نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۱، سال ۱۳۹۸، صفحه ۴۳ تا ۵۸

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بهبود پارامترهای مکانیکی بتن حاصل از سیمان پوزولانی جهت استفاده در پروژه‌های آبیاری و زهکشی

مهزاد اسمعیلی فلک[1*]، امین لطفی اقلیم[2]، سمیرا نعمت زاده[3]

۱-دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- مربی، گروه عمران، واحد اردبیل، دانشگاه پیام نور، اردبیل، ایران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

این مقاله به کمی‌سازی عدم‌قطعیت ناشی از مدل‌سازی سازه‌های فولادی توسط تیر تیموشنکو می‌پردازد. یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل دینامیک سازه‌ها، مدل کردن سازه‌های ساختمانی توسط مدل‌های تیر پیوسته است. استفاده از تیر تیموشنکو، به‌عنوان یک کلاس از مدل‌های تیر پیوسته، به‌جای یک مدل اجزای محدود به تسریع محاسبات منجر می‌شود. این کاهش محاسبات، امکان شناسایی احتمالاتی برخط سازه‌های ساختمانی و تشخیص سریع خرابی در آن‌ها را پس از یک رویداد لرزه‌ای فراهم می‌سازد. لازمه شناسایی سازه‌ها به این روش، کمی‌سازی عدم‌قطعیت ناشی از تقریب سازه با یک تیر پیوسته است که هدف اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد. بدین منظور با توسعه یک سیستم خودکار، تعداد ۱۰۰۰ مدل اجزای محدود سازه ساختمانی طراحی شده و تحت تحلیل مقدار ویژه قرار می‌گیرند تا بسامد و شکل مودی طبیعی آن‌ها تعیین شود. برای هر سازه، تیر تیموشنکوی معادل آن تعیین می‌شود. سپس، خطای ناشی از ارضا نشدن معادله مشخصه تیر تیموشنکو به‌ازای بسامد و شکل مودی ناشی از مدل دقیق اجزای محدود محاسبه می‌شود. با تحلیل آماریِ این خطاها برای سیستم‌های مختلف، مشخصات توزیع احتمال خطا، از جمله شکل توزیع، میانگین و انحراف معیار آن تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا حساسیت اندکی به طول، عرض و ارتفاع سازه دارد، اما به سیستم سازه‌ای بسیار وابسته است. بر اساس این نتایج، انحراف معیار خطا برای سازه‌هایی با سیستم قاب خمشی فولادی ۳/۵ برابر کمتر از سازه‌هایی با سیستم مهاربندی فولادی است. بنابراین، کلاس مدل تیر تیموشنکو تقریب بهتری از سیستم‌های قاب خمشی فولادی ارائه می‌کند.

کلمات کلیدی: سیمان پوزولانی اردبیل، سیمان تیپ ۲ صوفیان، خاکستر بادی، میکروسیلیس، پودر سنگ

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2017.100834.1349
۱۳۹۶/۰۷/۲۲	۱۳۹۶/۰۹/۱۱	۱۳۹۶/۰۹/۱۵	۱۳۹۶/۰۹/۱۵	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2017.100834.1349

*نویسنده مسئول: مهزاد اسمعیلی فلک

پست الکترونیکی: Mahzad.ef@tabrizu.ac.ir

Improvement of Mechanical Parameters of Concrete Yielded from Pozzolanic Cement for Irrigation and Drainage Projects

Mahzad Esmaeili-Falak[1*], Amin Lotfi Eghlim[2], Samira Nematzadeh[3]

1-Ph.D in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
2- Instructor, Department of Civil Engineering, Ardabil Branch, Payam e nour University, Ardabil, Iran
3-Ph.D Student in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

ABSTRACT

Among various active parts of construction industry, irrigation and drainage projects (such as dams, spillways and peripheral parts such as canals) are one of the biggest consumers of cement. Various empirical reports show that the concrete made of Ardabil's pozzolanic cement does not meet the requirement for irrigation and drainage projects in case of mechanical characteristics which signifies the importance of further research in this area. The objective of this study is to investigate the suitability of replacing Ardabil's pozzolanic cement with type 2 Soufian cement from the viewpoint of compression strenght at irrigation and drainage projecta. This study focuses on experimental methods by performing standard compression strength tests on base and improved speimens. The initial results showed that solely utilization of Ardabil's pozzolanic cement in structural parts is not feasible and there should be some other approaches to reach this end. In this regard, 4 additive materials were used instead of cement including: stone powder, fined part of sand, silica fume and fly ash. The results indicated that utilization of fly ash increases the compressive strength of the cement in long term application; however, it causes a reduction in compressive strength in short term application. Furthermore, replacemet of silica fume in lower percentages causes a reduction in compression strength; however, higher percentage of silica fume replacement increases compression strength. The finer parts of the sand slightly decreased the compression strength and the replacement of stone powder yields to an increase in long term compression strength.

ARTICLE INFO

Received: 14/10/2017
Revised: 02/12/2017
Accepted: 06/12/2017

Keywords:
Ardabil's pozzolanic cement,
Sofian's type 2 cement,
Fly Ash,
Silica fume,
Stone powder.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.100834.1349

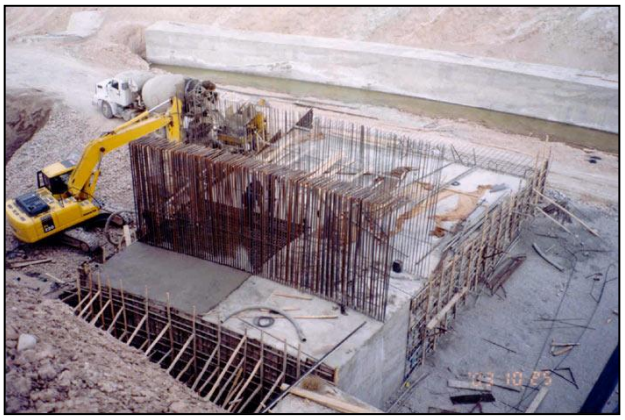
*Corresponding author: Mahzad Esmaeili-Falak
Email address: Mahzad.ef@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

تحقیق و بررسی پیرامون کاربرد بتن به عنوان مصالح عمرانی و نحوه تهیه آن در شرایط آب و هوایی مختلف و همچنین چگونگی استفاده از این ماده در بخش‌های مختلف عمرانی و مصرف روزافزون آن از اهمیت بالایی برخوردار است. تکنولوژی مربوط به آزمایش‌های گوناگون برای پی بردن به مشخصات مختلف بتن به هنگام تهیه، عمل‌آوری و بهره‌برداری بتن، همچنان در حال پیشرفت است. دستیابی به خواص ایده‌آل بتن و ارتقاء پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن، سبب شده است تا امروزه پوزولان‌ها جایگاه ثابتی در میان اجزا تشکیل دهنده بتن پیدا کنند. ضرورت استفاده بهینه از سیمان در بتن و افزایش دوام آن از اهمیت خاصی در خصوص کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف بهینه انرژی برخوردار می‌باشد چرا که در فرآیند تولید هر تن سیمان، حدود یک تن گاز کربن‌دار وارد محیط زیست و بیش از ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی (مازوت و یا گاز طبیعی) در کنار ۱۱۰ کیلو وات ساعت برق مصرف می‌شود [۱]. بنابراین استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در سیمان، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، به داشتن محیط زیست سالم نیز کمک می‌نماید. از این رو اهمیت استفاده از سیمان‌های پوزولانی و نیز ضرورت انجام پژوهش حاضر بیش از پیش آشکار می‌گردد.

مقاومت فشاری پایین بتن مستفید از سیمان اردبیل سبب شده که مشاوران طرح‌های آبیاری و زهکشی در خصوص کیفیت سیمان پوزولانی اردبیل با احتیاط برخورد نموده و استفاده از سیمان تیپ ۲ صوفیان را توصیه نمایند. این امر همه ساله هزینه‌های خرید و حمل قابل توجهی به پروژه‌های آبی استان اردبیل، تحمیل می‌نماید.

در سال‌های اخیر، کیفیت غیرقابل قبول تولید سیمان پوزولانی اردبیل و در نتیجه مشخصه‌های مکانیکی و شیمیایی نامناسب بتن حاصل از آن منجر شده است که نارضایتی از محصول بومی در سطح کلان مطرح شده و در قالب اولویت‌های پژوهشی وزارت نیرو (شرکت آب منطقه‌ای اردبیل) قرار گیرد. شکل‌های ۱ و ۲ نمونه‌ای از پروژه‌های آبیاری و زهکشی اجرا شده در استان اردبیل را نشان می‌دهد که بنا به مطالعات و آزمایش‌های اولیه مهندسین مشاور و پیمانکار، استفاده از سیمان تیپ ۲ صوفیان در آن‌ها، از یک سو هزینه‌های اضافی به پروژه اعمال نموده و از سوی دیگر منجر به کاهش رونق اقتصادی کارخانه سیمان اردبیل می‌گردد. پژوهش حاضر نیز با فرض این که مقاومت بتن حاصل از سیمان پوزولانی اردبیل مشخصه‌های مکانیکی قابل قبول جهت استفاده در پروژه‌های آبیاری و زهکشی را ندارند، مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱: نمونه‌ای از بتن‌ریزی در پروژه سد یامچی

شکل ۲: نمونه ای از بتن ریزی در شبکه آبیاری و زهکشی طرح پایاب خداآفرین : الف) قالب بندی و بتن ریزی فلوم. ب) قالب بندی و بتن ریزی ایستگاه پمپاژ

با تـوجه به مصرف انبوه سیمان در پروژه‌های آبی اعم از سدها و کانال‌ها، انتظار می‌رودکه استفاده از محصولات بومی استان علاوه بر توسعه پایدار، موجبات رعایت ملحوظات اقتصادی و زیست محیطی را فراهم نماید[۲]. با تهیه گزارش‌های میدانی از سایر پیمانکاران و شرکت‌های مشاور و آزمایشگاه بتن، بر این امر صحه گذاشته شد که بتن‌های حاصل از سیمان پوزولانی اردبیل در صورت کاربرد در بدنه سد، سرریز سد و رویه کانال‌ها، از لحاظ مشخصه‌های مکانیکی و دوام، ممکن است مشکلاتی را ایجاد نماید.

تا کنون بر روی سیمان پوزولانی اردبیل و بهبود کیفیت آن، پژوهش جامع و درخور توجهی ارائه نگردیده است، از این رو در ادامه، بررسی کارهای مشابه ارائه می‌گردد. از آنجا که علاوه بر پوزولان، ویژگی‌های سایر اجزا تشکیل دهنده بتن نیز بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن اثرگذار است، مطالعه و بررسی تأثیر متقابل پوزولان‌ها و ویژگی‌های سایر اجزا تشکیل دهنده بتن بر خواص آن ضروری است [۳-۱۰]. در این راستا مطالعاتی در زمینه تأثیر ویژگی‌های پوزولان‌ها بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن صورت گرفته است. اسکریونر و همکاران[۱۱] با مقایسه مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و خمیر سیمان حاوی میکروسیلیس دریافتند که استفاده از میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان شده و علاوه بر افزایش مقاومت خمیر، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. برخی از محققان دریافته‌اند که میکروسیلیس، مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می‌بخشد. اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری، بین ۳ تا ۲۸ روز اتفاق می‌افتد[۱۲-۱۷].

استفاده وسیع از پوزولان‌های مصنوعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی می‌باشد. هرچند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد [۱۸]. نیلی و صالحی[۱۹] طی مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که جایگزینی خاکستر بادی و پوزولان طبیعی در کوتاه مدت باعث کاهش مقاومت اولیه شده و این روند کاهش مقاومت، با افزایش مقدار جایگزینی بیشتر می‌گردد. در پژوهشی مشخص گردید که کرنش ناشی از خزش و جمع‌شدگی در نمونه‌های بتنی با درصد کمتر میکروسیلیس، بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج حاصل بیان‌گر آن است که استفاده از میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری، کششی و مدول ارتجاعی بتن خودمتراکم تاثیرگذار بوده و با افزایش مقدار آن، خواص مکانیکی بتن بهبود می‌یابد [۲۰].

مطالعات انجام شده توسط کابررا و کلایس[۲۱] و هاکو [۲۲] نشان می‌دهد که استفاده از میکروسیلیس در بتن، سبب کاهش ترک‌های ناشی از جمع شدگی و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. در راستای بررسی تأثیر میکروسیلیس بر پیوستگی بین بتن و آرماتور، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده میکروسیلیس سبب افزایش پیوستگی بتن با آرماتور می‌شود [۲۳]. سلوامونی و همکاران [۲۴] تأثیر انواع متفاوت افزودنی‌ها را به صورت انفرادی و توام بر روی کارایی بتن مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که اثر ترکیبی افزودنی‌ها نظیر خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج، نسبت به حالت منفرد استفاده از هریک، باعث بهبود کارایی بتن می‌گردد. تورک و همکاران [۲۵] با افزایش ۵ تا ۲۰ درصد وزنی میکروسیلیس با سیمان به صورت جایگزین در نمونه‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم و بررسی مقاومت آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد میکروسیلیس، پارامترهای مقاومتی و مدول ارتجاعی بتن مذکور به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. آتان و آوانگ [۲۶] اثر خاکستر پوسته برنج و دومون [۲۷] و فلک اغلو و همکاران [۲۸] تأثیر نسبت آب به سیمان را بر روی مقاومت کوتاه مدت بتن خودمتراکم مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این بعضی محققین رفتار بتن‌های سبک و مقاومت بالا را تحت تأثیر افزودنی‌های مختلف بررسی کردند [۲۹و۳۰]. در این پژوهش چگونگی و امکان‌سنجی استفاده از سیمان پوزولانی اردبیل به جای سیمان تیپ ۲ صوفیان بررسی شده است. هدف از این تحقیق، حذف هزینه حمل از استان‌های مجاور و عدم محدودیت تهیه سیمان، با معیار قرار دادن حداقل مقاومت فشاری بتن پیشنهادی، در پروژه‌های آبی استان اردبیل و با هدف بهبود کیفیت بتن های مصرفی و بهسازی سیمان اردبیل با جایگزنی افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی به صورت درصد وزنی جایگزین سیمان می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

روش این تحقیق بصورت عملی و آزمایشگاهی می‌باشد، به طوری که با استفاده از نتایج تحقیق‌های بنیادی و با هدف رفع مسائل و مشکلات جوامع انسانی انجام می‌شود. در اغلب آزمون‌های آزمایشگاهی در مهندسی سازه و تکنولوژی بتن تلاش بر آن است که شرایط واقعی وارد در سازه اصلی، در آزمایشگاه شبیه‌سازی گردد. در هر پژوهش تجربی، بایستی برنامه‌ای برای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها طراحی نمود. علی‌رغم دشواری روش فاکتوریل ساده، این روش به عنوان خط مشی این پژوهش انتخاب گردید. در این روش هر یک از متغیرها به ترتیب ثابت نگه داشته شده سایر متغیرها در کل محدوده مورد مطالعه تغییر می‌کنند. پارامترهای متغیر این پژوهش، نسبت آب به سیمان، چهار ماده افزودنی (میکروسیلیس، خاکستر بادی، پودر سنگ و نرمه ماسه) با درصدهای جایگزینی مختلف با سیمان و چهار سن مختلف عمل آوری (۷، ۱۱، ۲۸ و ۴۲ روز) نمونه‌های بتنی می‌باشد. دانه‌بندی و جنس سنگدانه‌ها در این پژوهش، جز پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به منظور حصول اطمینان از نتایج حاصل، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده و میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. نتایج، اختلافی در حدود کمتر از ۵٪ را نشان دادند که قابل قبول بوده و دقت نتایج آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

مقاومت فشاری بتن به عنوان یکی از مهمترین خواص بتن در نظر گرفته می‌شود و معمولاً شمای کلی از کیفیت بتن را بدست می‌دهد. علت این امر آن است که مقاومت، مستقیماً به ساختمان خمیر سیمان بستگی دارد. به دلیل سهولت در انجام آزمایش مقاومت فشاری و با توجه به اینکه بسیاری از خواص مطلوب بتن نظیر مدول ارتجاعی، مقاومت در برابر سایش و سایر مشخصات بتن، مرتبط به مقاومت آن می‌باشد، لذا رایج‌ترین آزمایش برای بتن سخت شده به حساب می‌آید. در این پژوهش به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌ها در قالب‌های پلاستیکی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر ریخته شدند. قالب‌ها باید با شکل و ابعاد تعیین شده و مسطح بودن با رواداری‌های کمی منطبق باشند. بهتر است قالب‌ها از نظر نشت و جلوگیری از نشست متعاقب کنترل گردند [۳۱].

۲-۱- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این پروژه، شامل سیمان پرتلند تیپ ۲ صوفیان و سیمان پرتلند پوزولانی کارخانه سیمان اردبیل، پودر سنگ، نرمه ماسه، میکروسیلیس، خاکستر بادی، مصالح سنگی و آب می‌باشد کـه در ادامه به شرح خصوصیات آنها پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- سیمان

سیمان‌هایی که در کلیه آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، سیمان‌های پرتلند تیپ ۲ صوفیان و سیمان پرتلند پوزولانی کارخانه سیمان اردبیل و از نوع کیسه‌ای می‌باشند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سیمان‌های مورد استفاده در این پروژه در جدول ۱ تا ۳ آورده شده است.

جدول ۱: برخی خصوصیات فیزیکی سیمان پوزولانی اردبیل و سیمان تیپ ۲ صوفیان

نوع سیمان	سطح مخصوص (بلین) cm^2/gr	باقیمانده نامحلول در اسید
پوزولانی اردبیل	۲۸۵۰	۱/۰۳
تیپ ۲ صوفیان	۳۰۴۹	۰/۷۱
حد استاندارد	حداقل ۲۸۰۰	حداکثر ۰/۷۵

جدول ۲: برخی خصوصیات فیزیکی سیمان پوزولانی اردبیل و سیمان تیپ ۲ صوفیان

نوع سیمان	گیرش (دقیقه)		آب مصرفی برای غلظت نرمال
	ابتدایی	انتهایی	
تیپ ۲ صوفیان	۱۷۸	۲۶۵	۲۲/۷
پوزولانی اردبیل	۱۵۴	۱۸۱	۲۴/۸
حد استاندارد	حداقل ۴۵	حداکثر ۳۶۰	-

جدول ۳: مشخصات شیمیایی سیمان اردبیل و سیمان صوفیان

اکسیدهای تشکیل دهنده سیمان	درصد اکسیـدها		حد استاندارد
	سیمان تیپ ۲ صوفیان	سیمان پوزولانی اردبیل	(٪)
SiO_2	۲۲/۰۵	۱۷/۲	حداقل ۲۰
CaO	۶۴/۵۹	۵۶/۲۹	حداقل ۵۰
Al_2O_3	۵/۰۴	۷/۱	حداکثر ۶
Fe_2O_3	۳/۴۷	۴/۳۲	حداکثر ۶
SO_3	۱/۷۳	۲/۶۴	حداکثر ۳

۲-۱-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی بین ۶۰ تا ۸۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهند. خصوصیات مصالح سنگی اثرات مهمی در تعیین نسبت اختلاط اجزا و قیمت تمام شده بتن دارد. مصالح سنگی مصرف شده در این پروژه به طور مشروح ذکر شده است. مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در طرح اختلاط‌ها

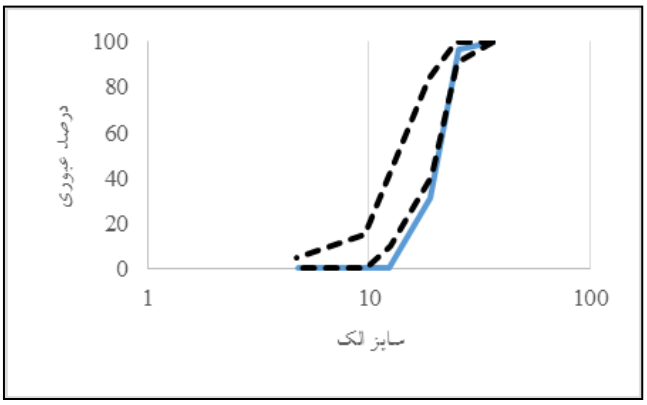
نوع سنگدانه	D_{max} (mm)	وزن مخصوص ظاهری خشک و میل خورده	چگالی	جذب آب (٪)	مدول نرمی
شن	۳۷/۵	۱۷۵۰	۲/۶۵	۲/۵	-
ماسه	-	-	۲/۵۸	۶/۳	۲/۸۵

۲-۱-۲-۱- شن

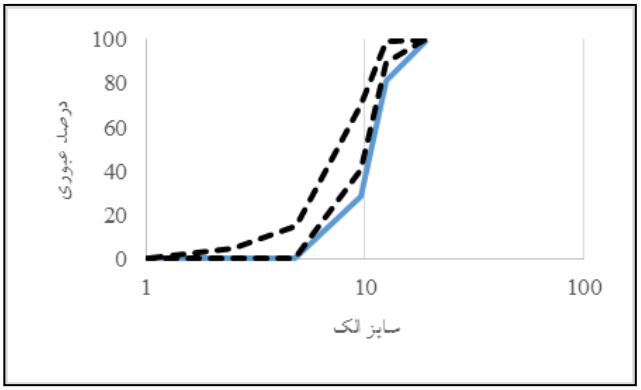
مصالح سنگی که در این پروژه به عنوان شن مورد استفاده قرار گرفته است، شامل شن‌های ریز و درشت کارخانه شن‌آویز نمین می‌باشد که بعد از دانه‌بندی و مورد قبول بودن آن (عدم وجود ناخالصی‌های آلی، پوشش رسی، ذرات گرد و خاک و ...) در محل آزمایشگاه دپو گردیده و در تمامی آزمایش‌ها از آنها استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی شن بادامی و نخودی به ترتیب در شکل-های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

۲-۱-۲-۲- ماسه

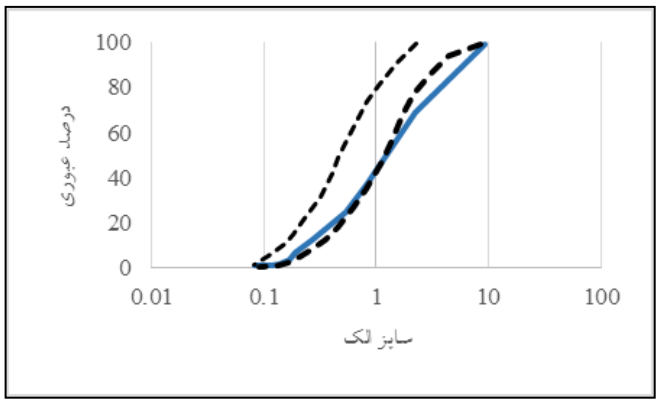
مصالحی که به عنوان سنگدانه ریز مورد استفاده قرار گرفته است، ماسه کارخانه شن‌آویز نمین بوده که مشخصات دانه‌بندی آن قابل قبول می‌باشد. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در این پژوهش نیز در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵: منحنی دانه‌بندی شن بادامی مورد استفاده در پژوهش حاضر



شکل ۶: منحنی دانه‌بندی شن نخودی مورد استفاده در پژوهش حاضر



شکل ۷: منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در پژوهش حاضر

۲-۱-۳- پودر سنگ

کربنات کلسیم یا همان پودر سنگ که نوعی پرکننده معدنی است، به طور عمده به عنوان بهبود دهنده خواص رئولوژیکی[1] بتن، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲]. پودر سنگ شامل گرانیت، آهک، مرمر، بازالت، کوارتز و انواع دیگر است. پودر سنگ آهک معمول‌ترین و فراوان‌ترین نوع آن می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

پودر سنگ به عنوان یک ماده پرکننده سبب افزایش سرعت هیدراتاسیون، افزایش شکل‌پذیری و پایداری بتن تازه می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که پودر سنگ آهک در اندازه بسیار ریز سبب افزایش مقاومت بتن، افزایش تراکم و کاهش نفوذپذیری بتن، افزایش سرعت هیدراتاسیون سیمان، چسبندگی و اجتناب از جداشدگی دانه‌ها، کاهش آب انداختگی بتن و کاهش نسبت مصرف فوق روان‌کننده در بتن می‌گردد، به طوری که بتن بدون پودر سنگ به فوق‌روان‌کننده بیشتری نیاز دارد [۳۳و۳۴]. مقدار متعارف مصرف پودر سنگ در بتن از ۱۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب بتن، بسته به شرایط، پیشنهاد شده است [۳۵].

۲-۱-۴- نرمه ماسه

نرمه ماسه به دانه‌هایی اطلاق می‌شود که در کارخانه ماسه‌شویی در پای تسمه نقاله‌های انتقال ماسه می‌ریزد و در نهایت جزء ضایعات محسوب می‌گردد. با انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ مشخص گردید که بافت بسیار ریزدانه ماسه را شامل می‌شود که فاقد مواد چسبنده همچون ذرات رسی می‌باشد.

هرچه بتن توپرتر باشد، مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتری خواهد داشت. در توصیف این جمله همین توضیح کافی است که، بتنی تحت عنوان بتن خوب شناخته می‌شود که به موقع گسیختگی، دانه‌های سنگی بتن شکسته شوند و در صفحه گسیختگی دانه‌های سنگی صرفا از هم جدا شوند. طبق بررسی‌های انجام شده، تا کنون از نرمه ماسه به عنوان بهبود دهنده خواص مکانیکی بتن استفاده نشده است. از این رو و در یک گام ابتکاری از نرمه ماسه به عنوان کاهنده تخلخل بتن استفاده گردید.

۲-۱-۵- خاکستر بادی

ذرات خاکستر بادی به علت شکل کروی و صاف می‌توانند مانند غلتک عمل کنند و سبب بهبود کارایی و اسلامپ[2] بتن شوند. خاکستر بادی به عنوان یک ماده مضاف مؤثر برای تولید بتن و کاهش حساسیت آن به تغییرات آب کاربرد دارد. از طرفی میزان بالای استفاده از خاکستر بادی، یک خمیر با چسبندگی بالا ایجاد می‌کند که در مقابل جریان بتن مقاومت می‌کند و باعث کاهش اسلامپ می‌شود.

[1] Rheological
[2] Slump

در این پژوهش از خاکستر بادی معمولی نوع F با مشخصات فیزیکی جرم حجمی gr/cm^3 ۲۲/۲، سطح ویژه cm^2/gr ۴۰۹۵ و ۱۲ درصد مانده روی الک ۳۲۵ و تجزیه شیمیایی مطابق جدول ۵ مورد استفاده قرار گرفته است. خاکسترهای بادی شامل آهک زنده، سولفات کلسیم و لارنیت هستند.

حضور خاکستر بادی باعث به تاخیر افتادن هیدراتاسیون C_3S در مراحل اولیه می‌شود [۳۶و۳۷]. این واکنش در مراحل بعد سریع‌تر انجام خواهد شد [۳۸].

جدول ۵: مشخصات شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده

ترکیب (٪)	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3
خاکستربادی	۶۰/۵	۰/۹	۳۲/۴	۴/۸۳	۰/۰

۲-۱-۶- میکروسیلیس

میکروسیلیس با سطح بالای ریزدانه و به ویژه سطح کروی ذرات آن منجر به چسبندگی مناسب و بهبود مقاومت در برابر جداشدگی می‌شود. این ماده به عنوان یکی از متداول‌ترین پوزولان‌های استفاده شده در صنعت بتن مطرح می‌باشد. مشخصات میکروسیلیس (شامل نسبت وزنی، خواص فیزیکی و شیمیایی و ...) توامان با ویژگی‌های سایر اجزای تشکیل دهنده بتن (شامل جنس سنگدانه، دانه‌بندی مصالح سنگی، مدول نرمی مصالح سنگی، نسبت آب به سیمان، خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و ...) بر روند تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن، تأثیرگذار است [۳۹].

میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش، تولید کارخانجات ازنا با وزن مخصوص Kg/m^3 ۲۱۰۰ و سطح ویژه (بلین) m^2/gr ۲۰/۲ می‌باشد که به صورت درصدهای مختلفی از وزن سیمان خشک بـه مخلوط اضافه شده است. خواص شیمیایی میکروسیلیس در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مورد استفاده

ترکیب (٪)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
میکروسیلیس	۹۴	۱	۰/۹	۱/۵	۰/۵

۲-۱-۷- آب مصرفی در بتن

طبق آیین نامه بتن ایران، آب مصرفی در ساخت بتن باید تمیز و صاف باشد. بطور کلی آب آشامیدنی برای ساختن بتن رضایت بخش تلقی می‌شود[۴۰].

۲-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف بتن به روش ACI 211.1-91، ۳۸۴ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵x۱۵x۱۵ سانتیمتر (۳ نمونه برای هر یک از سنین ۷، ۱۱، ۲۸، ۴۲ روزه و برای ۳۲ طرح اختلاط) مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. اختلاط‌های طراحی شده مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۷ ارائه شده است [۴۱].

با در نظر گرفتن پروژه‌های آبیاری و زهکشی استان اردبیل، برای نمونه، شرکت‌های مشاور در پروژه سد یامچی مقدار ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی برای بتن سرریز این سد و مقدار ۲۸۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی برای بتن سرریز سد عمارت پیشنهاد نموده‌اند.

۳- نتایج و بحث

مقادیر متوسط سه مقاومت فشاری بدست آمده برای مخلوط‌های مختلف که در جدول ۷ ارائه شده، برحسب مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۸، طرح اختلاط T2-50 مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۷۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و طرح اختلاط T2-40 مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۹۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را از خود نشان دادند که بیشتر از مقادیر پیشنهادی از سوی مشاور برای پروژه‌های سد یامچی و عمارت می‌باشند.

با توجه به شکل ۸ تفاوت زیادی بین مقاومت بتن ساخته شده از سیمان پوزولانی و سیمان تیپ ۲ با طرح اختلاط یکسان ملاحظه می‌گردد؛ همان عاملی که موجبات نارضایتی پیمانکاران، کارفرمایان و مهندسان درگیر با سیمان پوزولانی اردبیل را فراهم نموده و ضرورت انجام پژوهش حاضر را بیش از پیش آشکار می‌نماید. در نمونه‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵، حتی پس از گذشت ۴۲ روز مقاومت سیمان پوزولانی به سیمان تیپ ۲ نرسیده است و اختلاف زیادی دارد. ملاحظه می‌شود که حتی با کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت بتن‌های ساخته شده سیمان پوزولانی اردبیل به مقاومت سیمان تیپ ۲ صوفیان نمی‌رسد. به عنوان نمونه، درصد اختلاف مقاومت نمونه‌های مختلف برای سنین ۱۱ و ۴۲ روزه در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. برای نسبت آب به سیمان ۰/۴ تفاوت مقاومت فشاری برای بتن‌های ۷، ۱۱، ۲۸ و ۴۲ روزه بین سیمان اردبیل و سیمان تیپ ۲ صوفیان به ترتیب ۵۰، ۴۸، ۳۶ و ۲۹ درصد و برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ به ترتیب ۵۲، ۵۲، ۳۹ و ۲۹ درصد می‌باشد. مطابق این ارقام مشهود است که با افزایش سنین عمل‌آوری نمونه‌های بتنی بدون استفاده از مواد افزودنی، اختلاف مقاومت فشاری بتن حاصل از سیمان پوزولانی و تیپ ۲ صوفیان کاهش می‌یابد.

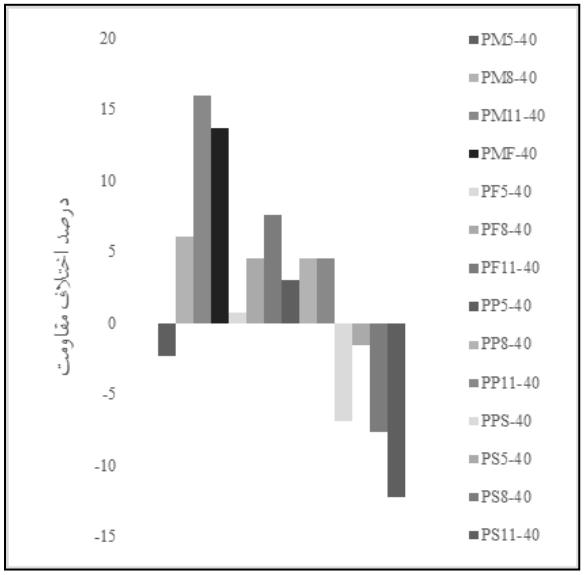
از این رو به منظور بهبود این نقص بتن‌های ساخته شده از سیمان پوزولانی اردبیل، تمهیداتی اندیشیده شد که مطابق آن از دو افزودنی طبیعی (پودر سنگ و نرمه ماسه) و دو افزودنی مصنوعی (میکروسیلیس و خاکستر بادی) به عنوان جایگزین وزنی بخش سیمانی بتن استفاده گردید.

جدول ۷: مقادیر طرح اختلاط بتن (وزن مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک، *SSD*، می‌باشد)

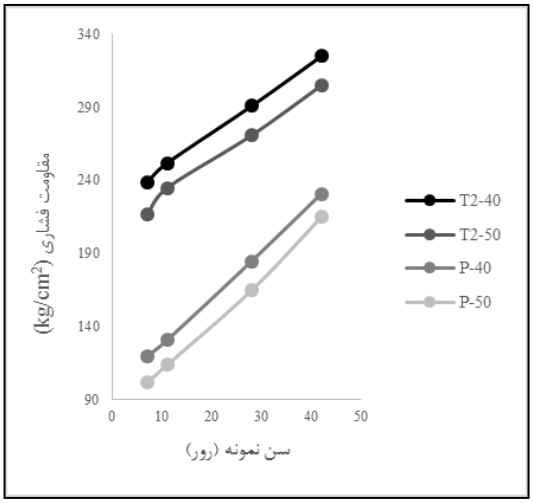
ردیف	نوع سیمان مصرفی	W/C	نوع افزودنی	درصد جایگزینی	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۱۱ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۴۲ روزه (Kg/cm^2)	نام اختصاری طرح اختلاط
۱	تیپ ۲ صوفیان	۰/۴	–	–	۲۳۹	۲۵۲	۲۹۱	۳۲۵	T2-40
		۰/۵			۲۱۷	۲۳۵	۲۷۱	۳۰۵	T2-50
۲	پوزولانی اردبیل	۰/۴	–	–	۱۲۰	۱۳۱	۱۸۵	۲۳۱	P-40
		۰/۵			۱۰۲	۱۱۴	۱۶۵	۲۱۵	P-50
۳	پوزولانی اردبیل	۰/۴	میکروسیلیس	٪۵	۱۱۵	۱۲۸	۱۸۱	۲۲۷	PM5-40
		۰/۵			۹۸	۱۰۹	۱۵۸	۲۱۰	PM5-50
۴	پوزولانی اردبیل	۰/۴	میکروسیلیس	٪۸	۱۲۶	۱۳۹	۱۹۹	۲۵۹	PM8-40
		۰/۵			۱۱۲	۱۲۵	۱۸۰	۲۳۹	PM8-50
۵	پوزولانی اردبیل	۰/۴	میکروسیلیس	٪۱۱	۱۳۵	۱۵۲	۲۱۳	۲۸۵	PM11-40
		۰/۵			۱۱۹	۱۳۱	۱۹۱	۲۵۸	PM11-50
۶	پوزولانی اردبیل	۰/۴	خاکستر بادی	٪۵	۱۰۹	۱۳۲	۱۹۱	۲۳۹	PF5-40
		۰/۵			۹۱	۱۱۳	۱۶۹	۲۲۱	PF5-50
۷	پوزولانی اردبیل	۰/۴	خاکستر بادی	٪۸	۱۱۸	۱۳۷	۲۰۱	۲۴۸	PF8-40
		۰/۵			۹۲	۱۱۵	۱۷۸	۲۳۰	PF8-50
		۰/۵			۹۸	۱۰۸	۱۷۱	۲۱۱	PPS-50

ادامه جدول ۷:

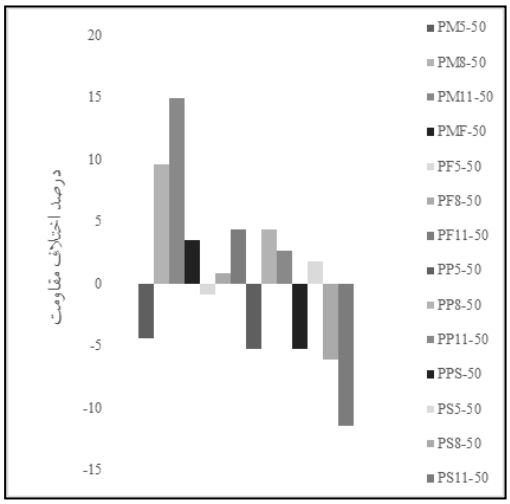
ردیف	نوع سیمان مصرفی	W/C	نوع افزودنی	درصد جایگزینی	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۱۱ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۴۲ روزه (Kg/cm^2)	نام اختصاری طرح اختلاط
۸	پوزولانی اردبیل	۰/۴	خاکستر بادی	٪۱۱	۱۲۴	۱۴۱	۲۱۲	۲۶۴	PF11-40
		۰/۵			۹۴	۱۱۹	۱۸۹	۲۴۵	PF11-50
۹	پوزولانی اردبیل	۰/۴	پودر سنگ	٪۵	۱۲۱	۱۳۵	۱۹۱	۲۴۲	PP5-40
		۰/۵			۱۰۰	۱۱۷	۱۶۹	۲۲۱	PP5-50
۱۰	پوزولانی اردبیل	۰/۴	پودر سنگ	٪۸	۱۱۹	۱۳۷	۱۹۹	۲۴۱	PP8-40
		۰/۵			۱۰۱	۱۱۹	۱۸۱	۲۲۵	PP8-50
۱۱	پوزولانی اردبیل	۰/۴	پودر سنگ	٪۱۱	۱۱۵	۱۳۷	۲۰۹	۲۴۸	PP11-40
		۰/۵			۹۸	۱۱۷	۱۹۵	۲۳۴	PP11-50
۱۲	پوزولانی اردبیل	۰/۴	نرمه ماسه	٪۵	۱۱۹	۱۲۹	۱۸۹	۲۲۱	PS5-40
		۰/۵			۱۰۳	۱۱۶	۱۶۱	۲۱۰	PS5-50
۱۳	پوزولانی اردبیل	۰/۴	نرمه ماسه	٪۸	۱۱۵	۱۲۱	۱۷۹	۲۱۷	PS8-40
		۰/۵			۹۹	۱۰۷	۱۵۰	۲۰۱	PS8-50
۱۴	پوزولانی اردبیل	۰/۴	نرمه ماسه	٪۱۱	۱۰۹	۱۱۹	۱۵۸	۲۱۱	PS11-40
		۰/۵			۹۵	۱۰۱	۱۳۷	۱۸۶	PS11-50
۱۵	پوزولانی اردبیل	۰/۴	میکروسیلیس و خاکستر بادی	٪۸ و ٪۸	۱۳۷	۱۴۹	۲۱۱	۲۸۱	PMF-40
		۰/۵			۱۰۹	۱۱۸	۱۷۱	۲۲۵	PMF-50
۱۶	پوزولانی اردبیل	۰/۴	پودر سنگ و نرمه ماسه	٪۸ و ٪۸	۱۱۱	۱۲۲	۱۹۰	۲۲۹	PPS-40
		۰/۵			۹۸	۱۰۸	۱۷۱	۲۱۱	PPS-50



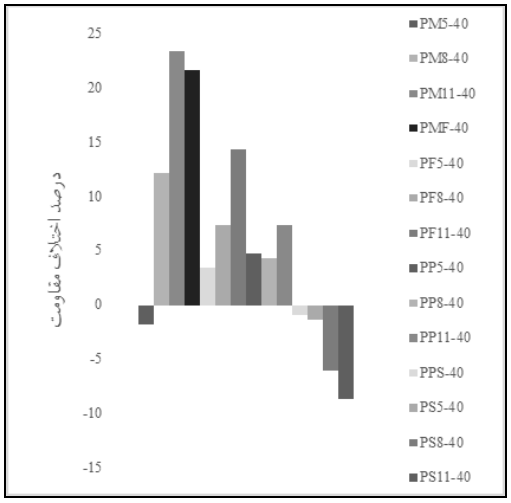
شکل۸: نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی بر حسب روز برای طرح اختلاط‌های T2-40، P-40، T2-50 و P-50



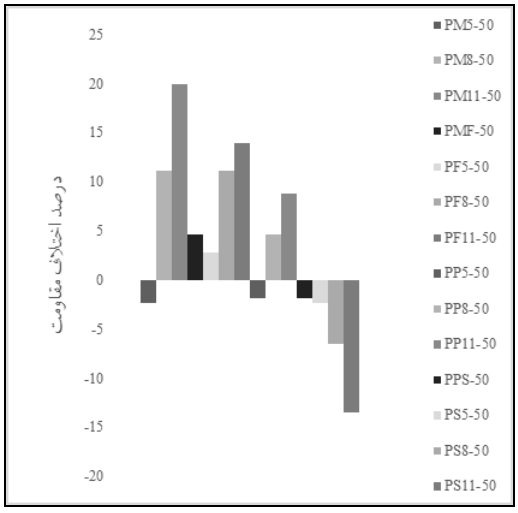
شکل ۹: درصد اختلاف مقاومت ۱۱ روزه نمونه‌های مختلف با نمونه شاهد P-40



شکل ۱۰: درصد اختلاف مقاومت ۱۱ روزه نمونه‌های مختلف با نمونه شاهد P-50

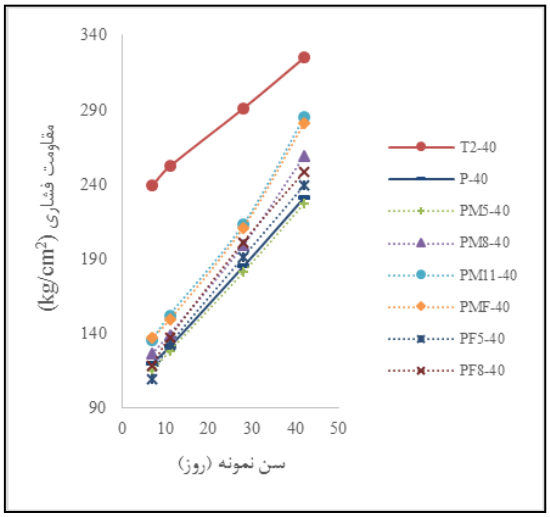


شکل ۱۱: درصد اختلاف مقاومت ۴۲ روزه نمونه‌های مختلف با نمونه شاهد P-40



شکل ۱۲: درصد اختلاف مقاومت ۴۲ روزه نمونه‌های مختلف با نمونه شاهد P-50

همان‌طور که از نتایج جدول ۷ پیداست حتی اضافه کردن ۴ افزودنی پیشنهادی در این پژوهش نیز نمی‌تواند مقاومت فشاری بتن ساخته شده از سیمان پوزولانی اردبیل را به حد بتن‌های ساخته شده از سیمان تیپ ۲ صوفیان برساند، ولی مقاومت آن را به منظور استفاده در پروژه‌های آبیاری و زهکشی تا حد قابل قبولی بهبود داده است. با در نظر گرفتن و مقایسه تمامی طرح‌های اختلاط و طرح اختلاط پایه بتن با سیمان اردبیل با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و انتخاب مقادیر حداکثری برای سنین مختلف بتن، جایگزینی ۱۱ درصدی میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت ۱۱، ۲۸ و ۴۲ روزه بتن به ترتیب به اندازه ۱۶، ۱۵ و ۲۳ درصد می شود. در این حالت برای سن کم بتن، جایگزینی ۸ درصدی میکروسیلیس و ۸ درصدی خاکستر باعث افزایش مقاومت ۷ روزه بتن به اندازه ۱۴ درصد شده است (شکل ۱۳).

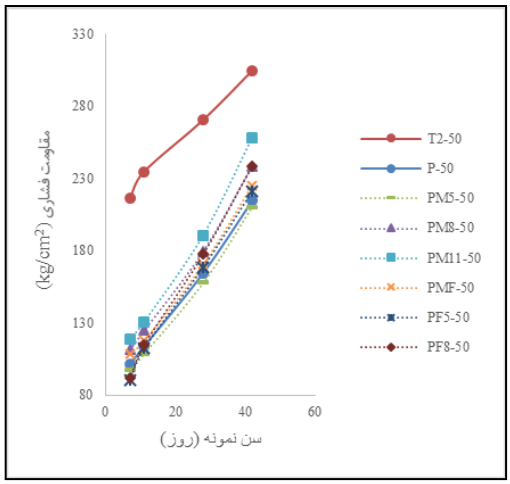


شکل ۱۳: نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی بر حسب روز برای طرح اختلاط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴

در حالتی دیگر با در نظر گرفتن طرح اختلاط پایه بتن در مقایسه با سیمان پوزولانی اردبیل با نسبت آب به سیمان ۰/۵، جایگزینی ۱۱ درصدی میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت ۷، ۱۱ و ۴۲ روزه بتن به ترتیب به اندازه ۱۷، ۱۵ و ۲۰ درصد شده و در مورد بتن با سن ۲۸ روز جایگزینی ۱۱ درصدی پودر سنگ باعث افزایش مقاومت بتن به اندازه ۱۸ درصد می‌شود (شکل ۱۴).

بنابراین ملاحظه می‌گردد که دو عامل کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش سنین عمل‌آوری منجر به افزایش اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاصل از سیمان پوزولانی و نمونه‌های بتنی بهسازی شده، می‌گردد.

بایستی اضافه نمود که در بهترین حالت نمونه‌های مورد آزمایش با سیمان پوزولانی اردبیل با نسبت آب به سیمان ۰/۴، در صورت بهسازی با ترکیب‌های متفاوت و در نظر گرفتن سنین ۷، ۱۱، ۲۸ و ۴۲ روزه بتن، به ترتیب ۴۳، ۴۰، ۲۷ و ۱۲ درصد و نمونه های مورد آزمایش با نسبت آب به سیمان ۰/۵، به ترتیب ۴۵، ۴۴، ۲۸ و ۱۵ درصد ضعیفتر از نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان تیپ ۲ صوفیان با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ عمل کرده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش سنین عمل‌آوری، اختلاف بین مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده و بتن حاصل از سیمان تیپ ۲ صوفیان رو به کاهش می‌گذارد. پر واضح است که بتن‌های حاصل از سیمان پوزولانی همواره به مدت زمان بیشتری جهت عمل‌آوری نیاز دارند، حال آن که نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که استفاده از افزودنی‌های مذکور، علاوه بر تسریع رشد مقاومت بتن حاصل از سیمان پوزولانی، مقاومت نهایی بتن مذکور را نیز تا حد قابل قبولی ارتقا می‌دهد. به عبارتی دیگر، مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴، شیب نمودار رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها به شدت افزایش می‌یابند.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی بر حسب روز برای طرح اختلاط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵

۴- نتیجه گیری

همانگونه که از بررسی نتایج استنتاج می‌شود، کاربرد سیمان پوزولانی کارخانه سیمان اردبیل بدون استفاده از افزودنی نمی‌تواند در ساخت بتن‌های با مقاومت قابل قبول برای بتن‌ریزی سازه‌های آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار بگیرد. اما ثابت گردید که توسط جایگزینی افزودنی‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر، سیمان پوزولانی اردبیل با قابلیت اطمینان می‌تواند در پروژه‌های استانی مورد استفاده قرار گرفته و مقاومت مورد نیاز را تامین نماید.

در پژوهش حاضر نشان داده شد، جایگزینی جزئی (زیر ۱۶ درصدی) افزودنی‌هایی مانند میکروسیلس در سیمان می‌تواند تاثیر مطلوبی بر مقاومت فشاری بتن بگذارد؛ از این نکته می‌توان در مواردی که سیمان منطقه‌ای مقاومت مطلوب در پروژهای حجیم بتن‌ریزی مانند سدسازی را فراهم نمی‌کند و حمل سیمان از مناطق دیگر هزینه زیادی را به پروژه تحمیل می‌نماید، بهره جست و امکان‌سنجی جایگزینی افزودنی‌ها به سیمان مناطق دیگر به عنوان راه حل افزایش مقاومت، تا اندازه‌ای که توجیه اقتصادی دارد را نیز بررسی کرد. در ادامه نتایج حاصل از این مطالعه جامع به شرح ذیل و به صورت موردی بیان می‌گردد.

- مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه صوفیان بسیار بیشتر از نمونه‌های مشابه با سیمان پرتلند پوزولانی اردبیل می‌باشد و با کاهش نسبت آب به سیمان این روند تغییر چندانی نمی‌کند.

- خاکستر بادی در دراز مدت مقاومت را افزایش می‌دهد در حالی که منجر به کاهش مقاومت در روزهای ابتدایی می‌گردد. با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی، در سنین اول عمل‌آوری تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته، اما در بلند مدت منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد.

- میکروسیلیس برای ۵٪ جایگزینی و برای هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴ مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد ولی برای ۸ و ۱۱٪ جایگزینی منجر به افزایش مقاومت می‌شود که این افزایش برای ۱۱٪ جایگزینی چشمگیرتر است. لازم به ذکر است با افزایش سنین عمل‌آوری، مقاومت فشاری با درصد جایگزینی بیشتر، افزایش مقاومت بزرگتری را تجربه می‌کند.

- پودر سنگ در روزهای ابتدایی هیچ تاثیری بر مقاومت فشاری نداشته (نه افزایش و نه کاهش) ولی در دراز مدت منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌گردد که البته این افزایش در مقایسه با میکروسیلیس کوچکتر است. البته بایستی توجه گردد که این افزایش مقاومت، با افزایش بیشتر درصد جایگزینی پودر سنگ با سیمان پوزولانی، کوچکتر می‌گردد.

- نرمه ماسه باعث کاهش جزئی مقاومت فشاری می‌گردد و هرچه درصد جایگزینی بیشتر می‌شود، کاهش مقاومت نیز بیشتر می‌گردد. از این رو، نرمه ماسه در سیمان‌های با کیفیت می‌تواند نقش کاهنده میزان مصرف سیمان را داشته باشد که این امر منجر به صرفه اقتصادی و رعایت ملاحظات زیست محیطی می‌گردد.

مراجع

[1] Mousavi, N. (2011). Factors affecting the strength and durability of concrete. *Concrete technology magazine*, 45, 1-6 (in Persian).

[2] Silva, E. J. N. L., Carvalho, N. K., Prado, M. C., Zanon, M., Senna, P. M., Souza, E. M., & De-Deus, G. (2016). Push-out Bond Strength of Injectable Pozzolan-based Root Canal Sealer. *Journal of endodontics*, 42(11), 1656-1659.

[3] Yazdan Doust, M. and Yazdani, M. (2014). Experimental Study on Combined effects of microsilica weighted ratio content, fineness modulus of aggregates and water-cement ratio on mechanical and physical properties of concrete. *Modares Civil Engineering Journal*. 14 (52):183-195 (in Persian).

[4] Perry, C. and Gillott, J. E. (1995) .The influence of silica fume on the strength of the cement-aggregate bond. *Special Publication*. 156, 191-212.

[5] Neville, A. (1997). Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. *Materials Journal*. 94(1), 71-74.

[6] Soriano, L., Monzó, J., Bonilla, M., Tashima, M. M., Payá, J., & Borrachero, M. V. (2013). Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 42, 41-48.

[7] Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S., & Monteiro, P. J. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and Concrete Composites*, 53, 97-104.

[8] Grist, E. R., Paine, K. A., Heath, A., Norman, J., & Pinder, H. (2015). Structural and durability properties of hydraulic lime–pozzolan concretes. *Cement and Concrete Composites*, 62, 212-223.

[9] Robayo-Salazar, R. A., Mejia, R. and Puertas, F. 2016. Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*. 132, 491-497.

[10] Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., & Zain, M. F. M. (2016). Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. *Construction and Building Materials*, 116, 128-140.

[11] Scrivener, K. L., Bentur, A. and Pratt P. L. (1988). Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes. *Advances in Cement Research*, 1(4), 230-237.

[12] Mazloum, M. RamazanianPour, A. (2015). *Strong concrete and its application*. Tehran: Shahid Rajaee Teacher Training University Press (in Persian).

[13] Detwiler, R. J., Bhatty J. I. and Battacharja, S. (1996). *Supplementary cementing materials for use in blended cements.* No. R&D Bulletin RD112T.

[14] Kjellsen, K. O., Wallevik, O. H. and Hallgren, M. (1999). On the compressive strength development of high-performance concrete and paste—effect of silica fume. *Materials and Structures*. 32(1), 63-69.

[15] Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, F. R., Seta, L., & Zinno, R. (2014). Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume. *Cement and Concrete Research*, 63, 38-45.

[16] Rossen, J. E., Lothenbach. B. and Scrivener, K. L. (2015). Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition. *Cement and Concrete Research*. 75, 14-22.

[17] Zheng, D. D., Ji, T., Wang, C. Q., Sun, C. J., Lin, X. J., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of the combination of fly ash and silica fume on water resistance of Magnesium–Potassium Phosphate Cement. *Construction and Building Materials*, 106, 415-421.
[18] Ghrici, M., Kenai, S. and Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*. 29(7), 542-549.
[19] Nili, M. and Salehi, A. (2010). Strength Development and Absorption of High Strength Concertes Incorporating Natural Pozzolan, Fly Ash and Silica Fume. *Modares Civil Engineering Journal*. 10(4), 71-83 (in Persian).
[20] Sangi, M., Navayi Neya, B. and Hoseynali Beygi, M. (2014). Influence of Silica Fume on the Long-Term Behavior of Self Compacting Concrete. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 43(71),83-94 (in Persian).
[21] Cabrera, J. G. and Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites.* 12(3), 157-161.
[22] Haque, M. N. (1996). Strength development and drying shrinkage of high-strength concretes. *Cement and concrete Composites.* 18(5), 333-342.
[23] Bürge, T. A. (1982*). Densified cement matrix improves bond with reinforcing steel*. Bond in Concrete, London: Applied Science Publishers. 273-281.
[24] Selvamony, C., Ravikumar, M. S., & Kannan, S. U. (2010). Investigations on self-compacted self-curing concrete using limestone powder and clinkers. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 5(3).
[25] Turk, K., Turgut, P., Karatas, M., & Benli, A. (2010). Mechanical Properties of Selfcompacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash. In: *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, 27-30.
[26] Atan, M. N. and Awang, H. (2011). Mechanical Properties of Self-Concrete Incorporating Raw Rice Husk Ash. *European Journal of Scientific Research*. 60, 166-176.
[27] Domone, P. L. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites.* 29(1), 1-12.
[28] Felekoğlu, B., Türkel. S. and Baradan. B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment.* 42(4), 1795-1802.
[29] Hubertova, M. and Hela. R. (2007). The effect of metakaolin and silica fume on the properties of lightweight self consolidating concrete. *Special Publication*, 243, 35-48.
[30] Maghsoudi, A., Moghimi, R. and Alamdari Baghini, A. (2011). Effects of silica fume on plastic phase and compressive strength of self-consolidating concrete and lightweight concrete. In*: 3rd annually national conference of concrete.* Tehran, Iran (in Persian).
[31] RamazanianPour, A. and Shahnazari, M. (2010). *Concrete technology*, 5th edition. Tehran, Iran: Iran University of Science and Technology Press (in Persian).
[32] EFNARC. (2005) The European Guideline for self-compacting concrete specification, Production and Use, EFNARC, UK.
[33] Wenzhong, Z. and Gibbs, J.C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*. 35(8), 1457-1462.
[34] Monteiro, P. J. M., Gjorv, O. E. and Povindar, K. M. (1985). Microstructure of the steel-cement paste interface in the presence of chloride. *Cement and Concrete Research*. 15(5), 781-784.
[35] Tehran Urban Planning and Research Center (TUPRC). (2015*). Application of self-consolidating concrete on urban projects of civil engineering*. (in Persian).
[36] Uchikawa, H. and Uchida, S. (1980). Influence of pozzolana on the hydration of C3A.In: *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Sub-Theme IV*. Paris, France.
[37] Jawed, I. and Skanly, J. (1981). *Effect of fly ash incorporation in cement and concrete*. MRS Symposium Proceedings.
[38] Nili, M. and Salehi, A. (2011). What type of pozzolan and to what extent to applied in massive high resistance concretes. *Civil Engineering Infrastructures.* 45 (2), 247-256 (in Persian).
[39] Engineering and construction deputy of ministry of oil. (2005). *Guide to construction of a specific concrete for oil industry.* Issue Number 24. (in Persian).
[40] Ministry of road and urban development. (2013). *Office of the National Building Regulations, Chapter of Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings*. Tehran, Iran: Iran development press. (in Persian).
[41] American Concrete Institution. (1991). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete*, ACI 211.1-91.