح مصرفی در ساخت بتن اسفنجی از 3.75 میلی‌متر کوچکتر نباشند [5]:

- تمامی سنگدانه‌های درشت، از الک 5.8 اینچ گذشته و بر روی الک 1.2 اینچ باقی بمانند.
- تمامی سنگدانه‌های درشت از الک 1.2 اینچ گذشته و بر روی الک 3.8 اینچ باقی بمانند.
- تمامی سنگدانه‌های درشت از الک 3.8 اینچ گذشته و بر روی الک 1.4 اینچ باقی بمانند.
- تمامی سنگدانه‌های درشت از الک 1.4 اینچ گذشته و بر روی الک 3.16 اینچ باقی بمانند.

3-1-1- آب

بطور معمول نسبت‌های آب به سیمانی بین 0.27 تا 0.3 برای این نوع بتن‌ها انتخاب می‌شود. ولی با نسبت گنجایش مواد شیمیایی نسبت‌های 0.34 و 0.4 نیز جواب قابل قبولی داده‌اند. رابطه‌ی بین نسبت آب به سیمان و مقاومت در بتن‌های متخلخل هنوز روشن نیست. در این بتن‌ها حجم خمیر از حجم خلل و فرج بین سنگدانه‌ها کمتر است و در نتیجه احتمال نمی‌رود که با افزایش مقاومت خمیر مقاومت کلی نیز افزایش پیدا کند که در این مقاله تاثیر روان‌کننده و ضدیخ با درصد مشخص بر مقاومت فشاری بتن 7 روزه و 28 روزه به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است و نتایج آن ارایه شده است.

2-1- نقش مواد افزودنی روان‌کننده بر مقاومت بتن

امروزه استفاده از افزودنی‌ها جهت تامین بهتر مشخصات مورد نظر بتن بسیار فراگیر شده است. از این مواد افزودنی می‌توان به مواد کاهش‌دهنده آب، روان‌کننده و به‌ویژه فوق‌روان‌کننده‌ها اشاره کرد. نخستین رده افزودنی‌های کاهش‌دهنده آب که در ضمن خاصیت دیرگیرکنندگی نیز دارند لینگو سولفات‌ها می‌باشند. استفاده از آنها حجم هوای داخل بتن را به میزان تقریبی 2 تا 6 درصد افزایش و میزان آب مورد نیاز را بین 5 تا 10 درصد کاهش می‌دهد. مقاومت نهایی بتن‌هایی که با این افزودنی ساخته می‌شوند بین 2 تا 20 درصد بالاتر از بتن مشابه بدون افزودنی می‌باشد. طبق مطالعات آقایان میری و رخشانی‌مهر افزایش مقاومت بتن باعث ترک‌خوردگی آن در فشارهای بیشتری می‌شود [6]. بیشتر فوق روان‌کننده‌هایی که فعلا در بازار موجود می‌باشند و در بتن‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد ترکیبات نفتالین و ملامین سولفاته شده می‌باشند. تولیدکنندگان این محصولات معتقدند که با استفاده صحیح از آنها می‌توان میزان آب بتن را تا حدود بیست درصد کاهش داد. نسل سوم فوق روان‌کننده‌ها که به ویژه برای بتن‌های خود تراکم کاربرد وسیعی دارد بیشتر بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اصلاح شده قرار دارند. تولیدکنندگان این مواد اظهار می‌نمایند که با مصرف آنها میزان آب بتن را حتی می‌توان تا حدود 30 درصد کاهش داد و همچنین خاصیت ضد کربناته بتن را اصلاح کرد [7].

با افزایش پلی کربوکسیلات میزان کلراید خمیر سیمان کاهش می‌یابد [8]. واقعیت آن است که استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها به عنوان یکی از مواد ضروری برای تولید بتن با مقاومت بالا روز به روز گسترده‌تر می‌شود. البته استفاده از این مواد باید با شناخت کامل کلیه تاثیرات آن‌ها همراه باشد. سازگاری عملکردی فوق روان‌کننده با نوع سیمان مصرف شده یکی از این ملاحظات است. اگر سیمان مصرفی دارای سن بالا باشد اندرکنش فوق‌روان‌کننده با سیمان می‌تواند دارای پیامد مثبت یا منفی باشد که بسته به میزان C_3A در سیمان اثرات منفی آن شایع‌تر است [9]. موضوع دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که هر چند فوق روان‌کننده می‌تواند اسلامپ بتن را برای 5 تا 10 دقیقه پس از افزودن به میزان قابل توجهی بالا برد، ولی پس از این زمان با سرعت بسیاری اسلامپ را به سرعت کاهش می‌دهد. معمولا سرعت کاهش اسلامپ بتن در مورد ترکیبات ملامین بیشتر است [10].

تاکنون دستورالعملی کلی برای طرح اختلاط بتن متخلخل بر اساس اندازه سنگدانه، نسبت آب به سیمان و نسبت شن به سیمان به طور مدون و کمی ارائه نشده‌است. همین طور به اثر برخی افزودنی‌های متداول همچون ضدیخ و روان‌کننده بر روی پارامترهای اساسی بتن مانند مقاومت فشاری، تخلخل، کارایی و چگالی به طور همزمان کمتر پرداخته شده‌است. در این مقاله به بررسی تخلخل، کارایی، چگالی و مقاومت فشاری 7 و 28 روزه بتن متخلخل با بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی پرداخته شده، همچنین به تاثیر افزودنی‌های ضدیخ و روان‌کننده در این نوع بتن اشاره شده است.

2- شرح آزمایش

در این پژوهش به منظور دستیابی به بهینه‌ترین مقاومت فشاری و تخلخل (یا نفوذپذیری) از سه دانه‌بندی در نمونه‌های معمولی و حاوی دو نوع افزودنی روان‌کننده و ضدیخ استفاده شده است.

- در دانه‌بندی1 نصف سنگدانه‌ها از سنگدانه‌های مانده روی الک 3.4 و نصف دیگر از سنگدانه‌های مانده روی الک 1.2 تشکیل شده‌است.
- در دانه‌بندی 2 نصف سنگدانه‌ها از سنگدانه‌های مانده روی الک 1.2 و نصف دیگر از باقی‌مانده روی الک 3.8 تشکیل شده‌است.
- در دانه‌بندی 3 نصف سنگدانه‌ها از باقی‌مانده‌های الک 3.8 و نصف دیگر از باقی‌مانده‌های روی الک شماره 4 تشکیل شده‌است.

برای هر دانه‌بندی دو پارامتر نسبت آب به سیمان (W/C) و نسبت شن به سیمان (G/C) مشخص شده‌است که در مجموع 6 طرح‌اختلاط را ایجاد می‌کند که برای این نمونه‌های تولیدی با این طرح اختلاط‌ها ویژگی‌های اساسی مقاومت فشاری 7روزه و 28 روزه، چگالی بتن، کارایی بتن و تخلخل در نمونه‌های معمولی، با روان‌کننده و ضدیخ بررسی شده است. بتن متخلخل کارایی کمی دارد، افزودن روان‌کننده می‌تواند این ضعف بتن را مقداری بهبود بخشد. در آزمایش اسلامپ در ایده‌آل‌ترین حالت اسلامپ 2 سانتی‌متر برای نمونه‌های بتن متخلخل به دست آمد که نشانگر کارایی پایین بتن می‌باشد البته آزمایش اسلامپ برای سنجش کارایی بتن متخلخل به دلیل گسستگی که در سنگدانه‌های مصرفی آن وجود دارد مناسب نیست و در اکثر اوقات به ریزش بتن منجر خواهد شد. بنابراین در این پژوهش برای بدست آوردن کارایی بتن متخلخل از آزمایش فاکتور تراکم استفاده شده‌است که به نسبت آزمایش اسلامپ می‌تواند مناسب‌تر باشد. از دیگر افزودنی‌های پرمصرف در صنعت بتن می‌توان به ضدیخ اشاره کرد که انواع مختلفی دارد و معمولا در دمای بتن‌ریزی زیر 4 درجه سانتی گراد از آن استفاده می‌شود. از آنجا که بتن متخلخل معمولا در سنگ‌فرش‌ها و جاده‌ها کاربرد دارد و احتمال بتن ریزی درجا در هوای سرد وجود دارد اثر ضدیخ بر ویژگی‌های آن مهم است.

مشخصات مصالح مصرفی در این پژوهش به شرح زیر است:

در این پژوهش از سیمان تیپ 2 کارخانه سیمان دلیجان استفاده شده‌است. نسبت عناصر سیمان، مشخصات سیمان مصرفی و مشخصات مصالح سنگی مصرفی به ترتیب مطابق جداول1، 2 و3 می‌باشد.

جدول 1. نسبت عناصر سیمان

Table 1. The ratio of cement elements

Oxide percentage	Type oxide
64	Cao
22.1	SiO_2
0.5	Na_2O
6	Al_2O_3
5.2	Fe_2O_3
1.7	MgO
0.5	K_2O

جدول 2. مشخصات سیمان مصرفی

Table 2. Specifications of cement consumption

143.6	Final time of setting of cement (min)
73.7	Initial time of setting of cement (min)
67	Normal consistency (cc)
2841	Fineness of cement (cm^2/gr)
3.24	Specific gravity (gr/cm3)

آزمایش اندازه‌گیری چگالی مصالح سنگی مطابق استاندارد ASTM C128-15 انجام شده است.

آزمایش تعیین درصد رطوبت کلی شن و ماسه مطابق استاندارد ASTM C566-89 انجام شده است.

جدول 3. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

Table 3. Specifications of used aggregates

Aggregate density (g/cm^2)	2.56
Percentage of total evaporable moisture content of coarse aggregate	5.7
Percentage of total evaporable moisture content of fine aggregate	18
Percentage of water absorption of coarse aggregate	1.7
Percentage of resistance to abrasion of coarse aggregate	20.7

آزمایش تعیین درصد جذب آب شن مطابق استاندارد ASTMC127-8M-17 انجام شده است.

آزمایش تعیین درصد ساییدگی سنگدانه‌ها (آزمایش لس‌آنجلس) مطابق استاندارد ASTM C13 انجام شده است. تصاویری از مراحل انجام آزمایش‌های ذکر شده برای مصالح سنگی در شکل 1 آورده شده‌است.

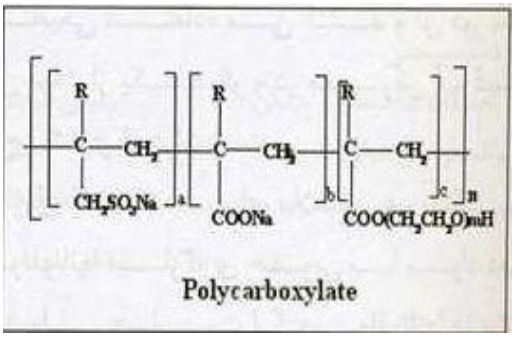
شکل 1. تفکیک سنگدانه‌ها بر اساس سایز با الک

Fig. 1. Separation of aggregates based on sieve size

دراین پژوهش از دو نوع افزودنی روان‌کننده و ضدیخ استفاده شده‌است که خصوصیات آن‌ها مطابق جدول 3 می باشد.

2-1- ساختار شیمیایی ضدیخ و روان‌کننده مصرفی

در ساختار ضدیخ ترکیباتی متشکل از مواد شیمیایی، الکترولیت‌های ضعیف، سدیم نیترات، سدیم کلرید و ترکیبات ارگانی غیرالکترولیتی وجود دارد که دمای انجماد آب موجود در بتن را پایین می‌آورد. ساختار روان‌کننده مصرفی که بر پایه پلی‌کربوکسیلات است به صورت شکل زیر است[11].



شکل 2. ساختار مولکولی روان‌کننده مصرفی

Fig. 2. The molecular structure of the used superplasticizer

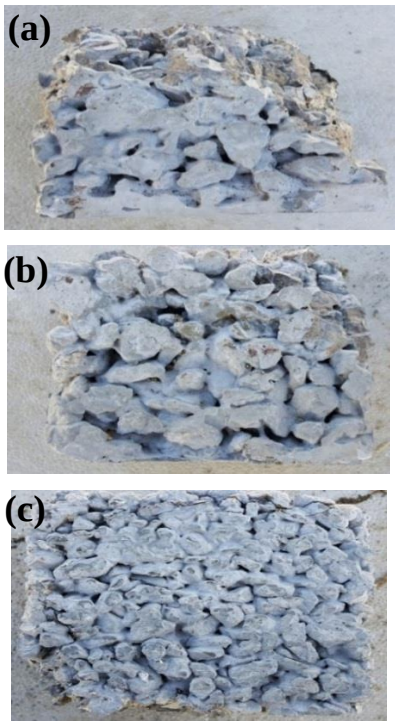
در ابتدای کار تمام مصالح خشک‌شده در آون را الک کرده و مانده روی الک‌های مختلف مطابق شکل 2 تفکیک شده‌است. و سپس در نسبت آب به سیمان - (W/C) و شن به سیمان (G/C) مختلف با سیمان و آب به مقدار معلوم درمخلوط‌کن به خوبی به مدت پنج دقیقه مخلوط شده‌است. و بتن حاصل در قالب‌های مکعبی با ابعاد 15 سانتی‌متری ریخته شده‌است. و پس از 24 ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شده و در حوضچه پر از آب قرار داده و بعد ازگذشت مدت لازم (7 روز و یا 28 روز) نمونه‌ها از آب خارج شده‌اند. بعد از خشک شدن در مجاورت هوای آزمایشگاه به دمای 25 درجه سانتیگراد به مدت 24 ساعت و سپس یک ساعت در آون با دمای 120 درجه سانتیگراد نمونه‌ها کاملا خشک شدند. و سپس آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها مطابق شکل 3 صورت گرفته‌است. در برخی نمونه‌ها روان‌کننده هم به مخلوط بتن اضافه شده و تاثیر آن بر

مقاومت بتن اسفنجی و توانایی نفوذ آب در آن با قضاوت از روی تخلخل آن بررسی شده است. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C192 انجام شده است.

شکل 3. آزمایش مقاومت فشاری بتن متخلخل

Fig. 3. Test of compressive strength of pervious concrete

مطابق شکل 4 ظاهر بتن‌ها پس از آزمایش مقاومت فشاری متفاوت بود و هم خط گسیختگی و هم ناحیه گسستگی در هر بتن با دانه‌بندی مختلف تفاوت داشت.



شکل 4. مقایسه ظاهر بتن‌متخلخل پس از آزمایش مقاومت-فشاری (به ترتیب از بالا به پایین دانه‌بندی 1-2-3)

Fig. 4. Comparison of the appearance of pervious concrete after the resistance test

به طور کلی در دانه‌بندی‌ها با سایز بزرگ‌تر خط شکستگی به مرکز نزدیک‌تر و ترک ناشی از گسیختگی آن بزرگ‌تر است. و حتی در برخی نمونه‌ها ترک منجر به شکستگی نمونه شده‌است. در نمونه‌های با سنگدانه کوچک‌تر معمولا ترک‌های ریزتر و بدون جداشدگی در نمونه‌ها به وجود آمده‌است. از شکل‌های بتن اسفنجی شکسته با دانه‌بندی‌های مختلف می‌توان دریافت که بتن ساخته شده با دانه‌بندی 1 تحت اثر بار بیشترین آسیب را دیده و بتن ساخته شده با سنگدانه دانه‌بندی 3 کمترین آسیب را دیده که از این نظر هم برتری با دانه‌بندی 3 بوده است.

3- نتایج و تفسیر

پس از تهیه مصالح، مخلوط کردن و عمل‌آوری نمونه‌ها در مدت‌زمان لازم آزمایش‌های معرفی شده در بخش شرح آزمایش بر روی آن‌ها انجام گرفت و نتایج آن‌ها در قالب جداول 4، 5 و 6 ارایه شده‌است.

جدول 4. مشخصات روان‌کننده و ضدیخ مصرفی

Table 4. Useable superplasticizer and antifreeze specifications

	Superplasticiser	Antifreeze
Specific gravity (gr/cm^3)	1.07	1.28
Liquidation	Dissoluble	Not dissoluble
Color	Pink	Yellow
PH	7	7
Chlorine value	Without chlorine	Without chlorine
Percentage of use(%)	2	2

به طور کلی طبق نتایج جدول 4 مقاومت فشاری 7 روزه در نسبت شن به سیمان کمتر با افزودن روان‌کننده و ضدیخ افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن روان‌کننده افزایش و با افزودن ضدیخ تقریبا تغییری در مقاومت رخ نداده‌است. در نسبت شن به سیمان بیشتر مقاومت فشاری 7 روزه با افزودن روان‌کننده و ضدیخ افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن ضدیخ و به خصوص روان‌کننده افزایش یافته هر دو نسبت شن به سیمان با افزودن افزودنی‌ها تخلخل کاهش یافته-است.

جدول 5. نتایج برای بتن متخلخل با سنگدانه دانه‌بندی 1

Table 5. Results for pervious concrete with first grading

Type of pervious concrete for different additive	Pervious concrete mixing plan (Water to cement ratio to cement)	G/C=3 W/C=0.3	G/C=6 W/C=0.3
Typical pervious concrete	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	8.93	2.43
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	13.67	4.13
	Density (kg/cm^3)	1861	1787
	compaction-factor test (c.f)	0.87	0.76
	Porosity (%)	34	38
Pervious concrete with Superplasticizer	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	10.34	3.2
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	15.75	6.31
	Density (kg/cm^3)	1889	1788
	compaction-factor test (c.f)	0.90	0.86
	Porosity (%)	32	33
Pervious concrete with antifreeze	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	10.11	2.71
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	13.78	4.72
	Density (kg/cm^3)	1871	1782
	Compaction-factor test (c.f)	0.87	0.81
	Porosity (%)	34	36

جدول 6. نتایج برای بتن متخلخل با سنگدانه دانه‌بندی 2

Table 6. Results for pervious concrete with second grading

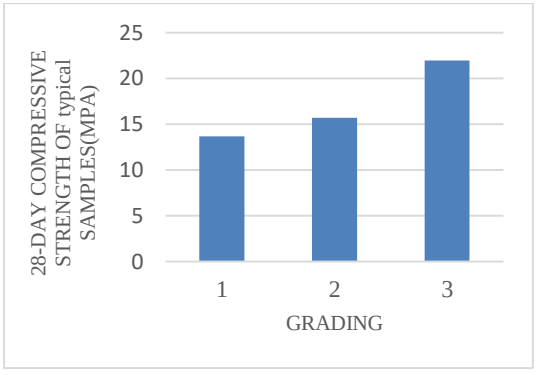
Type of pervious concrete for different additive	Pervious concrete mixing plan (Water to cement ratio to cement)	G/C=3 W/C=0.3	G/C=6 W/C=0.3
Typical pervious concrete	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	9.61	4.57
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	15.71	7.30
	Density (kg/cm^3)	1861	1836
	compaction-factor test (c.f)	0.84	0.82
	Porosity (%)	29	31
Pervious concrete with Superplasticizer	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	10.45	5.28
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	17.52	8.59
	Density (kg/cm^3)	1974	1895
	Compaction-factor test (c.f)	0.89	0.82
	Porosity (%)	27	28
Pervious concrete with antifreeze	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	9.42	4.66
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	14.67	7.32
	Density (kg/cm^3)	1923	1826
	Compaction-factor test (c.f)	0.82	0.89
	Porosity (%)	25	27

طبق جدول 5 مقاومت فشاری 7 روزه در نسبت شن به سیمان کمتر با افزودن روان‌کننده افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن روان‌کننده افزایش و با افزودن ضدیخ اندکی کاهش مقاومت رخ داده است. در شن به سیمان بیشتر مقاومت 7 روزه با افزودن روان‌کننده افزایش و با افزودن ضدیخ اندکی

کاهش مقاومت رخ داده است. در شن به سیمان بیشتر مقاومت فشاری 7 روزه با افزودن روان‌کننده و ضدیخ افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن روان‌کننده مقدار کمی افزایش یافته است.

طبق جدول 6 فوق مقاومت فشاری 7 روزه در شن به سیمان کمتر با افزودن روان‌کننده و ضدیخ افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن روان‌کننده افزایش و با افزودن ضدیخ کاهش یافته است. در شن به سیمان بیشتر مقاومت فشاری 7 روزه با افزودن روان‌کننده و ضدیخ افزایش یافته و مقاومت فشاری 28 روزه با افزودن روان‌کننده و ضدیخ نیز مقداری افزایش یافته است.

در شکل 4 مقاومت فشاری 28 روزه در 3 دانه‌بندی مورد استفاده مقایسه شده‌است. مطابق شکل 5 در دانه‌بندی 2 نسبت به دانه‌بندی 1 حدود 15 درصد افزایش مقاومت فشاری و در دانه‌بندی 3 نسبت به دانه‌بندی 2 حدود 40 درصد افزایش مقاومت رخ داده‌است و از آنجا که از دانه‌بندی 1 تا 3 به ترتیب اندازه سنگدانه‌ها کوچک می‌شود اما مقاومت افزایش می‌یابد. بر خلاف تصور اولیه که در بتن معمولی با افزایش اندازه سنگدانه‌ها مقاومت افزایش می‌یابد، در بتن متخلخل با افزایش اندازه سنگدانه‌ها مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

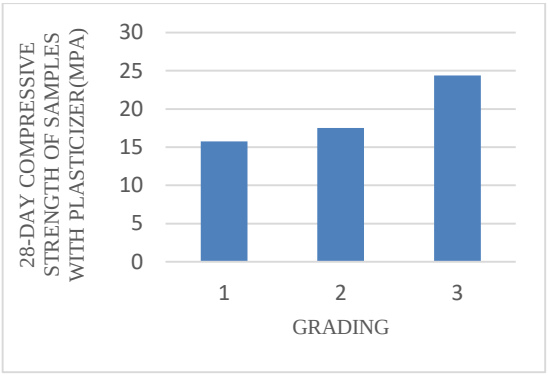


شکل 5. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های معمولی در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 5. Comparison of compressive strength of typical samples in three different gradation

اما نباید ریزی سنگدانه‌های مصرفی به اندازه‌ای باشد که نفوذپذیری بتن متخلخل را با اخلال مواجه کند.

در شکل6 مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌های حاوی روان‌کننده در 3 دانه‌بندی مصرفی استفاده شده‌است. با توجه به شکل 5 افزودن روان‌کننده به بتن متخلخل به اندازه 2 درصد وزن سیمان در تمام دانه‌بندی‌ها حدود 2 تا 3 مگاپاسکال مقاومت فشاری 28 روزه بتن متخلخل را افزایش داده‌است. و در دانه‌بندی 2 نسبت به دانه‌بندی 1 حدود 11 درصد افزایش و در دانه‌بندی - 3 نسبت به دانه‌بندی 2 حدود 39 درصد افزایش مقاومت مشاهده شده‌است. افزودن روان‌کننده افزایش چشمگیری بر کارایی بتن نمی‌گذارد چون بتن متخلخل کلا کارایی پایینی دارد ولی می‌تواند در کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقاومت بتن متخلخل موثر باشد.



شکل 6. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی روان کننده در 3 دانه‌بندی مختلف

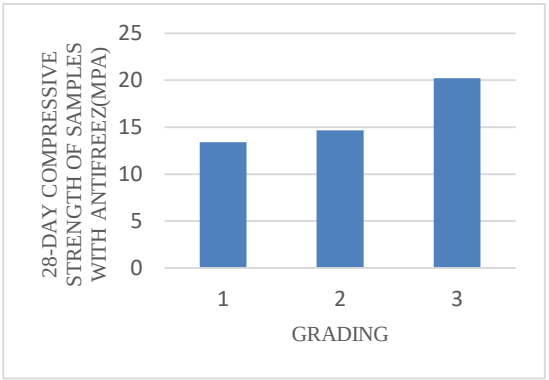
Fig. 6. Comparison of compressive strength of samples containing superplasticizer in three different gradation

در شکل 7 مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ضدیخ در دانه‌بندی‌های مختلف مقایسه شده‌است. مطابق شکل - 6 در نمونه‌های حاوی ضدیخ که به مقدار 2 درصد وزن سیمان مصرفی به نمونه‌ها ضدیخ اضافه شده‌است تغییر محسوسی در مقاومت فشاری بتن حاوی ضدیخ نسبت به نمونه‌های معمولی وجود نداشت و نوسانات مقاومت در نمونه‌ها کمتر از 5 درصد بیشتر یا کمتر نسبت به نمونه‌های معمولی بوده‌است اما روند عمومی تا به اینجای کار نشان می‌دهد که مقاومت فشاری با کاهش اندازه سنگدانه همواره افزایش یافته‌است.

جدول 7. نتایج برای بتن با سنگدانه دانه‌بندی 3

Table7. Results for pervious concrete with third grading

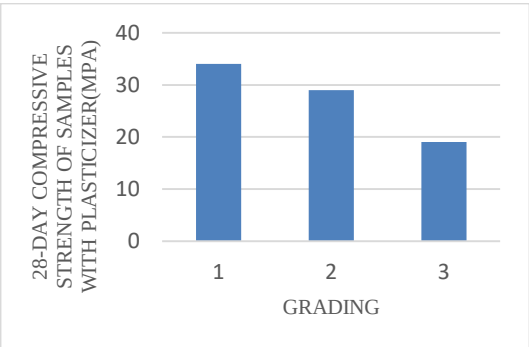
Type of pervious concrete for different additive	Pervious concrete mixing plan (Water to cement ratio to cement)	G/C=3 W/C=0.3	G/C=6 W/C=0.3
Typical pervious concrete	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	15.37	5.79
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	20.96	8.36
	Density (kg/cm^3)	2148	1956
	Compaction-factor test (c.f)	0.71	0.69
	Porosity (%)	20	18
Pervious concrete with Superplasticizer	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	17.74	6.17
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	22.39	9.98
	Density (kg/cm^3)	2219	2181
	Compaction-factor test (c.f)	0.81	0.79
	Porosity (%)	17	19
Pervious concrete with antifreeze	7-day compressive strength of the sample (Mpa)	16.8	5.84
	28-day compressive strength of the sample (Mpa)	21.21	8.87
	Density (kg/cm^3)	2137	1999
	Compaction-factor test (c.f)	0.77	0.69
	Porosity (%)	18	19



شکل 7. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ضدیخ در 3 دانه بندی مختلف

Fig. 7. Comparison of compressive strength of samples containing antifreeze in three different gradation

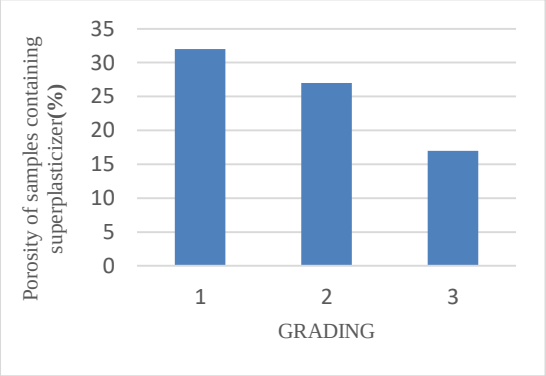
در شکل 8 تخلخل نمونه‌های معمولی در 3 دانه‌بندی مصرفی با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل 7 در نمونه‌های معمولی با دانه‌بندی 2 نسبت به دانه‌بندی 1 حدود درصد کاهش تخلخل (نسبت حجم هوا در بتن به حجم کل بتن) و در دانه‌بندی 3 نسبت به دانه‌بندی 2 حدود 10 درصد کاهش تخلخل وجود داشته است و در کل از دانه‌بندی 1 تا 3 با کاهش اندازه سنگدانه مصرفی حدود 15 درصد کاهش تخلخل رخ داده است و تخلخل از 34 درصد به 19 درصد کاهش یافته است.



شکل 8. مقایسه تخلخل نمونه های معمولی در 3 دانه-بندی مختلف

Fig. 8. Comparison of pervious of typical samples in three different gradation

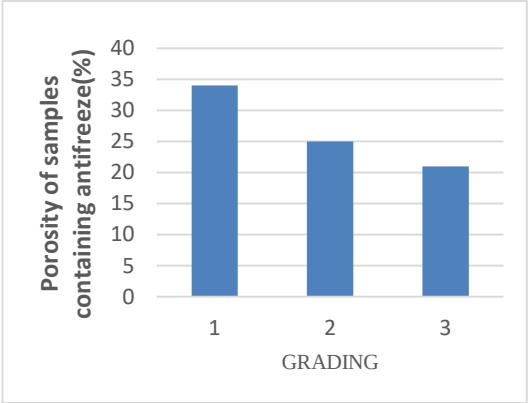
در شکل 9 تخلخل نمونه‌های حاوی روان‌کننده در 3 دانه‌بندی مقایسه شده‌است. مطابق شکل 8 در نمونه-های حاوی روان‌کننده که به مقدار 2 درصد وزن سیمان به نمونه روان‌کننده اضافه شده‌است در دانه-بندی 2 نسبت به دانه‌بندی 1 حدود 5 درصد کاهش تخلخل و در دانه‌بندی 3 نسبت به دانه‌بندی 2، 10-درصد کاهش تخلخل رخ داده است و به طور کلی از دانه‌بندی 1 تا 3 در این نوع نمونه‌ها حدود 15 درصد کاهش تخلخل رخ داده است.



شکل 9. مقایسه تخلخل نمونه های حاوی روان‌کننده در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 9. Comparison of porosity of samples containing superplasticizer in three different gradation

در شکل 10 تخلخل نمونه‌های دارای ضدیخ در 3 دانه-بندی مقایسه شده‌است. مطابق شکل 9 در نمونه‌های حاوی ضدیخ در دانه‌بندی 2 نسبت به دانه‌بندی 1 مقدار کاهش تخلخل 9 درصد و در دانه‌بندی 3 نسبت به دانه‌بندی 2 این مقدار 4 درصد و در کل این مقدار کاهش تخلخل از دانه‌بندی 1 تا 3، درصد بوده‌است.



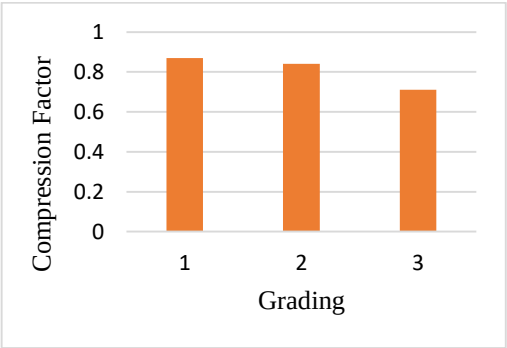
شکل 10. مقایسه تخلخل نمونه های حاوی ضدیخ در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 10. Comparison of porosity of samples containing antifreeze in three different gradation

در اشکال زیر محور افقی شماره دانه‌بندی است و محور عمودی فاکتور تراکم نمونه‌ها است.

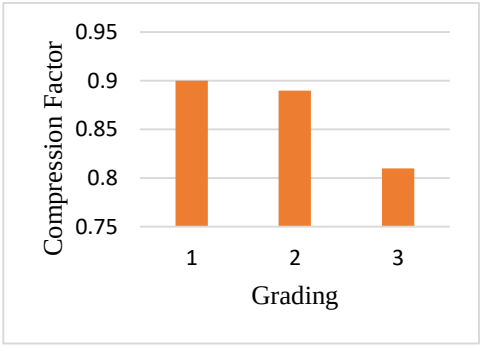
طبق آزمایشات انجام گرفته با افزودن ضدیخ به بتن از طرفی واکنش هیدراسیون (واکنش سیمان با آب) با افزایش سرعت مواجه خواهد بود و از طرفی دیگر نوعی گرما در مخلوط بتن تولید می‌شود. همچنین استفاده از روان‌کننده باعث کاهش ترک‌خوردگی در بتن می‌شود. به طور کلی نتایج حاصل از این آزمایشات در مقدار مقاومت فشاری بتن اسفنجی و تناسب آن با مقدار تخلخل و چگالی با نتایج پژوهش لیان و همکاران قرابت داشت [12].

اما مقادیر مقاومت فشاری حاصل از این پژوهش به مقدار قابل توجهی (حدودا 40 درصد) از مقادیر حاصل از پژوهش ابراهیم و همکاران بیشتر بود [13].



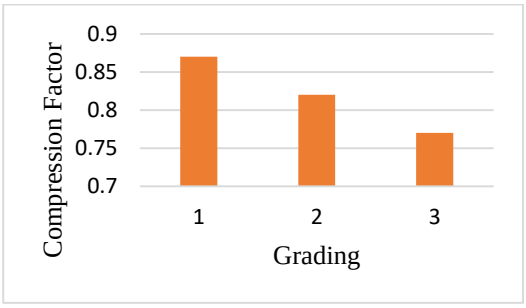
شکل 11. مقایسه فاکتور تراکم نمونه های معمولی در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 11. Comparison of compression factor of normal samples in three different gradation



شکل 12. مقایسه فاکتور تراکم نمونه های حاوی روان-کننده در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 12. Comparison of compression factor of samples containing superplasticizer in three different gradation



شکل 13. مقایسه فاکتور تراکم نمونه های حاوی ضدیخ در 3 دانه‌بندی مختلف

Fig. 13. Comparison of compression factor of samples containing antifreeze in three different gradation

4- نتیجه‌گیری

به طور کلی از بررسی نمونه‌های 7 روزه و 28 روزه نتایج کلی زیر حاصل شده‌است:

- طبق نتایج بررسی شده برای مناطق کم‌بارش و بارگذاری سنگین دانه‌بندی 3 و برای مناطق با بارش زیاد یا معابر با بار عبوری کم می تواند مناسب باشد. اما به طور کلی برای مناطق پر-بارش هم دانه‌بندی 3 پیشنهاد می‌گردد زیرا هم تخلخل و زهکشی مطلوب را برآورده می‌کند و هم مقاومت قابل قبولی دارد و همین طور سطح صاف‌تر و دوام بهتری دارد.
- نمونه‌های بتن متخلخل حاوی روان‌کننده در آزمایش مقاومت فشاری مقداری بهتر عمل کردند و کارایی آن‌ها هم به مقدار ناچیزی بیشتر از سایر نمونه‌ها در آزمایش فاکتور تراکم بود (البته بتن متخلخل کلا کارایی پایینی دارد) اما بر روی تخلخل و قدرت زهکشی بتن تاثیر مثبتی نداشت و تخلخل را مقدار کمی کاهش داده‌است.
- نمونه‌های حاوی روان‌کننده دارای شیرابه بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند و از این رو اگر خاک زیر بتن مقداری نفوذپذیر و دانه‌ای باشد می‌تواند چسبندگی بهتری ایجاد شود (مثلا خاک SC وGC). اما در خاک‌های نفوذناپذیر اگر بتن در محل اجرا شود این شیرابه می‌تواند مانند لایه‌ای نفوذناپذیر در زیر بتن قرار گیرد و در نفوذپذیری آن اخلال ایجاد کند که برای جلوگیری از این مشکل می‌توان از نمونه‌های پیش‌ساخته استفاده کرد که قسمت نفوذناپذیر آن در کارگاه با برش یا خراشیدن آن قسمت‌ها برداشته شده است.

مراجع

[1] Portland Cement Association.; "*Pervious Concrete*", Hydrological Design and Resources (CD), CD063, Skokie, Illinois, p.p. 63, **2006**.

[2] Daei Chini, M.; Mahboobi, A.; " *Pervious Concrete*", Fourth National Congress on Civil Engineering, University of Tehran, **2008** *(In Persian)*.

[3] NRMCA.; "*Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete*", National Ready Mix Concrete Association, Silver Spring, Maryland, p.p. 12, **2004**.

[4] Portland Cement Association.; "*Pervious Concrete at the LEED™-Certified East Atlanta Library (video)*", CD067, Skokie, Illinois, **2006**.

[5] Tennis, P.D.; Leming, M.K.; Akers, D.J.; "*Pervious Concrete Pavements*", EB302, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD, USA. **2004**.

[6] Miri, M.; Rakhshani Mehr, M.; Miri, F.; *"Numerical and laboratory study of the effect of coating compressive strength and pressure caused by reinforcement corrosion on start More Thin in Reinforced Concrete Structures",* Amir Kabir Civil Engineering Journal, p.p. 251-261, **2018** (In Persian).

[7] Shi, C.; He, T-sh.; Zhang, G; Wang, X.;

Hu, Y.; *"Effects of superplasticizers on carbonation resistence of concrete"*, Construction and building materials, vol. 108, p.p. 48-55, **2016**.

[8] Feng, W.; Xu, J.; Chen, P.; Jiang, L.; Song, Y.; Cao, Y.; *"Influence of polycarboxylate superplasticizer on chloride binding in cement paste",* Construction and building materials, vol. 158, p.p. 847-854, **2018**.

[9] Meier, M.; Napharatsamee, T.; Plank, J.; "*Dispering performance of superplasticizers admixed to aged cement",* Construction and building material, vol. 139, p.p. 232-240, **2017**.

[10] Amanzadeh. A.; "*Porous Concrete*", National Conference on Applied Civil Engineering and NewAchievements, p.p. 1-4, **2013** *(In Persian)*.

[11] Vaghefi, M.; Saadat, A.; Hashemi, Sh.; *"Check the general specifications and superplasticizer mechanism"*, https://www.betonplast.com.

[12] Lian, C.; Zhuge, Y.; Beecham, S.; *"The relationship between porosity and strength for porous concrete"*, Construction and Building Materials, 25(11), p.p. 4294-4298, **2011**.

[13] Ibrahim, A.; Mahmoud, Y.; Yamin, M.; Patibandla, V.C.; *"Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties"*. Construction and building materials, 50, p.p. 524-529, **2014.**