

بررسی رفتار مواد بتنی حاوی سنگدانه مقاوم در برابر حرارت به روش عددی: مدل اجزای محدود

آی‌لی کلتنه‌ئی^۱، علیرضا راسخی صحنه^{۲*}

(^{۲۱}) گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱

چکیده

در این تحقیق به روش آزمایشگاهی از سنگدانه‌های سبک مقاوم در برابر حرارت، پومیس و پرلیت در درصدهای جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به عنوان جایگزین سنگدانه استفاده و در مجموع ۱۱ سری طرح مخلوط طراحی و ساخته شد و در ادامه با استفاده از روش اجزای محدود عملکرد حرارتی سنگدانه‌های پومیس و پرلیت مورد بررسی و مقایسه با روش آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بودند که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک، مقاومت فشاری مخلوط‌ها کاهش یافته و همچنین تخلخل و میزان نفوذ یون کلر در تمامی مخلوط‌ها افزایش یافته است و در مجموع مشخصات دوام مخلوط‌ها کاهش نشان داد. افزایش میزان جایگزینی سنگدانه سبک باعث کاهش چشمگیر ضریب انتقال حرارت نمونه‌ها شده است. از طرف دیگر درصد خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت به روش عددی نسبت به روش آزمایشگاهی، برای مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد پومیس و پرلیت برابر با ۹/۳ و ۷/۵ درصد بوده که درصد خطای قابل قبولی به حساب می‌آید. آنالیز ریزساختاری نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های سبک پومیس و پرلیت انبساط یافته باعث افزایش تخلخل در مخلوط‌ها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حل عددی، ضریب انتقال حرارت، روش اجزا محدود

۱- مقدمه

بتن یک ماده کامپوزیت است که ترکیبات عمده آن سیمان، مواد جایگزین سیمان، سنگدانه (درشت و ریز)، آب و مواد افزودنی می‌باشد. در بیشتر موارد ساخت‌وساز، مخلوط‌های بتنی نه تنها در مقدار حتی در کیفیت با یکدیگر اختلاف دارند. برای دستیابی از یک سطح مطلوب از ایمنی و دوام در سازه‌های بتنی، درصد اختلاط اجزای بتن باید مطابق با یک دستورالعمل و شرایط محیطی در حین ساخت تنظیم شود. برای رسیدن به مشخصات مورد نیاز اقتصادی و مکانیکی، سنگدانه‌ها ۶۰ تا ۷۰ درصد حجم کل بتن مخلوط شده را تشکیل می‌دهند. مقاومت مکانیکی و دوام مخلوط‌های بتنی به مشخصات خمیر سیمان، مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها و به ناحیه انتقالی خمیر سیمان و سنگدانه‌ها وابسته است.

جرم واحد حجم (چگالی)، مقاومت فشاری و خواص عایق حرارتی بتن با یکدیگر در ارتباط هستند. به‌طور کلی، با افزایش جرم واحد حجم بتن، مقاومت فشاری آن نیز افزایش می‌یابد. با این وجود، خواص عایق حرارتی بتن به دلیل افزایش جرم واحد حجم کاهش می‌یابد [۱-۲]. امروزه بتن سبک در بسیاری از پروژه‌های مهندسی جهت رفع مشکلات بتن معمولی از جمله چگالی بالا و خواص عایق حرارتی پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص عایق حرارتی بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی بهتر می‌باشد. ضریب انتقال حرارت بتن‌های حاوی بتن سبک در حدود ۵۰ درصد کمتر از بتن معمولی می‌باشد [۳]. در حال حاضر، بتن سبک را می‌توان با روش ساخت و مصالح گوناگونی تولید کرد. رایج‌ترین روش تولید بتن سبک استفاده از سنگدانه سبک می‌باشد. سنگدانه سبک مصالح مهمی می‌باشد که از آن، جهت کاهش چگالی بتن سازه‌ای و غیر سازه‌ای استفاده می‌شود. سنگدانه سبک به صورت کلی برای کاهش چگالی بتن استفاده می‌شود و معمولاً جایگزین سنگدانه طبیعی می‌شود. از دیگر روش‌های بررسی بتن‌های سبک استفاده از شبیه‌سازی عددی است. منظور از شبیه‌سازی عددی تحلیل خواص بتن سبک به کمک معادلات حاکم بر آن می‌باشد. از جمله مزایای استفاده از روش‌های عددی صرفه‌جویی در وقت و هزینه در مقایسه با روش آزمایشگاهی می‌باشد.

سنگدانه‌های سبک می‌تواند از منابع طبیعی بدست آیند و یا به صورت مصنوعی ساخته شوند. اصلی‌ترین منابع طبیعی سنگدانه سبک، سنگدانه‌های آتشفشانی هستند. سنگدانه‌های مصنوعی و ساخت بشر مانند پرلیت، ورمکولیت و رس انبساط یافته از طریق یک فرایند حرارتی در کارخانه‌ها بدست می‌آیند. سنگدانه‌های سبک می‌توانند به عنوان سنگدانه برای تولید بتن در محدوده وسیعی از چگالی و مقاومت ساخته شوند و کاربردهای گوناگونی داشته باشند. بتن‌های سبک با مقاومت فشاری بین ۰٫۶۹ تا ۶/۸۹ مگا پاسکال به عنوان بتن عایق به کار می‌رود. بتن‌های با مقاومت بین ۶/۸۹ تا ۱۷/۲۴ به عنوان بتن پرکننده و بتن سبک با مقاومت بالاتر از ۱۷/۲۴ به عنوان بتن سبک سازه‌ای به کار می‌رود [۴]. اولین فایده استفاده از سنگدانه سبک کاهش بار مرده است. سنگدانه‌های سبک به صورت کلی دارای ساختار متخلخل هستند که این ساختار متخلخل باعث می‌شود که این سنگدانه‌ها دارای مشخصات حرارتی، آکوستیکی و مقاوم در برابر آتش مناسب باشند [۵-۶]. چگالی بتن‌های حاوی سنگدانه سبک در مقایسه با بتن معمولی که حدود ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است معمولاً زیر ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. با وجود این مزایای ذکر شده بتن‌های سبک دارای مشکلاتی نیز می‌باشند. برای مثال برای یک طرح مخلوط حاوی سنگدانه سبک، معمولاً مقاومت فشاری مخلوط پایین می‌باشد که علت آن مقاومت پایین و ساختار متخلخل سنگدانه سبک می‌باشد [۷]. علاوه بر این رسیدن به یک مقاومت فشاری مشخص، بتن سبک معمولاً به حجم خمیر بیشتری احتیاج دارد [۸] که منجر به افزایش مقدار سیمان مصرفی در مقایسه با بتن معمولی می‌شود. مصرف بیشتر سیمان باعث افزایش هزینه بتن و همچنین افزایش مقدار حرارت هیدراتاسیون در بتن می‌شود. همچنین گزارش شده است که

استفاده از سنگدانه سبک باعث کاهش مشخصات دوام مانند نفوذپذیری؛ جذب حجمی و مقاومت کربناسیون می-شود [۹-۱۰].

هارمتی و همکارانش گزارش دادند که بتن سبک به دلیل چگالی پایین و مشخصات خاص سنگدانه‌های آن عایق کارآمدی می‌باشد [۱۱]. ژائو و همکارانش به بررسی خواص حرارتی بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی بتنی پرداختند و گزارش دادند که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد [۱۲]. کیم و همکارانش گزارش ضریب انتقال حرارت بتن‌های مرطوب ۱/۷ برابر بزرگتر از بتن خشک است [۱۳]. محققین مختلفی گزارش دادند که سنگدانه سبک مورد استفاده در بتن معمولاً پومیس، رس کلیسنه است [۱۴-۱۹]. چگالی بتن سبک سخت شده معمولاً بین ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلوگرم است [۲۰]. سنگال و همکارانش گزارش دادند که استفاده از پومیس انبساط یافته در بتن باعث کاهش چشمگیر ضریب انتقال حرارت بتن می‌شود [۲۱]. کان و همکاران به بررسی استفاده از دانه‌های پلی اتیلن به عنوان سنگدانه سبک در بتن پرداختند. آنها گزارش دادند که استفاده از سنگدانه پلی اتیلن باعث کاهش مقدار ضریب انتقال حرارت تا ۰/۶ وات بر متر کلون می‌شود [۲۲].

۲- مواد و مصالح مورد استفاده

۲-۱- سیمان مصرفی

در این تحقیق از سیمان تیپ ۲ تولید شده در کارخانه سیمان فیروزآباد فارس برای ساخت مخلوط‌های آزمایشی استفاده شده است. جدول آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات	(MgO)%	(SiO ₂)%	(Al ₂ O ₃)%	(Fe ₂ O ₃)%	(C ₂ A)%	(SO ₃)%	(L.O.I)%	(I.R)%	(CAO)%
شیمیایی الزامی									
مشخصه									
سیمان فیروزآباد	۱/۴	۲۱/۲	۴/۶	۳/۸	۶	۲/۵۴	۱	۰/۵	۶۲

۲-۲- سنگدانه

سنگدانه‌های استفاده شده در این مطالعه شامل ماسه سیلیسی رودخانه‌ای با حداکثر بعد ۴/۷۵ میلی‌متر و جذب آب ۲/۴۲ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک 2560 kg/m^3 ، مشخصات سنگدانه پرلیت و پومیس در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

حداکثر بعد سنگدانه (mm)	جذب آب (%)	چگالی SSD (Kg/m^3)	وزن مخصوص خشک (Kg/m^3)	نوع سنگدانه
۴/۷۵	۲/۲۴	۲۵۶۰	۲۴۹۰	ماسه
۴/۷۵	۸۰	۴۸۰	۴۲۰	پرلیت
۴/۷۵	۲۷	۱۱۵۰	۱۰۷۰	پومیس



الف

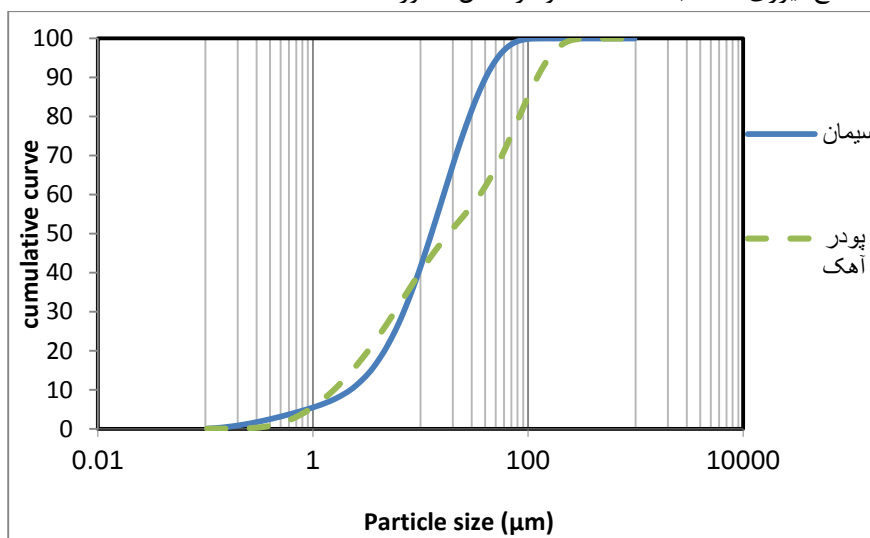


ب

ج

شکل ۱. سنگدانه مورد استفاده (الف) ماسه شسته (ب) پرلیت (ج) پومیس

با توجه به اینکه ماسه‌های موجود در ایران مقدار فیلر کمی دارند و نمی‌توانند در محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مذکور قرار گیرند، از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده شد. دانه بندی پودر سنگ آهک، سیمان با استفاده از دستگاه طیف سنج لیزری محاسبه شده است و در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. دانه‌بندی پودر سیمان

۳- طرح‌های اختلاط، نحوه ساخت

برای اختلاط بتن سبک حاوی سنگدانه سبک در این مطالعه از یک میکسر درام استفاده شد. نحوه اختلاط شامل دو دقیقه اختلاط خشک مصالح، افزودن آب به مخلوط در حال اختلاط در یک بازه زمانی ۳۰ ثانیه و ادامه اختلاط به مدت ۳ دقیقه بوده است. نحوه اختلاط مصالح خشک نیز بدین صورت بوده است که در ابتدا شن، ماسه و سنگدانه‌های پرلیت و پومیس درون میکسر ریخته و سپس سیمان به آن‌ها اضافه شده است. سپس، آب به همراه فوق روان‌کننده در آب درون مخلوط‌کن ریخته می‌شد. بلافاصله پس از اتمام اختلاط، بتن تازه در یک لایه در درون قالب‌های مکعبی و در دو لایه در درون قالب‌های استوانه‌ای ریخته شده و به مدت دو تا سه دقیقه بر روی میز ویبره قرار گرفته و متراکم شده‌اند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها با پوشش مرطوب به مدت ۱۸ ساعت پوشیده شده‌اند تا از تبخیر سطحی آن‌ها جلوگیری شود، سپس در حوضچه بتن حاوی آب‌آهک اشباع‌شده قرار گرفته تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شده‌اند.

جدول ۳. طرح اختلاط‌های مخلوط‌های حاوی سنگدانه پومیس

شماره طرح	w/c	سیمان (Kg/m ³)	پودرآهک (Kg/m ³)	درشت دانه (Kg/m ³)	پومیس (Kg/m ³)	ریزدانه (Kg/m ³)
control	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۱۱۸	۰	۷۳۰
PC-۱۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۴۵	۱۰۷/۲	۵۱۲
PC-۲۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۴۵	۲۱۴/۵	۳۴۳
PC-۳۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۳۱۰/۲	۱۷۳/۳
PC-۴۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۳۹۶	۰
PC-۵۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۴۶۸	۰

جدول ۴. طرح اختلاط‌های مخلوط‌های حاوی سنگدانه پرلیت انبساط یافته

شماره طرح	w/c	سیمان (Kg/m ³)	پودرآهک (Kg/m ³)	درشت دانه (Kg/m ³)	پرلیت (Kg/m ³)	ریزدانه (Kg/m ³)
control	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۱۱۸	۰	۷۳۰
EPC-۱۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۴۵	۲۴	۵۱۲
EPC-۲۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۴۵	۴۸	۳۴۳
EPC-۳۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۷۴/۴	۱۷۳/۳
EPC-۴۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۱۰۱/۶	۰
EPC-۵۰	۰/۴۸	۳۵۰	۵۷	۱۰۵۰	۱۲۹/۱	۰

۴- آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق

۴-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

جهت این کار، نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر به تعداد مورد نیاز ساخته شده و نمونه‌ها پس از ساخت، با آب عمل‌آوری شدند. در سنین ۲۸ روز پس از عمل‌آوری، ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و مطابق با استاندارد [۲۳] BS۱۸۸۱-۱۱۶ تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و نتایج ثبت گردید.

۴-۲- آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها، چگالی خشک و حجم منافذ قابل نفوذ

این آزمایش مطابق استاندارد [۲۴] ASTM C۶۴۲ با هدف بررسی میزان جذب آب توسط ملات‌های سخت شده و بررسی چگالی خشک و تشخیص حجم حفرات قابل نفوذ در ملات انجام شد. برای این منظور، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ سانتی‌گراد خشک گردید و سپس در ظرف محتوی آب به نحوی غوطه‌ور شدند که سطح آب 5 ± 25 میلیمتر بالاتر از سطح آزمون‌ها قرار گرفت. در این آزمون نمونه‌ها را در زمان‌های تعیین شده از آب خارج کرده و توسط پارچه‌ای تمیز، آب سطح آنها خشک و سپس توزین گردید. بدین ترتیب با داشتن وزن آزمون در حالت خشک و غوطه‌ور، درصد جذب آب برحسب وزن آزمون خشک از رابطه ۱ به دست آمد.

(۱)

$$\text{جذب آب (\%)} = \left[\frac{(B - A)}{A} \right] \times 100$$

A- وزن نمونه خشک شده درآون برحسب گرم

B- وزن نمونه غوطه‌ور شده درآب با سطح خشک برحسب گرم

برای آزمایش چگالی بتن سخت شده و حجم حفرات بعد از یادداشت نمودن وزن اشباع نمونه، نمونه را درون توری و در آب قرار داده و وزن آن را به عنوان وزن ظاهری قرائت می‌کنیم. سپس از طریق روابط زیر به محاسبه چگالی و حجم حفرات بتن سخت شده می‌پردازیم.

$$g_1 = \left[\frac{B}{(C - D)} \right] \times \rho \quad (2)$$

$$g_2 = \left[\frac{A}{(A - D)} \right] \times \rho \quad (3)$$

$$\text{حجم حفرات (\%)} = \left[\frac{g_2 - g_1}{g_2} \right] \times 100 \quad (4)$$

C- وزن نمونه‌ی غوطه‌ور و جوشیده با سطح خشک برحسب گرم

D-وزن ظاهری نمونه پس از غوطه‌وری و جوشیدن برحسب گرم

g_۱-چگالی خشک برحسب تن برترمکعب (T/m^۳)

g_۲-چگالی ظاهری برحسب تن برترمکعب (T/m^۳)

ρ-چگالی آب برحسب تن برترمکعب (T/m^۳)

۴-۳ آزمایش انتشار تسریع شده یون کلراید (RCMT)

این آزمایش بر اساس استاندارد [۲۵] NT-BUILD ۴۹۲ با هدف تعیین ضریب انتشار یون‌های کلرید و عملکرد ذرات پارافین بر دوام ملات‌های ساخته شده، انجام گرفت. در این آزمایش پس از اجرای مراحل و شرایط آزمایش مطابق با استاندارد مذکور، عمق نفوذ یون‌های کلرید به درون ملات، با پاشش محلول ۰/۱ مولار نقره نیترات و اندازه‌گیری به وسیله کولیس انجام شد. پس از اندازه‌گیری عمق نفوذ کرده مقادیر به دست آمده جهت محاسبه ضریب انتشار یون‌های کلرید در رابطه ۵ قرار داده شد.

(۵)

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times \left(X_d - \left(0.0238 \times \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times X_d}{U-2}} \right) \right)$$

D_{nssm} ضریب انتشار یون کلراید $\times 10^{-12} m^2/s$

U - مقدار ولتاژ اعمالی

T - میانگین دمای اولیه و ثانویه در محلول آب نمک

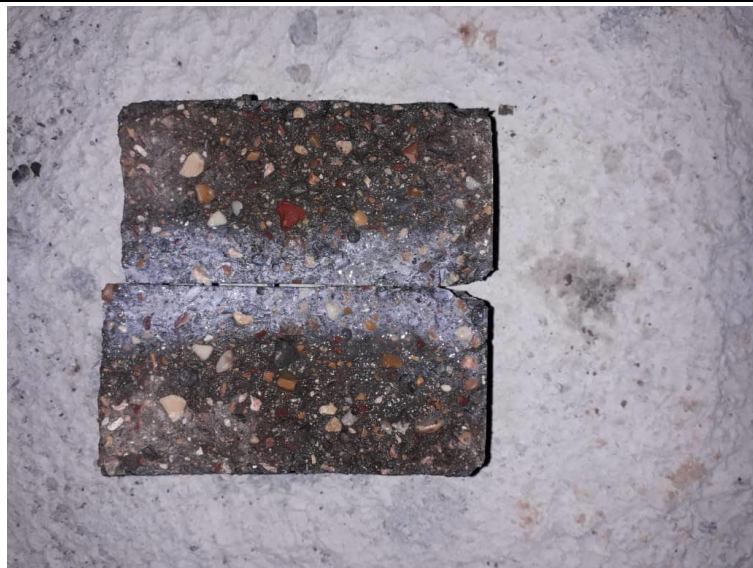
L - ضخامت نمونه بر حسب میلی متر

X_d - میانگین مقادیر عمق نفوذ

t - مدت زمان آزمایش، بر حسب ساعت



شکل ۳. نمایی از آزمایش انتشار تسریع شده یون کلراید



شکل ۴. پاشش نیترات نقره و تغییر رنگ ناحیه نفوذ کرده

۳-۶-۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۲)

به منظور بررسی بهتر عملکرد ذرات پارافین و مشاهده اثر آن بر ریزساختار ملات‌ها، از عکس میکروسکوپ الکترونی استفاده شد.

۴-۴- آزمایش ضریب انتقال حرارت

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت بتن از روش شار حرارتی پایدار استفاده شد. نحوه کار بدین صورت است که نمونه‌ها بین دو صفحه که به آن‌ها صفحه گرم و صفحه سرد گفته می‌شود قرار گرفت. از طریق صفحه گرم شار حرارتی به نمونه داده می‌شود و در بقیه جهات نمونه ایزوله و عایق می‌شود و در بالای نمونه صفحه سرد قرار داده می‌شود و شار حرارتی از درون نمونه از صفحه گرم به سمت صفحه سرد صورت می‌گیرد. زمانی که دمای سطح پایین و بالای نمونه ثابت شد مشخص می‌شود که شار حرارتی به حالت پایدار رسیده است و سپس مطابق با رابطه ۶ ضریب انتقال حرارت محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{Qt}{A\Delta t} \quad (۶)$$

K - ضریب انتقال حرارت برحسب $W/(Mk)$

Q - توان ورودی دستگاه برحسب وات (W)

t - ضخامت نمونه برحسب متر

A - سطح مقطع نمونه برحسب مترمربع

ΔT - اختلاف دمای بالا و پایین نمونه برحسب کلوین

^۲ Scanning Electron Microscopy



شکل ۵. دستگاه ضریب انتقال حرارت

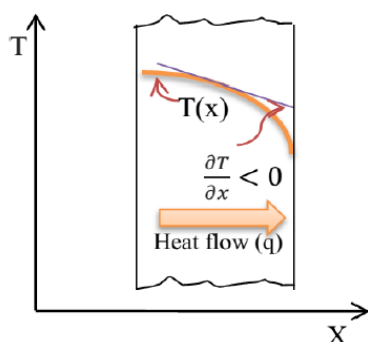
۵- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه از نرم‌افزار انسیس برای شبیه‌سازی عددی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت نمونه‌های حاوی ذرات پارافین استفاده شد. ضریب انتقال حرارت خاصیتی از مواد است که نشان‌دهنده‌ی توانایی مواد در انتقال حرارت می‌باشد. ضریب انتقال حرارت مهم‌ترین مشخصه‌ی حرارتی است که بر جریان انتقال حرارت در بتن تأثیر می‌گذارد. مقدار عبور جریان گرما از یک سطح را می‌توان با معادله فوریه به دست آورد.

$$q = -k \nabla T = -k \left(\hat{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (۷)$$

و هنگامی که جریان فقط در یک‌جهت باشد می‌توان بالا را به‌صورت زیر ساده کرد.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۸)$$



شکل ۶. نمای شماتیک از انتقال حرارت یک‌بعدی از طریق انتقال

معادله حاکم

در این قسمت در ابتدا معادلات مشتق جزئی حاکم بر مساله انتقال حرارت ارائه خواهد شد و در ادامه به روش اجزا محدود پاسخ معادلات بدست خواهد آمد.

المان سه بعدی با حجم محدود $dv = dxdydz$ مطابق با شکل ۷ که تحت توزیع دمای $T(x)$ قرار دارد را در نظر می‌گیریم. معادلات تعادل انرژی برای این المان به صورت زیر نوشته می‌شود.

در راستای X :

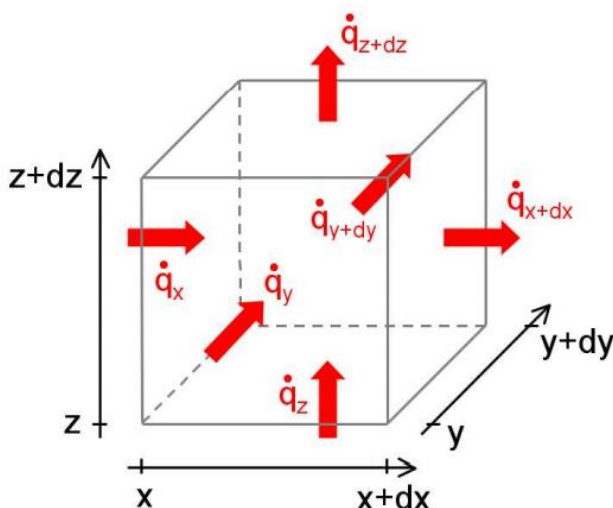
$$(\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx})dydz = -\left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x}\right)dxdydz = -\left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x}\right)dV \quad (۹)$$

در راستای Y :

$$(\dot{q}_y - \dot{q}_{y+dy})dxdz = -\left(\frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y}\right)dxdydz = -\left(\frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y}\right)dV \quad (۱۰)$$

در راستای Z :

$$(\dot{q}_z - \dot{q}_{z+dz})dxdy = -\left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z}\right)dxdydz = -\left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z}\right)dV \quad (۱۱)$$



شکل ۷. المان سه بعدی تحت توزیع دما

مجموع معادلات بالا میزان انرژی ورودی به المان را نشان می‌دهد که در غیاب منبع حرارتی و چاه حرارتی این انرژی می‌بایست با نرخ ذخیره انرژی در المان برابر باشد. مطابق با معادله ۱۲

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV = \text{div}(\lambda \nabla T) dV = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که در آن

c_p ظرفیت گرمایی ویژه، ρ چگالی و λ ضریب انتقال حرارت است.

معادله معادله مشتق جزئی حاکم بر مساله انتقال حرارت دو بعدی را نشان می‌دهد که برای حل آن به طور کلی سه شرایط مرزی می‌باشد.

۱. شرط مرزی دیریشله:

در این حالت دما روی مرز مقداری محدود و معلوم است.

$$T(x, t) = Tw(x, t) \quad (۱۳)$$

۲. شرط مرز نیومن:

در این حالت در مرز شار حرارتی محدود و معلومی وجود دارد

$$q \dot{w}(x, t) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x, t) \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial n}(x, t) = \frac{-q \dot{w}(x, t)}{\lambda} \quad (۱۴)$$

۳. شرط مرزی کوخی:

در این حالت در مرز بر هم کنش بین المان و محیط اطراف وجود دارد

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x, t) = \alpha (T(x, t) - T_f) \quad (۱۵)$$

T_f دمای محیط اطراف است.

مدل اجزای محدود

معادله حاکم بر مساله یک بعدی را به فرم کلی زیر در نظر می گیریم.

$$-\lambda T''(x) = f(x) \quad \forall x \in (0, L) \quad (۱۶)$$

با شرایط مرزی زیر

$$\begin{aligned} T(x=0) &= 0 \\ T'(x=L) &= 0 \end{aligned} \quad (۱۷)$$

مطابق با روش اجزای محدود برای حل معادله ۱۶ می بایست ابتدا فرم ضعیف شده آن را بدست آورد. استفاده از روش های فرم ضعیف شده معادلات رویکردی است که در حل معادلات مختلف ریاضی مورد استفاده قرار می گیرد [۲۶-۲۸]. بدین منظور طرفین معادله را در یک تابع تست مطابق با معادله ۱۸ ضرب می کنیم.

$$-\int_0^L \lambda T''(x) v(x) dx = \int_0^L f(x) v(x) dx \quad (۱۸)$$

در ادامه با اعمال روش انتگرال گیری جز به جز بر سمت چپ معادله ۱۸ را می توان به فرم زیر بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned} -\int_0^L \lambda T''(x) v(x) dx &= -[\lambda T' v]_{x=0}^{x=L} + \int_0^L \lambda T'(x) v'(x) dx \\ &= \int_0^L f(x) v(x) dx \end{aligned} \quad (۱۹)$$

همان طور که از فرم ضعیف شده ی معادله مشخص است تابع تست می بایست تا مرتبه C^0 پیوسته باشد. در ادامه مطابق با معادله ۲۰ پاسخ مساله را به صورت مجموع حاصل ضرب مقادیر گره ای در مقدار توابع شکل گسسته سازی می کنیم.

$$T_s = \sum_{i=1}^n T_i \varphi_i \quad (۲۰)$$

که در آن n تعداد گره، T مقادیر گره ای و φ_i توابع شکل هستند. برای بازنویسی فرم ماتریسی مساله لازم است تا فرم گسسته در معادله ۲۰ را در معادله ۱۹ جایگذاری کنیم.

$$\sum_{i=1}^n T_i \int_0^L \varphi'_i(x) \varphi'_j(x) dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^L f(x) \varphi_j(x) dx, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}. \quad (21)$$

با حل معادله ۲۱ بر هر المان می توان فرم ماتریسی مساله را به فرم زیر نوشت.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{b} \quad (22)$$

که در آن A ماتریس سختی، b بردار نیروها، t بردار مقادیر مجهول گره ای است.

$$A = \left(\int_0^L \varphi'_i(x) \varphi'_j(x) dx \right)_{i,j=1,2,\dots,n} \quad (23)$$

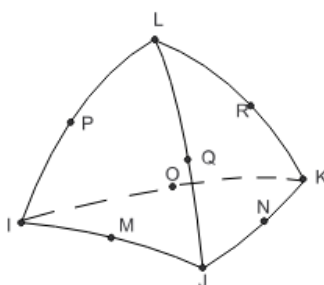
$$b = \left(\frac{1}{\lambda} \int_0^L f(x) \varphi_j(x) dx \right)_{j=1,\dots,n} \quad (24)$$

باید توجه داشت که در معادله ۲۲ ماتریسی معکوس پذیر است که می توان مقادیر مجهولات گرهی را در هر المان به شکل زیر بدست آورد.

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (25)$$

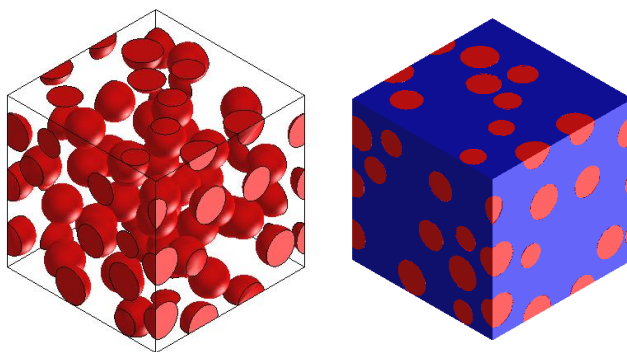
مش بندی

شبکه بندی در شبیه سازی عددی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا دقت نتایج مستقیماً به کیفیت شبکه بندی مدل بستگی دارد. در این شبیه سازی از المان چهاروجهی ۱۰ گره ای استفاده شده است. در این المان سه بعدی، دما در هر گره محاسبه می شود. با توجه به این که در پژوهش حاضر فقط انتقال حرارت نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته، برای بتن، خمیر سیمان و پارافین از المان چهاروجهی ۱۰ گره ای استفاده شده است. شکل ۸ نمای شماتیک المان مورد استفاده را نشان می دهد.

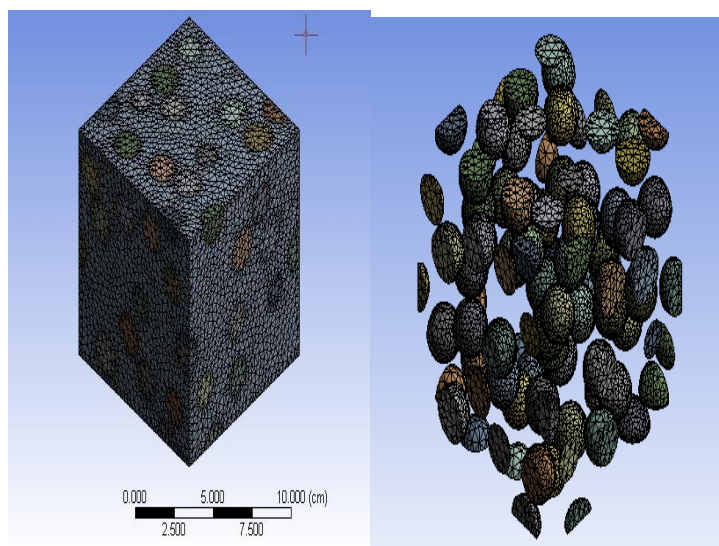


شکل ۸. نمای شماتیک المان مورد استفاده

به منظور توزیع ذرات پارافین در محیط سیمان از روش المان حجم نمونه (RVE^3) استفاده شده است. مطابق با این روش، حجم نمونه، کوچکترین حجمی از محیط است که بتوان نتایج حاصل از تحلیل آن را برای کل مدل در نظر گرفت. نمونه ای از توزیع ذرات مطابق با روش RVE در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. توزیع ذرات مطابق با روش المان حجم نمونه



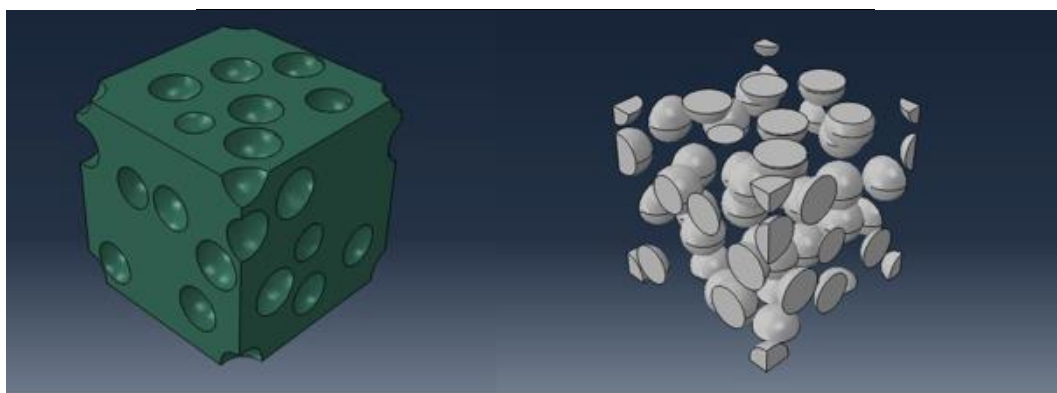
شکل ۱۰. نمای شماتیک از مدل المان بندی شده

روش شار حرارتی پایدار رایج‌ترین روش برای مطالعه خواص حرارتی مواد سیمانی می‌باشد. در روش حالت پایدار شار حرارتی اعمال شده ثابت می‌باشد و در نتیجه آن دما و نرخ جریان گرما به زمان وابسته نیست. در این شبیه‌سازی از روش حالت پایدار برای محاسبه توزیع دما و نرخ جریان گرما استفاده شد. در جدول ۵ مشخصات سنگدانه‌ها و خمیر سیمان مدل‌سازی شده آورده شده است.

جدول ۵. ضریب انتقال حرارت مواد

ماده	$\frac{W}{mk}$ ضریب انتقال حرارت
خمیر سیمان	۱/۸
پرلیت	۰/۰۴

۰/۱۲			پومیس		
جدول ۶. شرایط مرزی اعمال شده					
مقدار	نوع	قسمت			
$22^{\circ}C$	دما	سطح بالایی			
$\frac{W}{m^2}$	جریان گرما	سطح پایینی			
.....	کاملاً عایق	سطوح جانبی			



شکل ۱۱. نمای شماتیک مدل ساخته شده در نرم افزار انسیس - سمت چپ خمیر سیمان و سمت راست ذرات پومیس

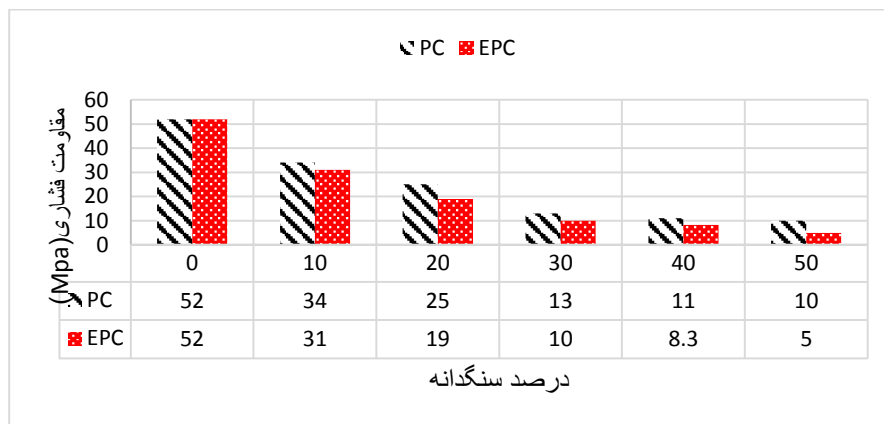
۶- نتایج آزمایشات

۶-۱- مقاومت فشاری

در شکل ۱۲ متوسط مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سن ۲۸ روز آورده شده است. برای درک راحت تر روند تغییرات مقاومت، در شکل ۱۲ متوسط نتایج مربوط به مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سن ۲۸ روز ارائه شده است. چنانچه در شکل ۹ مشاهده می شود مقاومت فشاری مخلوط‌ها بین مقادیر ۵۰ و ۵ مگاپاسکال با تغییر درصد جایگزینی سنگدانه سبک تغییر می کند. همان طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری تمام مخلوط‌ها با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک یک روند کاهشی از خود نشان داده است. کاهش مقاومت در سن ۲۸ روز بر ای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پومیس در درصد های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ برابر با ۳۴/۶، ۵۹/۹، ۷۵، ۷۸/۸، ۸۰/۷ و ۸۰/۷ درصد بوده است همچنین کاهش مقاومت برای مخلوط های حاوی سنگدانه سبک پرلیت برابر با ۳/۴، ۶۳/۴، ۸۰/۷ و ۹۰/۳ درصد های جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد بوده است. این کاهش مقاومت ناشی از ساختار متخلخل و ضعیف سنگدانه های پومیس و پرلیت می باشد. مطابق شکل ۹ مشاهده می شود مخلوط های حاوی سنگدانه پرلیت کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به سنگدانه پومیس از خود نشان داده است و علت آن ساختار ضعیف تر پرلیت در برابر پومیس می باشد

دلیل کاهش مقاومت با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه های پومیس و پرلیت می تواند این باشد که با جایگزینی این سنگدانه ها که ماده ای نرم هستند با ماسه که ماده ای سخت تر می باشد، باعث کاهش مقاومت شده است. همچنین سنگدانه های پومیس

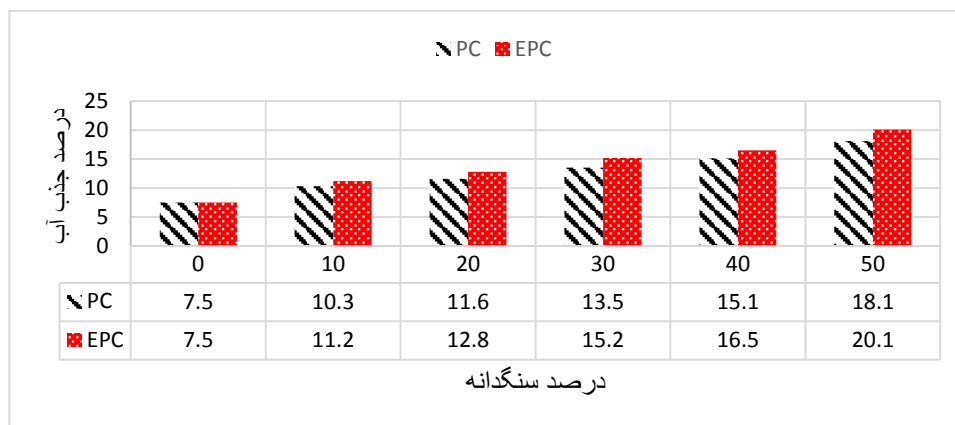
و پرلیت در حین بارگذاری از آنجایی که مقاومت فشاری بالایی ندارند می‌توانند در حین بارگذاری شکسته شوند و باعث ایجاد تخلخل بیشتر در ماتریکس ملات شوند [۲۹] که خود می‌تواند منجر به کاهش مقاومت در مخلوط‌ها شوند.



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط‌ها

۲-۶- جذب حجمی آب

چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک جذب آب مخلوط‌ها افزایش یافته است. مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه پرلیت دارای بیشترین مقدار جذب آب به مقدار ۲۰/۱ درصد بوده است. افزایش جذب آب مخلوط‌ها به دلیل ساختار متخلخل و چگالی پایین سنگدانه‌های سبک می‌باشد که باعث افزایش فضای خالی در نمونه‌ها شده است و در نتیجه آن جذب حجمی آب افزایش یافته است.

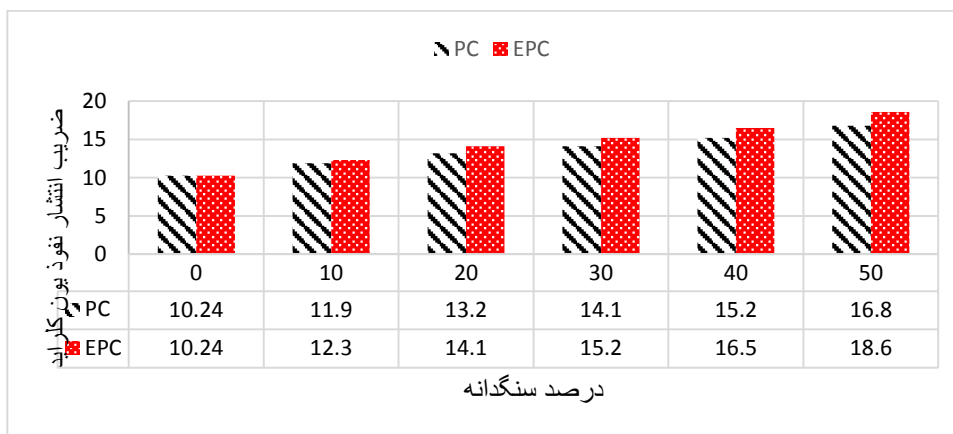


شکل ۱۳. مقایسه جذب حجمی آب ۲۸ روزه مخلوط‌ها

۳-۶- انتشار تسریع شده یون کلراید

در بحث دوام، یکی از مهم‌ترین مشکلات، بحث خوردگی بتن در محیط‌های کلرایدی می‌باشد. لذا لازم است نفوذپذیری بتن را در محیط‌های کلرایدی مورد بررسی قرارداد. در این مطالعه از روش انتشار تسریع شده یون کلراید (RCMT) استفاده شده است. چنانچه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌ها ضریب نفوذ یون کلراید افزایش یافته است. مخلوط‌های حاوی سنگدانه پرلیت در مقایسه با پومیس دارای ضریب نفوذ یون کلراید بیشتری می‌باشد که علت آن ساختار متخلخل‌تر پرلیت در مقایسه با پومیس می‌باشد. افزایش ضریب انتقال نفوذ یون کلر در سن ۲۸ روز برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پومیس در درصد‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ برابر با ۱/۲، ۲۸/۹، ۳۷/۶، ۴۸/۴ و ۶۴ درصد بوده است همچنین افزایش ضریب انتقال نفوذ یون کلر برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پرلیت برابر با ۱/۲، ۳۷/۶، ۴۸/۴ و ۶۱

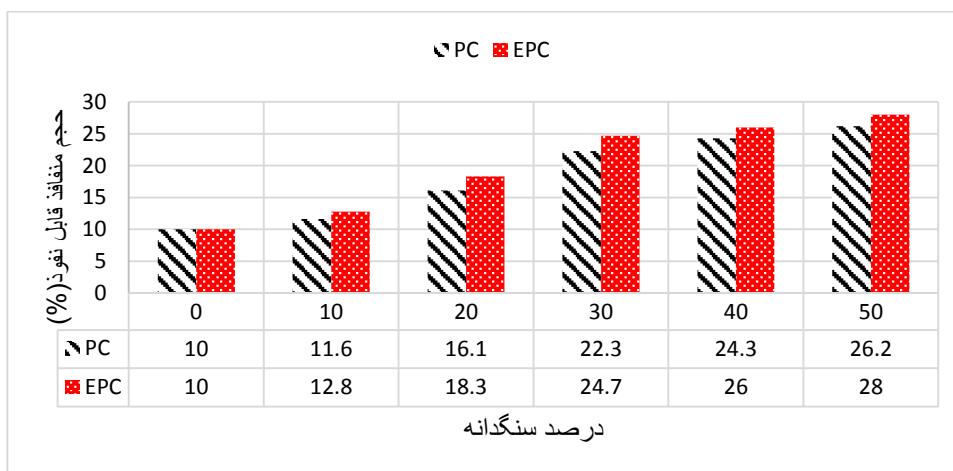
و ۸۱ در درصد های جایگزینی ۴۰،۳۰،۲۰،۱۰ و ۵۰ درصد بوده است. این افزایش ضریب انتقال نفوذ یون کلر ناشی از ساختار متخلخل و ضعیف سنگدانه های پومیس و پرلیت می باشد.



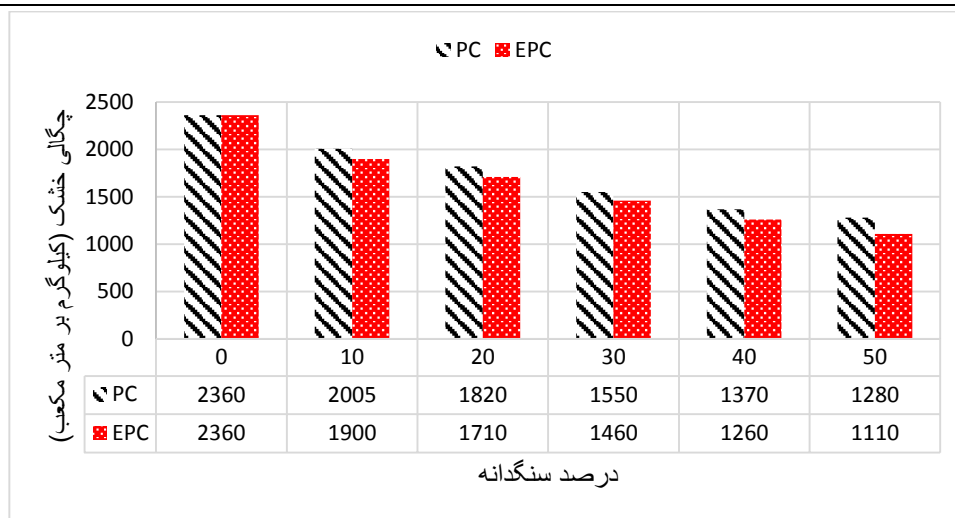
شکل ۱۴. مقایسه ضریب انتشار یون کلراید مخلوط‌ها

۶-۴ چگالی خشک و حجم منافذ قابل نفوذ

متوسط نتایج مربوط به آزمایش چگالی خشک و حجم منافذ قابل نفوذ در اشکال ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک چگالی خشک مخلوط‌ها کاهش یافته است. در درصد جایگزینی ۵۰ درصد چگالی مخلوط های حاوی پومیس و پرلیت به ترتیب برابر ۴۵/۷ و ۵۲ درصد کاهش یافته اند. علت این کاهش چگالی پایین تر سنگدانه سبک در مقایسه با سنگدانه های معمولی می باشد. کاهش چگالی بتن می تواند در هنگام وقوع زلزله بسیار موثر باشد و نیروی ناشی از زلزله را کاهش دهد [۳۰]. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه های سبک حجم منافذ قابل نفوذ مخلوط ها افزایش یافته است. حجم منافذ قابل نفوذ با کاهش چگالی افزایش یافته است و مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه پرلیت با ۲۸ درصد بالاترین تخلخل را از خود نشان داده است. این نتایج با یافته های راسخی و همکاران تطابق دارد [۳۱]. علت افزایش تخلخل در مخلوط ها این است که سنگدانه های سبک در مقایسه با سنگدانه معمولی ساختار متخلخل تری دارند در نتیجه جایگزینی آنها با سنگدانه معمولی باعث افزایش تخلخل شده است.



شکل ۱۵. مقایسه حجم منافذ مخلوط‌ها

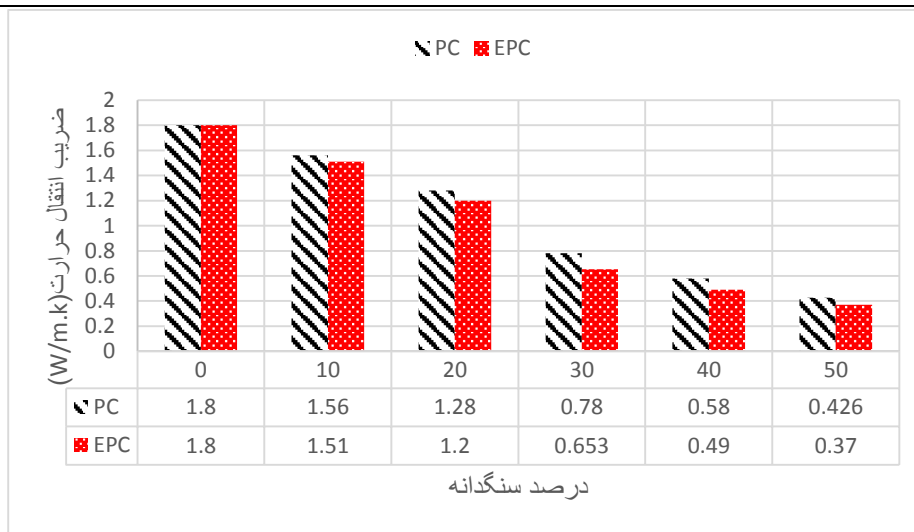


شکل ۱۶. مقایسه چگالی خشک مخلوط‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)

۶-۵- ضریب انتقال حرارت مخلوط‌ها

ضریب انتقال حرارت یک ماده برابر است با مقدار گرمای انتقال داده شده در طول ضخامت نمونه در جهت عمود بر سطح نمونه، تحت یک گرادیان حرارتی تحت شرایط کنترل شده. ضریب انتقال حرارت مواد مختلف به برگ خریدهای مختلفی بستگی دارد از جمله ساختار، نسبت اختلاط مواد، نوع سنگدانه، چگالی متخلخل. سنگدانه‌های با ضریب انتقال حرارت پایین‌تر بتن با ضریب انتقال پایین‌تر تولید می‌کند [۳۲]. تخلخل یکی از فاکتور هایی است که بر ضریب انتقال حرارت بتن تأثیر می‌گذارد و منافذ بسته باعث کاهش ضریب انتقال حرارت بتن می‌شود و علت آن ضریب انتقال حرارت پایین هوای داخل حفره است. جایگزینی سنگدانه معمولی با سنگدانه‌های سبک باعث افزایش تخلخل مخلوط‌ها می‌شود و بر ضریب انتقال حرارت مخلوط‌ها تأثیر می‌گذارد.

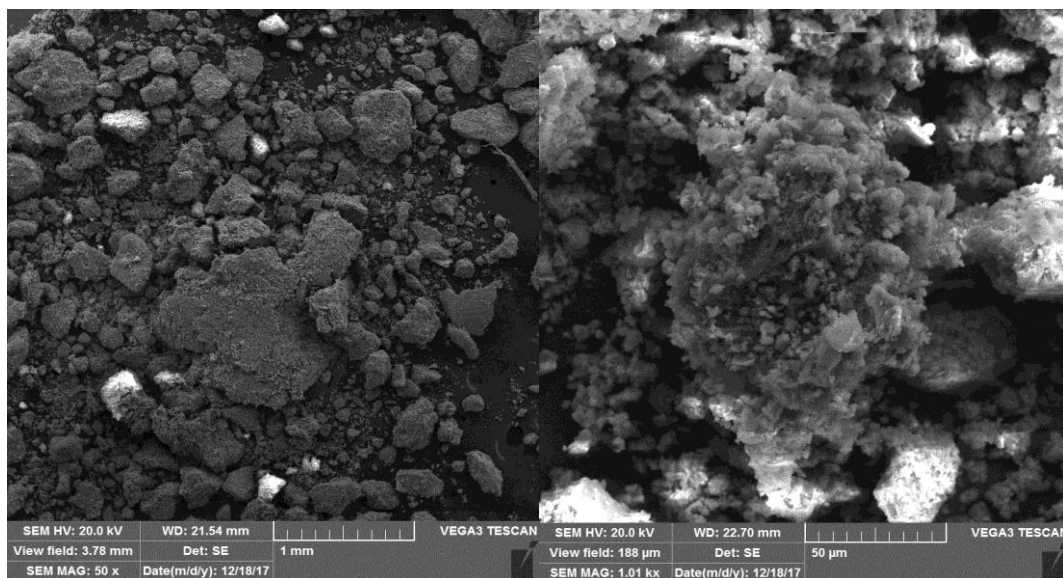
نتایج مربوط ضریب انتقال حرارت مخلوط‌ها در شکل ۱۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود بیشترین کاهش ضریب انتقال حرارت در مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه پرلایت اتفاق افتاده است. کاهش ضریب انتقال حرارت برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پومیس در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ برابر با ۱۳/۳، ۲۸/۸، ۵۶/۶، ۶۷/۷ و ۷۶/۳ درصد بوده است همچنین کاهش مقاومت برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پرلت برابر با ۱۶/۱، ۳۳/۳، ۶۳/۷، ۷۲/۷ و ۷۹/۴ درصد در درصدهای جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد بوده است. این کاهش ضریب انتقال حرارت می‌تواند ناشی از افزایش تخلخل مخلوط‌ها و ضریب انتقال حرارت پایین این سنگدانه‌ها باشد. نتایج ضریب انتقال حرارت نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت نه تنها به چگالی سنگدانه بلکه به نوع سنگدانه بستگی دارد [۲۸].

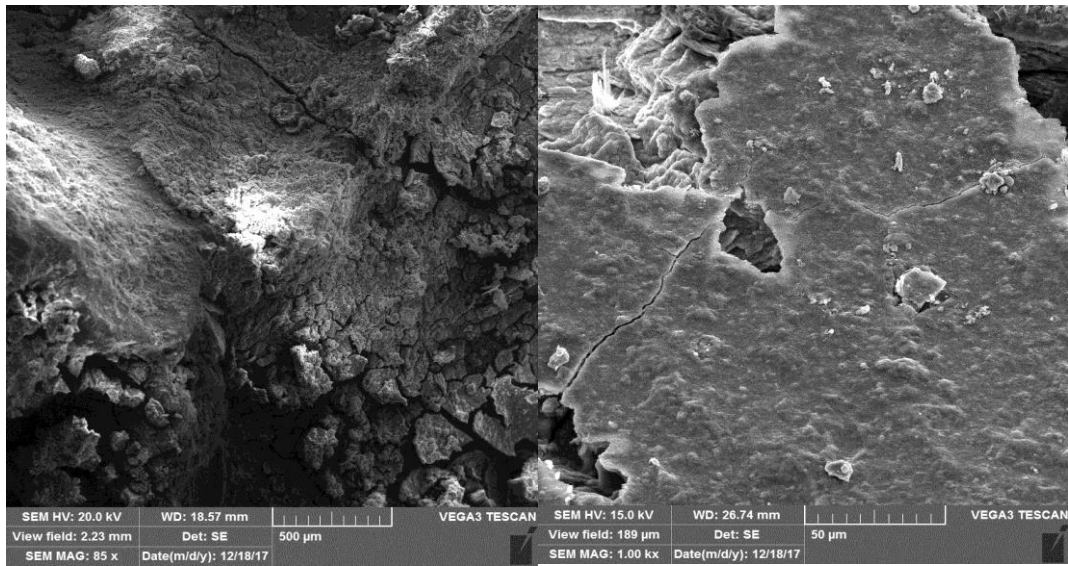


شکل ۱۷. ضریب انتقال حرارت مخلوط‌ها (وات بر متر کلوین)

آنالیز ریز ساختاری

برای بررسی اثر سنگدانه های سبک بر روی ریزساختار ملات‌های پایه سیمانی از عکس میکروسکوپ الکترونی استفاده شد که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. شکل ۱۸-*a* مشخص است ذرات پومیس و پرلیت دارای ساختار متخلخل و تخلخل بالایی می باشد. این تخلخل بالا می تواند یکی از عوامل ضعیف عمل کردن این سنگدانه در مشخصات دوام و مکانیکی مخلوط های حاوی آنها باشد. همچنین یکی از عوامل کاهش مقدار ضریب انتقال حرارت می تواند وجود تخلخل بالا در این سنگدانه ها باشد از آنجایی که هوا عایق گرمایی با عملکرد بالایی می باشد. همان‌طور که در شکل ۱۸-*b* مشاهده می‌شود ریز ترک‌هایی در ماتریکس سیمان شکل گرفته است که می تواند یکی از عوامل تضعیف مقاومت مکانیکی و دوام در مخلوط های مورد بررسی باشد.



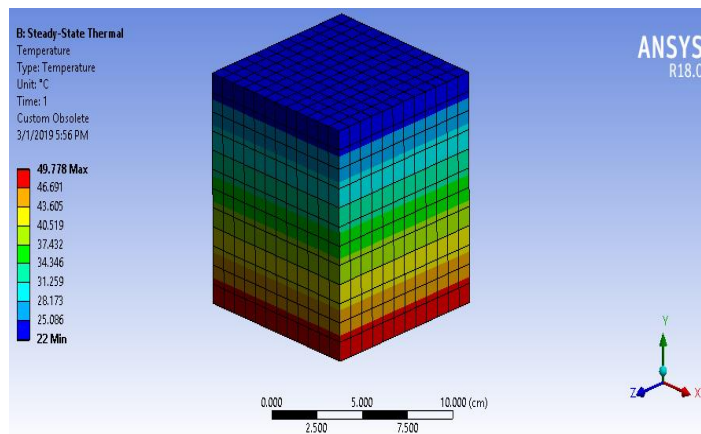


b

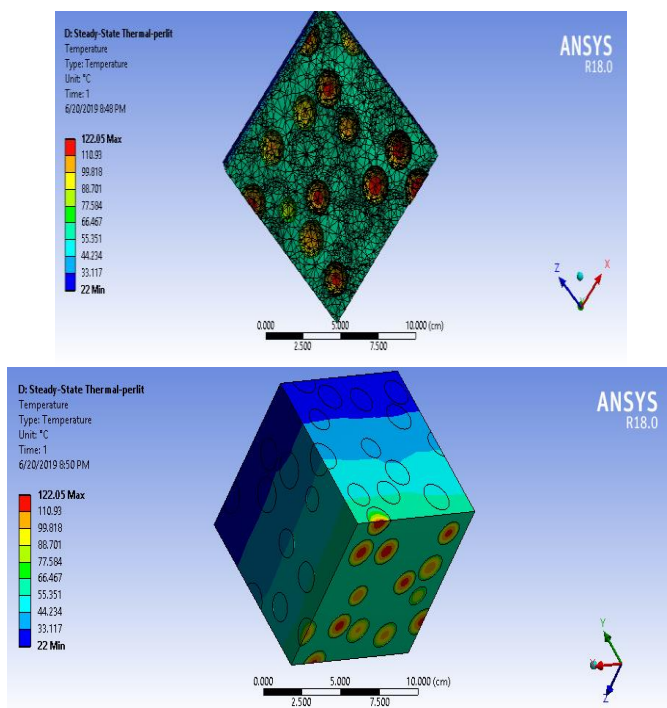
شکل ۱۸. عکس میکروسکوپ الکترونی -a ذرات پومیس و پرلیت -b نمونه حاوی ذرات ۴ درصد سنگدانه سبک

۶-۶- نتایج شبیه سازی عددی حاصل از این تحقیق

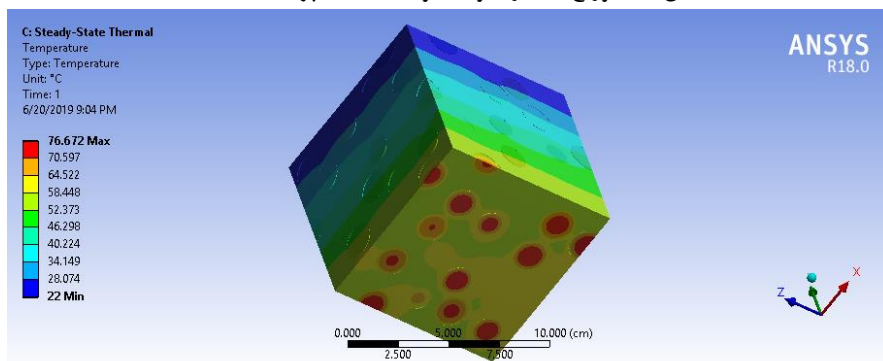
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی عددی رفتار حرارتی ملات بتنی را که قسمتی از سنگدانه های با سنگدانه های پرلیت و پومیس جایگزین شده است را نشان می دهد. همان طور که در اشکال تا ۱۹ تا ۲۱ مشاهده می شود، با اعمال ۵ وات انرژی گرمایی در سطح پایینی نمونه ها، دمای سطح پایین نمونه کنترل تا ۴۹ درجه سانتی گراد افزایش یافته است، در حالی که در نمونه های حاوی سنگدانه پرلیت و پومیس دما به مقادیر ۱۲۲ و ۷۶ درجه سانتی گراد می باشد. دلیل این افزایش دما در نمونه های حاوی سنگدانه پرلیت و پومیس به ضریب انتقال حرارت این سنگدانه های بر می گردد. از آنجایی ضریب انتقال حرارت سنگدانه پرلیت و پومیس به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۱۲ وات بر متر کلوین می باشد و در مقایسه با خمیر سیمان که ضریب انتقال حرارت ۱/۸ وات بر متر کلوین دارد این سنگدانه ها جریان گرما را با نرخ کمتری انتقال می دهند و در نتیجه آن گرما را در خود بیشتر نگه می دارند.



شکل ۱۹. توزیع دما در نمونه کنترل

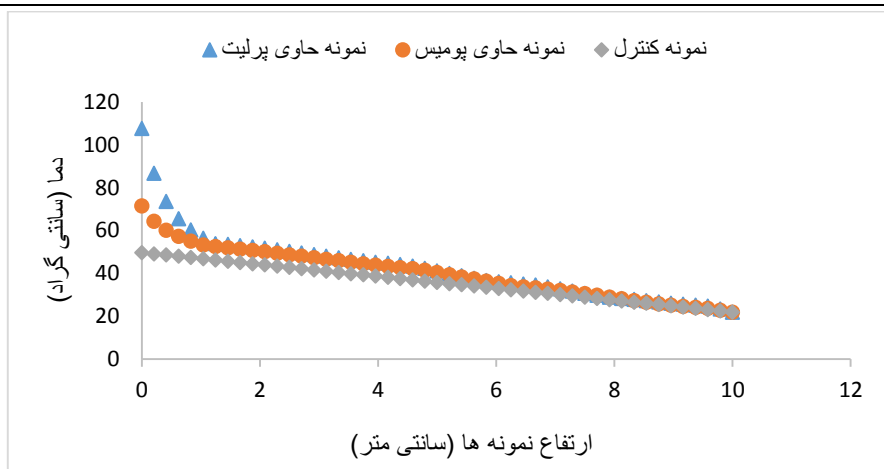


شکل ۲۰. توزیع دما در نمونه حاوی سنگدانه پرلیت



شکل ۲۱- توزیع دما در نمونه حاوی سنگدانه پومیس

شکل ۲۲ توزیع دما را بر روی خطی که وسط سطح پایینی را به سطح بالایی وصل می‌کند، نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت نمونه حاوی سنگدانه پرلیت دارای دمای بیشتری است که نشان می‌دهد این مخلوط‌ها دارای ضریب انتقال حرارت پایین‌تری می‌باشد. مخلوط دارای ضریب انتقال حرارت پایین‌تر، توانایی کمتری در انتقال گرما دارد که خود منجر به افزایش دما در مخلوط دارای ضریب انتقال حرارت پایین‌تر می‌شود که در شکل ۲۲ کاملاً مشخص است.



شکل ۲۲. افزایش دما در ارتفاع نمونه ها

در جدول ۷ نتایج ضریب انتقال حرارت بدست آمده از روش آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی آورده برای نمونه های حاوی ۲۰ درصد پومیس و پرلیت آورده شده است. همان طور که مشخص است نتایج مربوط به شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار می باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مقدار ضریب انتقال حرارت را کمتر از مقدار آزمایشگاهی نشان می دهد که علت آن می تواند این باشد که در روش آزمایشگاهی مقدار پرت حرارتی وجود دارد و مقدار جریان گرما عبوری از نمونه ها کمتر از مقدار تئوریک در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول ۷ مشخص است درصد خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت روش عددی نسبت به روش آزمایشگاهی برای مخلوط های حاوی ۲۰ درصد پومیس و پرلیت برابر با ۹/۳ و ۷/۵ درصد می باشد که درصد خطای قابل قبولی را ارایه کرده است.

جدول ۷. مقایسه نتایج ضریب انتقال حاصل از روش آزمایشگاهی و عددی

مخلوط	PC۲۰	EPC۲۰
ضریب انتقال حرارت بدست آمده روش آزمایشگاهی	۱/۲۸	۱/۲
ضریب انتقال حرارت بدست آمده روش عددی	۱/۴	۱/۲۹

نتایج حاصل از این شبیه سازی کاملاً با نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی مطابقت داشت که خود نشان می دهد می توان با استفاده از شبیه سازی های عددی رفتار حرارتی مخلوط های حاوی مواد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار داد.

۷- نتیجه گیری

۱. مقاومت فشاری تمام مخلوط ها با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک روند کاهشی از خود نشان داده است. کاهش مقاومت در سن ۲۸ روز برای مخلوط های حاوی سنگدانه سبک پومیس در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به ترتیب برابر با ۳۴/۶، ۵۹/۹، ۷۵، ۷۸/۸ و ۸۰/۷ درصد بوده است همچنین کاهش مقاومت برای مخلوط های حاوی سنگدانه سبک پرلیت برابر با ۴۰/۳، ۶۳/۴، ۸۰/۷ و ۸۴ درصد بوده است. این کاهش مقاومت ناشی از ساختار متخلخل و ضعیف سنگدانه های پومیس و پرلیت می باشد.

۲. افزایش جذب آب مخلوط ها به دلیل ساختار متخلخل و چگالی پایین سنگدانه های سبک می باشد که باعث افزایش فضای خالی در نمونه ها شده است و در نتیجه آن جذب حجمی آب افزایش یافته است.

۳. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه سبک چگالی خشک مخلوط‌ها کاهش یافته است در درصد جایگزینی ۵۰ درصد چگالی مخلوط‌های حاوی پومیس و پرلیت به ترتیب برابر ۴۵/۷ و ۵۲ درصد کاهش یافته‌اند. علت این کاهش چگالی پایین‌تر سنگدانه سبک در مقایسه با سنگدانه‌های معمولی می‌باشد. کاهش چگالی بتن می‌تواند در هنگام وقوع زلزله بسیار موثر باشد و نیروی ناشی از زلزله را کاهش دهد.

۴. حجم منافذ قابل نفوذ با کاهش چگالی افزایش یافته است و مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگدانه پرلیت با ۲۸ درصد بالاترین تخلخل را از خود نشان داده است. علت افزایش تخلخل در مخلوط‌ها این است که سنگدانه‌های سبک در مقایسه با سنگدانه معمولی ساختار متخلخل تری دارند در نتیجه جایگزینی آنها با سنگدانه معمولی باعث افزایش تخلخل شده است.

۵. کاهش ضریب انتقال حرارت برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پومیس در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ برابر با ۱۳/۳، ۲۸/۸، ۵۶/۶، ۶۷/۷ و ۷۶/۳ درصد بوده است همچنین کاهش مقاومت برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه سبک پرلیت برابر با ۱۶/۱، ۳۳/۳، ۶۳/۷ و ۷۲/۷ درصد در درصدهای جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد بوده است. این کاهش ضریب انتقال حرارت می‌تواند ناشی از افزایش تخلخل مخلوط‌ها و ضریب انتقال حرارت پایین این سنگدانه‌ها باشد.

۶. نتایج شبیه سازی نشان دادند که استفاده از سنگدانه‌های سبک پرلیت و پومیس باعث کاهش ضریب انتقال حرارت نمونه‌ها می‌شود که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشت. همچنین نتایج عددی نشان دادند که سنگدانه پرلیت در مقایسه با دیگر سنگدانه‌ها از افزایش دمای بیشتری برخوردار بوده و دارای ضریب انتقال حرارت کمتری می‌باشد.

۷. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مقدار ضریب انتقال حرارت را کمتر از مقدار آزمایشگاهی نشان می‌دهد که علت آن می‌تواند این باشد که در روش آزمایشگاهی مقداری پرت حرارتی وجود دارد و میزان جریان گرما عبوری از نمونه‌ها کمتر از مقدار تئوریک در نظر گرفته شده است. درصد خطای محاسبه ضریب انتقال حرارت روش عددی نسبت به روش آزمایشگاهی برای مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد پومیس و پرلیت برابر با ۹/۳ و ۷/۵ درصد می‌باشد که درصد خطای قابل قبولی را ارایه کرده است.

فهرست منابع

- [۱] Akman MS, Tas_demir MA. Perlite concrete as a structural material. In: ۱st National perlite congress, Ankara (Turkey); ۱۹۷۷.
- [۲] Steiger RW, Hurd MK. Lightweight insulating concrete for floors and roof decks. *Concr Const* ۱۹۷۸;۲۳(۷):۴۱۱-۲۲.
- [۳] Akçaözoglu, S., Akçaözoglu, K., & Atiş, C. D. (۲۰۱۳). Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). *Composites Part B: Engineering*, ۴۵(۱), ۷۲۱-۷۲۶.
- [۴] ACI committee ۲۱۳. Guide for structural lightweight aggregate concrete. Report No. ۲۱۳R-۸۷. Detroit, USA: American Concrete Institute; ۱۹۹۹. p. ۲۷.
- [۵] Tay J, Yip W. Sludge ash as lightweight concrete material. *J Environ Eng* ۱۹۸۹;۱۱۵(۱):۵۶-۶۴.
- [۶] Unal O, Uygunoglu T, Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Build Environ* ۲۰۰۷;۴۲(۲):۵۸۴-۹۰.
- [۷] K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, Bond properties of lightweight concrete – A review, *Constr. Build. Mater.* ۱۱۲ (۲۰۱۶) ۴۷۸-۴۹۶.
- [۸] J.A. Bogas, M.G. Gomes, S. Real, Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete, *Mater. Struct.* ۴۸ (۲۰۱۵) ۲۸۶۹-۲۸۸۳.
- [۹] K.M.A. Hossain, M. Lachemi, Mixture design, strength, durability, and fire resistance of lightweight pumice concrete, *ACI Mater. J.* ۱۰۴ (۲۰۰۷) ۴۴۹-۴۵۷.
- [۱۰] M.N. Haque, H. Al-Khaiat, O. Kayali, Long-term strength and durability parameters of lightweight concrete in hot regime: importance of initial curing, *Build. Environ.* ۴۲ (۲۰۰۷) ۳۰۸۶-۳۰۹۲.
- [۱۱] M. Kismi, P. Poullain, P. Mounanga, Transient thermal response of lightweight cementitious composites made with polyurethane foam waste, *Int. J. Thermophys.* ۳۳ (۷) (۲۰۱۲) ۱۲۳۹-۱۲۵۸.
- [۱۲] Lihua Zhu, Jun Dai, Guoliang Bai, Fengjian Zhang, Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks, *Construction and Building Materials* ۹۴ (۲۰۱۵) ۶۲۰-۶۲۸.
- [۱۳] K.H. Kim, S.E. Jeon, J.K. Kim, S. Yang, An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cem. Concr. Res.* ۳۳ (۳) (۲۰۰۳) ۳۶۳-۳۷۱.
- [۱۴] ACI ۲۱۳R-۰۳. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute/۰۱-Jan-۲۰۰۳.
- [۱۵] Arnould M, Virlogeux M. Granulats et bétons légers. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées; ۱۹۸۶, ISBN ۲-۸۵۹۷۸-۰۸۶-۶.
- [۱۶] Ke Y, Beaucour AL, Ortola S, Dumontet H, Cabrillac R. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregate concrete on the mechanical properties of concrete. *Constr Build Mater* ۲۰۰۹;۲۳:۲۸۲۱-۸.

- [۱۷] Ke Y, Ortola S, Beaucour AL, Dumontet H. Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modeling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement Concrete Res* ۲۰۱۰;۴۰:۱۵۹۰-۶۰۰.
- [۱۸] Chandra S, Berntsson L. *Lightweight aggregate concrete*. Noyes Publications/William Andrew Publishing; ۲۰۰۲, ISBN ۰-۸۱۵۵-۱۴۸۶-۷.
- [۱۹] Zhang MH, Gjorv OE. Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete. *ACI Mater J* ۱۹۹۱;March–April:۱۵۰–۸.
- [۲۰] Kockal NU, Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Mater Des* ۲۰۱۱;۳۲:۲۳۹۶–۴۰۳.
- [۲۱] Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., Tasdemir, M.A., ۲۰۱۱. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy Build.* ۴۳, ۶۷۱-۶۷۶
- [۲۲] Demirboga, R., Kan, A., ۲۰۱۲. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Constr. Build. Mater.* ۳۰, ۷۳۰-۷۳۴
- [۲۳] BS ۱۸۸۱ Part ۱۱۶, Method for determination of compressive strength of concrete, British Standard, ۱۹۸۳.
- [۲۴] ASTM C۶۴۲, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM C۶۴۲, ۱۹۹۷.
- [۲۵] NT Build ۴۹۲ - Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials - Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments. NT Build ۴۹۲, ۱۹۹۹.
- [۲۶] Saeed shekveh, (۲۰۲۰). Existence of at least three weak solutions for a quasilinear elliptic system. *Journal of New Researches in Mathematics*.
- [۲۷] Khaleghi Moghadam, M., Tersian, S., & Avci, M. (۲۰۲۰). A Variational Approach To The Existence Of Infinitely Many Solutions For Difference Equations. *Journal of New Researches in Mathematics*, ۵(۲۲), ۹۹-۱۱۰.
- [۲۸] Amini, E., & Ebadian, A. (۲۰۲۰). Numerical Solution and Error Analysis for Linear and Nonlinear Delay Differential Equations. *Journal of New Researches in Mathematics*.
- [۲۹] Youm, K. S., Moon, J., Cho, J. Y., & Kim, J. J. (۲۰۱۶). Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*, ۱۱۴, ۵۱۷-۵۲۷.
- [۳۰] J.L. Clarke. *Structural lightweight aggregate concrete*. Blackie Academic & Prof; ۲۰۰۵, pp. ۱۶۱.
- [۳۱] Rasekhi Sahneh, A. R., Dashti Rahmatabadi, M. A., Madani, H., & Dehghan Manshadi, H. (۲۰۲۳). A Comprehensive Investigation on the Influence of Zeolite, Pumice, and Limestone Powder on the Characteristics of Eco- Friendly Calcium Aluminate Cement Mixes. *Advances in Materials Science and Engineering*, ۲۰۲۳(۱), ۱۴۳۳۶۱۲.
- [۳۲] Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z. F. B. A., & Mahyuddin, N. B. (۲۰۱۸). Thermal conductivity of concrete—A review. *Journal of Building Engineering*, ۲۰, ۸۱-۹۳.