

بررسی تأثیر جایگزینی پومیس و میکروسیلیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، ضریب انتقال حرارتی و درصد جذب آب

علیرضا ماهوش^۱، داود مستوفی نژاد^{۲*}، علیرضا سلجوقیان^۳

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، alireza_m1997@yahoo.com

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، dmostofi@cc.iut.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، a.saljoughian@iut.ac.com

چکیده فارسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات اقلیمی گسترده، به منظور تأمین دمای آسایش بشر، مصرف انرژی در سراسر جهان افزایش یافته است؛ به طوری که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی مربوط به بخش ساختمان می‌باشد. بنابراین محققین این حوزه، به منظور کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در بتن را پیشنهاد داده‌اند. تاکنون، محققین از انواع گوناگون مواد تغییر فاز دهنده به همراه مواد افزودنی خاص در طرح اختلاط بتن استفاده کرده‌اند. برای دستیابی به اهداف این پژوهش که رسیدن به بتنی با عملکرد حرارتی مناسب می‌باشد، از پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ به میزان جایگزینی ۱۰ درصد ماسه در بتن مورد نظر استفاده شد. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش شامل آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 200×100 میلی‌متر، آزمایش مقاومت خمشی با نمونه‌های منشوری با ابعاد $350 \times 100 \times 100$ میلی‌متر و همچنین آزمایش ضریب انتقال حرارتی و آزمایش درصد جذب آب روی نمونه‌هایی با ابعاد 150×75 میلی‌متر می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که جایگزینی ۱۰ درصد پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در نمونه‌های بتنی، منجر به کاهش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، وزن مخصوص بتن، ضریب انتقال حرارتی و همچنین افزایش در صد جذب آب به ترتیب به میزان ۳۵، ۳۷، ۴، ۴۴ و ۱۶ درصد نسبت به نمونه مینا می‌شود.

واژگان کلیدی

بتن، ماده تغییر فاز دهنده، پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰، پومیس، میکروسیلیس، ضریب انتقال حرارتی.

Investigating the effect of replacing pumice and micro-silica containing polyethylene glycol 1000 on compressive strength, bending strength, heat transfer coefficient and water absorption percentage

Alireza Mahvash^a, Davood Mostofinejad^{b*}, Alireza Saljoughian^c

^a Master Student, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, alireza_m1997@yahoo.com

^b Professor of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, dmostofi@cc.iut.ac.ir

^c Assistant Professor of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, a.saljoughian@iut.ac.com

Abstract

In recent decades, due to extensive climate changes, in order to provide human comfort temperature, energy consumption has increased all over the world; So that a significant part of energy consumption is related to the building sector. Therefore, the researchers of this field have suggested the use of phase change materials in concrete in order to reduce energy consumption in the building sector. Until now, researchers have used various types of phase change materials along with special additives in concrete mixing design. In order to achieve the goals of this research, which is to achieve concrete with suitable thermal performance, pumice containing polyethylene glycol 1000 was used to replace 10% of sand in the desired concrete. The tests performed in this research include compressive strength tests on cylindrical samples with dimensions of 100x200 mm, bending strength tests with prismatic samples with dimensions of 100x100x350 mm and also testing the coefficient Thermal transfer and water absorption percentage test on samples with dimensions of 75 x 150 mm. The laboratory results showed that the replacement of 10% pumice containing polyethylene glycol 1000 in concrete samples led to a decrease in compressive strength, bending strength, specific weight of concrete, heat transfer coefficient and also an increase in water absorption percentage respectively by 35, 37, 4, 44 and 16 percent compared to the base sample.

Article history:

Received: 07/02/2024

Revised: 02/03/2024

Accepted: 18/04/2024

Keywords

Keywords: concrete, phase change material, polyethylene glycol 1000, pumice, micro silica, heat transfer coefficient.

۱. مقدمه

امروزه پیشرفت جوامع در سراسر جهان همراه با افزایش جمعیت، رشد سریع اقتصادی و گسترش تکنولوژی، باعث افزایش سریع تقاضای انرژی شده است. این امر به مرور باعث پایان سوخت‌های فسیلی و همچنین نگرانی زیاد نسبت به تأمین انرژی در عصر حاضر می‌شود [۱]. از این رو گرایش نسبت به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک نسبت به گذشته افزایش یافته است. بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها باعث کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن کاهش چشم‌گیر انتشار گازهای گل‌خانه‌ای خواهد شد. در سال‌های اخیر مصرف انرژی بسیار بالا رفته است؛ به طوری که یک سوم مصرف جهانی و ۴۰ درصد کل استفاده از انرژی اولیه در بخش ساختمان است [۲-۴]. از این رو امروزه مدیریت انرژی در بخش ساختمان از موضوعات بسیار مهم می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از سوخت‌های فسیلی به طور مستقیم سبب افزایش تولید گازهای کربن دی‌اکسید و دیگر گازهای مضر می‌شود که باعث تشدید آسیب به سلامت انسان، آلودگی و تغییرات آب و هوا و نیز اثرات زیست‌محیطی مثل گرمایش جهانی می‌گردد؛ از این رو مسائل زیست‌محیطی عامل تشویق دانشمندان و مهندسان برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است [۵].

روش‌های زیادی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در حوزه ساختمان وجود دارد. یکی از جدیدترین روش‌ها به کار بردن مواد تغییر فاز دهنده^۱ در ساخت مصالح و عناصر ساختمانی است [۶]. مواد تغییر فاز دهنده دارای گرمای نهان زیادی هستند. این مواد هنگام رسیدن دمای محیط به دمای ذوب خود، انرژی گرمایی را در خود ذخیره می‌کنند و در پی آن به حالت مایع تبدیل می‌شوند. همچنین هنگام رسیدن دمای محیط به دمای انجماد خود، انرژی خود را آزاد می‌کنند و در ضمن آن به حالت جامد تبدیل می‌شوند [۶-۷]. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل ظرفیت جذب انرژی که از محیط اطراف خود باعث کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در ساعات اوج مصرف می‌شوند [۸]. این مواد در سه نوع ارگانیک^۲، غیرارگانیک^۳ و یوتکتیک^۴ تقسیم می‌شوند. گروه ارگانیک شامل پلی‌اتیلن - گلیکول، گروه غیرارگانیک شامل هیدرات نمک و گروه یوتکتیک نیز دارای ترکیبی از گروه ارگانیک و غیرارگانیک است [۹]. انتقال گرما یک کمیت برداری است که به سه روش رسانش، همرفت و تابش بین اجسام و محیط منتقل می‌شود [۱۰]. انتقال گرما به روش رسانش در اجسام جامد ترکیبی از انتقال انرژی توسط الکترون‌ها و ارتعاش مولکولی می‌باشد [۱۱]. بنابراین با کاهش و کنترل ضریب انتقال حرارتی در بتن، می‌توان بخشی از اتلاف انرژی در ساختمان را کاهش داد. در این بخش علاوه بر معرفی نویسنده، به طور مختصر به موضوع تحقیق و بیان نتیجه تحقیق آنها نیز پرداخته می‌شود.

جدول ۱. نمونه جدول

نام نویسنده و سال انتشار	عنوان مقاله	شرح نتایج
ژو و همکاران در سال ۲۰۱۰	ویژگی‌های حرارتی پانل گچی حاوی مواد تغییر فاز دهنده به شکل پایدار را به صورت عددی بررسی کردند.	پانل دیواری ویژگی‌های متمایزی نسبت به سایر مصالح ساختمانی معمولی دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که دمای ذوب یکی از عوامل مهمی است که بر زمان نگهداری انتقال فاز و عامل کاهش تأثیر می‌گذارد. همچنین برای یک موج دمای خارجی خاص، مقادیر حیاتی برای گرمای نهان هم‌جوشی و ضخامت وجود دارد که بالاتر از آن، زمان نگرداشتن انتقال فاز یا عامل کاهش به سختی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به طوری که ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده و ضریب همرفت سطح داخلی تأثیر کمی در انتقال فاز دارد [۱۲].
ممون و همکاران در سال ۲۰۱۵	خواص حرارتی و مکانیکی بتن حاوی مواد تغییر فاز دهنده به صورت ماکروکپسول بررسی کردند.	مقاومت فشاری نمونه‌های ماکروکپسول از نمونه‌های شاهد بیشتر می‌شود. همچنین بتن‌های حاوی ماکروکپسول و مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش دمای داخلی، کاهش نوسانات دمایی و نیز کاهش جابه‌جایی گرمایی در ساعات اوج مصرف می‌شود که در نهایت کاهش مصرف انرژی

۱. Phase Change Material (PCM)

۲. Organic

۳. Inorganic

۴. Eutectic

نام نویسنده و سال انتشار	عنوان مقاله	شرح نتایج
مین و همکاران در سال ۲۰۱۷	به ارزیابی رفتار حرارتی و مکانیکی بتن مخلوط با مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار به منظور به کار بردن مخلوط بتن با مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار برای اعضای سازه پرداختند.	با افزایش مقدار مواد تغییر فاز دهنده پایدار شده، رسانایی گرمایی کاهش می‌یابد و گرمای ویژه با افزایش مواد تغییر فاز دهنده پایدار شده افزایش می‌یابد. با توجه به خواص مکانیکی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن با مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار کاهش می‌یابد. میزان کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به‌طور خطی متناسب با نسبت مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار به بتن می‌باشد. زمانی که نمونه‌ها در معرض دمای بالاتر از نقطه ذوب مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار قرار بگیرند، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. با این حال، هنگامی که نمونه‌های گرم شده با دمای اتاق خنک می‌شوند، بهبود کامل مقاومت کاهش یافته نیز مشاهده می‌شود [۱۴].
حطان و همکاران در سال ۲۰۲۰	رفتار مکانیکی و حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به صورت پایدار را به‌عنوان جزئی از سیستم ذخیره انرژی حرارتی در دیوار معمولی ساختمان‌ها در ایران را بررسی کردند.	مواد تغییر فاز دهنده پایدار شده مورد بررسی، باعث کاهش دما در اوج مصرف و همچنین کاهش نوسانات دما در محیط داخلی و افزایش ذخیره انرژی حرارتی در دیوار خارجی می‌شود [۱۵].

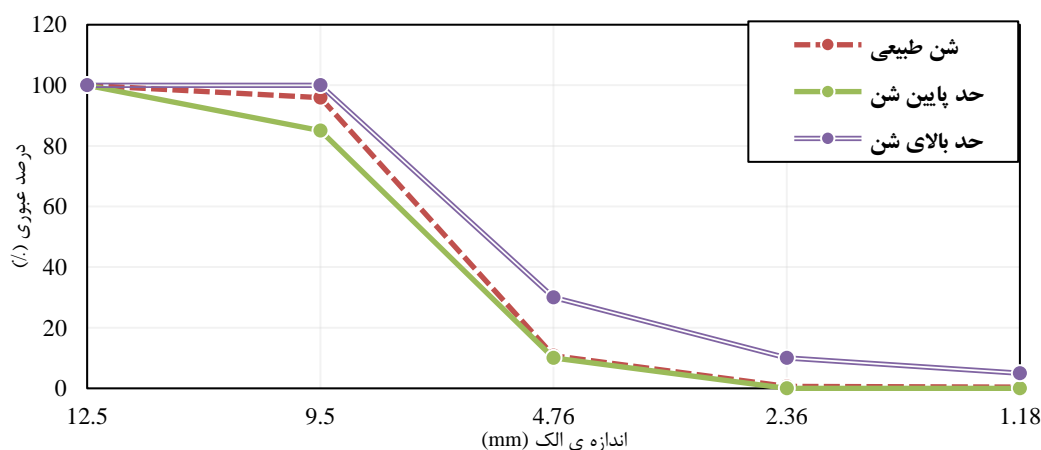
با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده روی رفتار بتن حاوی مواد تغییر فاز دهنده، استفاده از مصالح نوین به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده و نیز جایگزینی سنگ دانه با مصالحی همچون پومیس و میکروسیلیس می‌توان سبب بهبود عملکرد حرارتی بتن دارای مواد تغییر فاز دهنده شد. از این رو در پژوهش حاضر، پومیس و میکروسیلیس حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده به میزان ۱۰ درصد جایگزین ماسه در بتن شده است. برای بررسی رفتار بتن حاصله نیز آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، وزن مخصوص بتن تازه، ضریب انتقال حرارتی و درصد جذب آب انجام شده است.

۲. روش‌ها

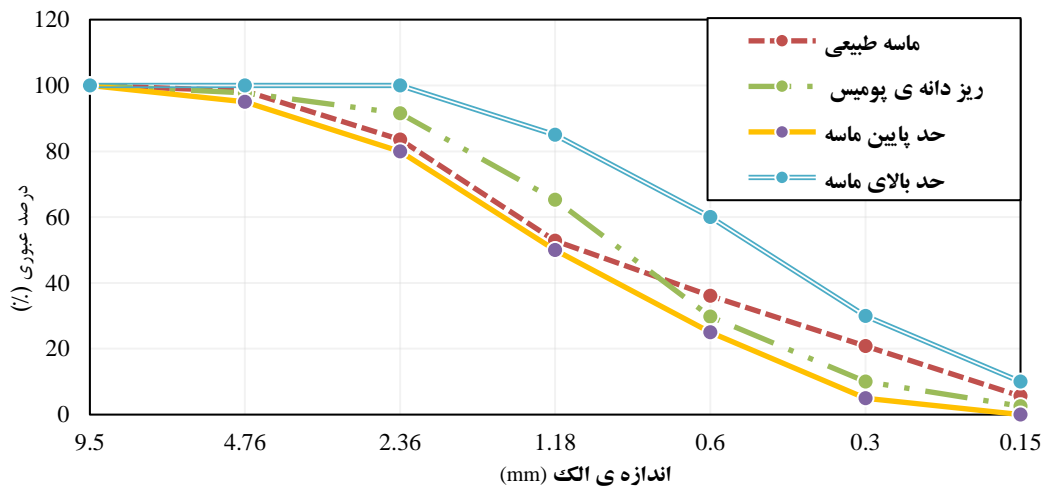
در این بخش، مصالح مصرفی، طرح اختلاط بتن، نحوه ساخت نمونه‌ها و همچنین نحوه عمل‌آوری آنها ارائه شده است.

۲-۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش، نمونه‌های بتنی با استفاده از سیمان اردستان نوع II، سبک دانه پومیس، میکروسیلیس، پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰، سنگ دانه طبیعی، آب و فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات ساخته شد. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های استفاده شده در این پژوهش که بر اساس آزمایش‌های انجام شده توسط محققین به دست آمده است، در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه، ریزدانه و پومیس مورد استفاده در این پژوهش طبق استاندارد ASTM C33 [۱۶] در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی درشت دانه استفاده شده در این پژوهش



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ریزدانه استفاده شده در این پژوهش

جدول ۱. مشخصات سنگ‌دانه‌های استفاده شده در این پژوهش

مشخصات مصالح	وزن مخصوص	چگالی (kg/m^3)	رطوبت با سطح خشک (%)
شن طبیعی	۲/۶	۱۶۹۰	۰/۴۹
ماسه طبیعی	۲/۵۵	۱۸۱۱	۱/۲۱
ماسه پومیس	۱/۱۱	۶۴۰	۱۸/۰۰

۲-۲. طرح اختلاط نمونه‌ها و نحوه عمل‌آوری آنها

به منظور رسیدن به اهداف این پژوهش، مطابق جدول ۲ از دو طرح اختلاط برای ساخت بتن استفاده شد. در این دو طرح اختلاط، اسلالمپ بتن در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر ثابت نگاه‌داشته شده است. طرح مبنای بتن این پژوهش با استفاده از آزمایشات اولیه و فرایند سعی و خطا به دست آمد. در ساخت بتن مبنای میزان سیمان، درشت‌دانه، ریزدانه و آب مورد استفاده به ترتیب برابر با ۳۴۰، ۸۱۰، ۹۱۸ و ۲۲۱ کیلوگرم می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل ساخت، ریختن بتن در قالب و عمل‌آوری بر اساس استاندارد ASTM C192-02 [۱۷] بوده است.

جدول ۲. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده (kg/m^3)

شماره	نام طرح اختلاط	سیمان	آب	درشت دانه طبیعی	ریزدانه طبیعی	ریزدانه پومیس	میکروسیلیس	پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	فوق روان‌کننده
۱	Reference	۳۴۰	۲۲۱	۸۱۰	۹۱۸	-	-	-	۰/۵۱
۲	M1-R10F-PE	۳۰۵	۱۸۶	۷۶۹	۷۸۴	۸۷	۱۸	۳۵	-

۳-۲. نحوه ساخت نمونه‌ها

برای ساخت تمامی طرح اختلاط‌های بتن در این پژوهش، پس از آماده‌سازی کلیه مصالح، از دستگاه مخلوط‌کن برای ترکیب آنها با هم استفاده شده است. سپس مصالح ترکیب شده، در قالب‌های فلزی استوانه‌ای در ابعاد $۲۰۰ \times ۱۰۰ \times ۲۰۰$ میلی‌متر و $۱۵۰ \times ۷۵ \times ۱۵۰$ میلی‌متر و نیز نمونه‌های منشوری به ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۳۵۰$ میلی‌متر ریخته شد. در نهایت پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب نگهداری گردید.

۳. روش تحقیق

در این پژوهش آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی به صورت زیر انجام می‌شود.

۳-۱. آزمایش مقاومت فشاری

بر اساس استاندارد CI 318-14 [۱۸]، مقاومت فشاری بتن با استفاده از میانگین گیری مقاومت سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر به دست می‌آید. به منظور جلوگیری از تمرکز تنش در نمونه‌ها در حین بارگذاری، نمونه‌ها با استفاده از گچ دندان پزشکی کلاهی گذاری شد.



(ب)



(الف)

شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری؛ (الف) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری؛ (ب) نمونه‌های کلاهی گذاری شده با گچ دندان پزشکی

برای مشخص شدن مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از دستگاه نشان داده شده در شکل ۳ استفاده می‌شود. دستگاه مذکور ساخت شرکت آزمون‌ساز مبنا دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و دقت ۱ کیلو نیوتن است. سرعت اعمال نیرو را می‌توان حدود ۰/۲۵ مگاپاسکال در ثانیه تنظیم کرد و بعد از قرارگیری نمونه استوانه‌ای درون دستگاه، فک پایینی دستگاه به سمت بالا حرکت می‌کند.

۳-۲. آزمایش مقاومت خمشی

جهت اندازه‌گیری مقاومت خمشی، بر اساس استاندارد ASTM C78 [۱۹]، نمونه‌های منشوری به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌های بتنی ساخته شده بعد از ۲۸ روز از حوضچه آب خارج شد. سپس روی دو تکیه‌گاه مفصلی قرار گرفته و به صورت چهار نقطه‌ای، مطابق شکل ۴، تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۳-۳. آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه

برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه بر اساس استاندارد ASTM C138 [۲۰]، از ظرف ۵/۵ لیتری استفاده می‌شود. ابتدا برای تعیین حجم دقیق کل ظرف، وزن ظرف پر شده با آب مقطر اندازه‌گیری می‌شود. سپس بر اساس اطلاعات موجود در آزمایشگاه همچون وزن آب داخل ظرف و دمای آب مقطر، با استفاده از روابط در استاندارد مربوطه، حجم دقیق ظرف به دست می‌آید.

در مرحله دوم، بتن تازه در سه لایه در ظرف مذکور ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم می‌شود. پس از تراکم هر لایه با میلۀ فلزی، با استفاده از چکش پلاستیکی ۱۰ تا ۱۵ ضربه به بدنه ظرف زده شده تا هوای محبوس شده بتن در کناره‌های قالب خارج شود. در پایان سطح بتن کاملاً صاف شده و ظرف پر شده با بتن وزن می‌شود. وزن مخصوص بتن با توجه به وزن و حجم ظرف همچنین حجم و وزن بتن محاسبه می‌شود.



شکل ۴. آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

۳-۴. آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارتی

ضریب انتقال حرارتی بتن، یکی از مهم‌ترین خصوصیات آن می‌باشد. بر این اساس، هنگامی مصرف انرژی در ساختمان کاهش می‌یابد که بتنی با ضریب انتقال حرارتی کم و متوسط به کار رود. ضریب انتقال حرارتی با K نمایش داده شده و بیان‌گر مقدار گرمایی است که در دمایی معین از واحد ضخامت ماده، در واحد زمان عبور می‌کند. برای محاسبه ضریب انتقال حرارتی روش‌های متنوعی موجود است. در این پژوهش برای به دست آوردن این ضریب از دستگاه KD2 Pro واقع در آزمایشگاه ترمودینامیک دانشکده مهندسی مکانیک مطابق شکل ۵ استفاده شده است.



شکل ۵. آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارتی

با توجه به جنس نمونه، حالت فیزیکی ماده مورد آزمایش و دستورالعمل دستگاه، از سنسور TR-1 استفاده شد. طول و قطر این سنسور به ترتیب ۱۰۰ و ۲/۴ میلی‌متر بوده و توانایی محاسبه ضریب انتقال حرارتی در بازه 0.1 W/mK تا 4 W/mK را دارد. به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارتی، بر اساس پیشنهاد شرکت سازنده در دستورالعمل دستگاه و همچنین استانداردهای ASTM D5334-08 [۲۱] و ACI 122R-02 [۲۲]، فضای اطراف سنسور تا شعاع ۱۵ میلی‌متری بایستی از یک جنس باشد.

۳-۵. آزمایش درصد جذب آب

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C642 [۲۳] انجام شده و درصد جذب آب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. بر اساس استاندارد، نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 150×75 میلی‌متر ساخته شده و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری درون حوضچه آب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس نمونه‌ها از آون خارج شده و با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن

می‌شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون حوضچه آب قرار می‌گیرند. در پایان پس از خروج نمونه‌ها از آب و خشک کردن سطح آنها، نمونه‌ها توزین می‌شوند.

$$Absorption\ percent\ (\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، B وزن نمونه بتنی در حالت اشباع با سطح خشک و A وزن نمونه بتنی در حالت خشک است.

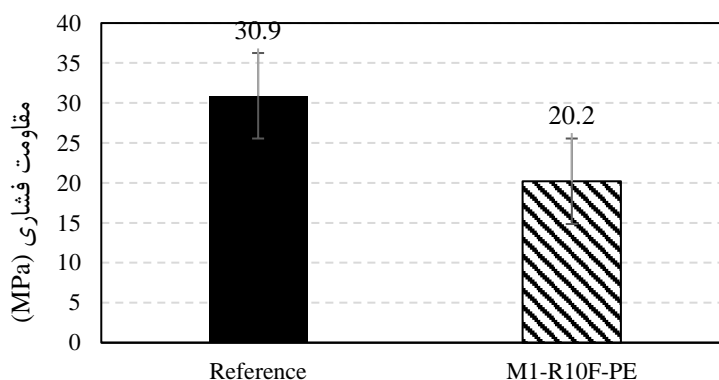
۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های این پژوهش در جدول ۳ و نیز شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس جدول ۳، مقاومت فشاری نمونه بتنی با ۱۰ درصد جایگزینی پومیس حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰، ۳۵ درصد نسبت به نمونه مبنا کاهش یافته است. دلیل کاهش مقاومت فشاری نمونه دارای پومیس حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ نسبت به نمونه مبنا آن است که مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان یک جزء خارجی در هنگام ساخت بتن اضافه شده و در نتیجه باعث ایجاد تأخیر در گیرش نهایی سیمان شده است. همچنین برخی از واکنش‌های شیمیایی بین مواد تغییر فاز دهنده و اجزای بتن، سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه با جایگزینی ۱۰ درصد پومیس همراه با پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ می‌شود.

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نام نمونه	ماده تغییر فاز دهنده	میزان جایگزینی سبک دانه	مقاومت فشاری (MPa)
Reference	-	۰	۳۰/۹
M1-R10F-PE	پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	۱۰ درصد وزنی	۲۰/۲



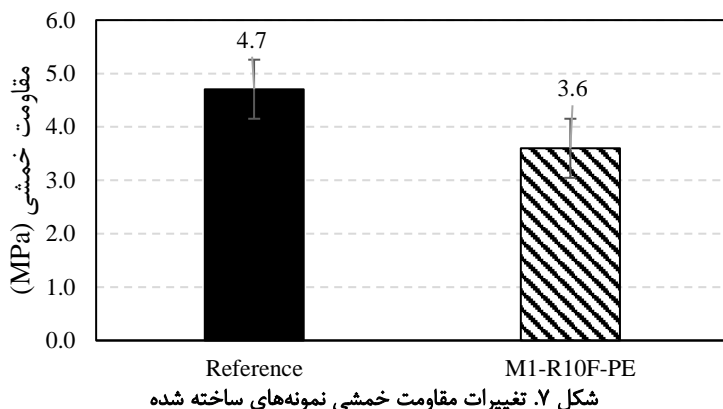
شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده

۴-۲. آزمایش مقاومت خمشی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۷، مقاومت خمشی نمونه با جایگزینی ۱۰ درصد پومیس حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ نسبت به مقاومت خمشی نمونه مبنا ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. علت این کاهش تأثیر پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در کاهش گیرش ثانویه سیمان در هنگام ساخت بتن است که سبب کاهش چسبندگی و پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها شده و به دنبال این پدیده، کاهش مقاومت خمشی بتن رخ می‌دهد.

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نام نمونه	ماده تغییر فاز دهنده	میزان جایگزینی سبک دانه	مقاومت خمشی (MPa)
Reference	-	۰	۴/۷
M1-R10F-PE	پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	۱۰ درصد وزنی	۳/۶

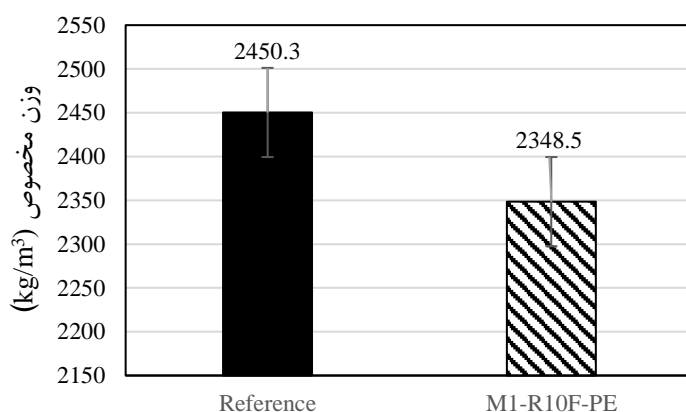


۳-۴. آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن تازه

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، جایگزینی ۱۰ درصد ریزدانه با استفاده از پومیس حاوی مواد تغییر فاز دهنده، باعث کاهش ناچیز وزن مخصوص بتن نسبت به وزن مخصوص نمونه مینا ۴ درصدی می‌گردد. این کاهش به دلیل پایین بودن وزن مخصوص پومیس و میکروسیلیس در نمونه بتنی است.

جدول ۵. نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن

نام نمونه	ماده تغییر فاز دهنده	میزان جایگزینی سبک دانه	وزن مخصوص (kg/m ³)
Reference	-	۰	۲۴۵۰/۳
M1-R10F-PE	پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	۱۰ درصد وزنی	۲۳۴۸/۵



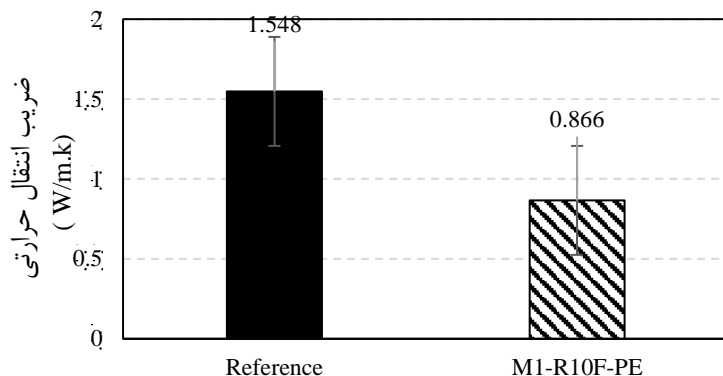
شکل ۸. تغییرات وزن مخصوص نمونه‌های ساخته شده

۴-۴. آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارتی

زمانی که پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ جایگزین ریزدانه طبیعی در بتن شود، این ضریب انتقال حرارتی بتن نسبت به ضریب انتقال حرارتی نمونه مینا، ۴۴ درصد بر اساس جدول ۶ و شکل ۹ کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل ضریب انتقال حرارتی بسیار پایین پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ و همچنین ظرفیت گرمای نهان بالای پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ است. همچنین میکروسیلیس، باعث پر شدن خلل و فرج بتن و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارتی می‌شود.

جدول ۶. نتایج آزمایش ضریب انتقال حرارتی

نام نمونه	ماده تغییر فاز دهنده	میزان جایگزینی سبک دانه	ضریب انتقال حرارتی (W/m.k)
Reference	-	۰	۱/۵۴۸
M1-R10F-PE	پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	۱۰ درصد وزنی	۰/۸۶۶



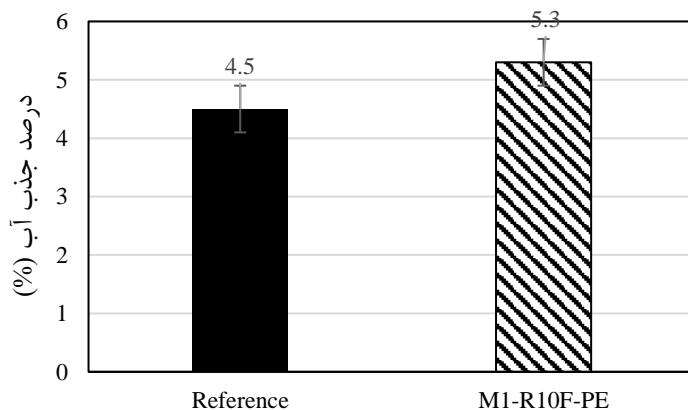
شکل ۹. تغییرات ضریب انتقال حرارتی نمونه‌های ساخته شده

۴-۵. آزمایش درصد جذب آب

بر اساس جدول ۷ و شکل ۱۰، درصد جذب آب نمونه با جایگزینی ۱۰ درصد پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ نسبت به نمونه مبنا ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که وجود پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در نمونه‌ها باعث می‌شود که این ماده با آب بتن واکنش دهد. در نتیجه این واکنش، بتن ساختاری متخلخل پیدا می‌نماید. این ساختار متخلخل بتن باعث افزایش درصد جذب آب بتن می‌شود.

جدول ۷. نتایج آزمایش درصد جذب آب

نام نمونه	ماده تغییر فاز دهنده	میزان جایگزینی سبک دانه	درصد جذب آب (%)
Reference	-	۰	۴/۵
M1-R10F-PE	پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰	۱۰ درصد وزنی	۵/۳



شکل ۱۰. تغییرات درصد جذب آب نمونه‌های ساخته شده

۵. جمع‌بندی

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است.

۱. جایگزینی ۱۰ درصدی پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در بتن، کاهش مقاومت فشاری نمونه بتنی به میزان ۳۵ درصد نسبت به نمونه مبنا می‌شود.
۲. در صورت جایگزینی ۱۰ درصد پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در بتن، کاهش مقاومت خمشی نمونه بتنی را به میزان ۲۳ درصد مشاهده گردید.
۳. جایگزینی ۱۰ درصدی پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در بتن، کاهش وزن مخصوص نمونه بتنی به میزان ۴ درصد کاهش

می‌شود.

۴. ضریب انتقال حرارتی نمونه بتنی با جایگزینی ۱۰ درصدی پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در بتن، به میزان ۴۴ درصد کاهش می‌یابد.

۵. درصد جذب آب نمونه بتنی با جایگزینی ۱۰ درصدی پومیس حاوی پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ در بتن، ۱۶ درصد کاهش را از خود نشان می‌دهد.

۶. پیشنهاداتی در خصوص مقالات آینده

۱. بررسی خواص حرارتی و مکانیکی بتن حاوی مواد تغییر فازدهنده با استفاده از الیاف بارچیب و الیاف بازالت؛

۲. بررسی خواص حرارتی و مکانیکی بتن با مصالح دورریز حاوی مواد تغییر فاز دهنده؛

۳. بررسی مصالح مختلف جهت تثبیت بهتر مواد تغییر فاز دهنده در بتن؛

۴. بررسی خواص حرارتی و مکانیکی بتن با دانه‌های پلی استایرن همراه با مصالح حاوی مواد تغییر فاز دهنده؛

۷. منابع

- [1] Peng, G., Dou, G., Hu, Y., Sun, Y. and Chen, Z., "Phase change material (PCM) microcapsules for thermal energy storage", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 88, pp. 1-20, 2020.
- [2] Lei, J., Yang, J. and Yang, E.H., "Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore", *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 207-217, 2016.
- [3] Gharibi, Hamed, "Laboratory investigation of thermal performance of concrete with recycled pumice materials containing phase change materials", Master's thesis in construction, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 1398. (In Persian)
- [4] Pomianowski, M. and Jensen, R.L., "Heat storage in concrete deck with nano-and micro-encapsulated PCM", *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*, pp. 313-331, 2020.
- [5] Fatehi, M.A. avaz nejad, F., kallai, A. , "Optimizing energy consumption in the country's architecture field in order to provide green design solutions", The third national climate conference, Building and optimization of energy consumption with a sustainable development approach, 1394. (In Persian)
- [6] Memon, S.A., "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 31, pp. 870-906, 2014.
- [7] Abbasi Hattan, Hamed, "Investigating the thermal behavior of masonry walls with mortar coating using stable shape phase change materials (SSPCM)", Master's thesis in construction, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 1398. (In Persian)
- [8] Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y. and Liu, H., "A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges", *Applied Energy*, Vol. 220, pp. 242-273, 2018.
- [9] Pomianowski, M., Heiselberg, P. and Zhang, Y., "Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 56-69, 2013.
- [10] Incropera, F. and DeWitt, D., "Introduction to heat transfer", Wiley, New York, 1985.
- [11] Bhattacharjee, B. and Krishnamoorthy, S., "Permeable porosity and thermal conductivity of construction materials", *Journal of Materials in civil Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 322-330, 2004.
- [12] Zhou, G., Yang, Y., Wang, X. and Cheng, J., "Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves", *Applied Energy*, Vol. 87, No. 8, pp. 2666-2672, 2010.
- [13] Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H. and Xing, F., "Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete", *Applied Energy*, Vol. 139, pp. 43-55, 2015.
- [14] Min, H.W., Kim, S. and Kim, H.S., "Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design", *Construction and Building Materials*, Vol. 149, pp. 749-762, 2017.
- [15] Hattan, H.A., Madhkhan, M. and Marani, A., "Thermal and mechanical properties of building external walls plastered with cement mortar incorporating shape-stabilized phase change materials (SSPCMs)", *Construction and Building Materials*, pp. 121385, 2020.
- [16] ASTM C33, Standard specification for concrete aggregates, American Society for Testing and Material, USA , 2004.
- [17] ASTM C192/C192M-16, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2016.

- [18] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, An ACI Standard, American Concrete Institute, USA, 2014.
- [19] ASTM C78/C78M, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with third-point Loading), ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2010.
- [20] ASTM C138-16a, *Standard test method for density (unit wieght), yield, and air content (gravimetric) of concrete*, ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.
- [21] ASTM D5334-08, Standard test method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure, USA, 2008.
- [22] ACI 122R-02, Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry System, American Society for Testing Materials Michigan, PA, USA, 2002.
- [23] ASTM C642, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Void in Hardened Concrete*, ASTM Philadelphia, PA, USA, 2001.