مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای مختلف در خواص بتن‌های سبک‌دانه‌ی سازه‌یی

مجتبی فتحی* (استادیار)

عابد یوسفی‌پور (کارشناس ارشد)

احسان همت پوری فرخی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه رازی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۲-۱۳۴، (پادداشت فنی)

در پژوهش حاضر، خصوصیات مکانیکی بتن‌های سبک سازه‌یی حاوی سبک‌دانه‌ی اسکرپا با تغییر پارامترهای مختلف، از قبیل: استفاده از پودر میکروسیلیس و نانوسیلیس، سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده، عیارهای مختلف سیمان و انواع عمل‌آوری‌ها مطالعه شده است. در بتن‌های بدون سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده، جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس به ترتیب تا مقدار ۱۵٪ و ۳٪ و در بتن‌های با ۲۰٪ از سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده، جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس به ترتیب تا مقدار ۱۰٪ و ۲٪، منجر به افزایش مقاومت فشاری و کاهش جذب آب شده است. با جایگزینی هر ۵٪ میکروسیلیس و یا هر ۱٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد افزایش و میزان جذب آب حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده با دیگر اجزاء بتن، چسبندگی کافی را ندارند که با افزودن میکروسیلیس و نانوسیلیس چسبندگی مناسب ایجاد شده است که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌ها هم‌گویی آن است.

واژگان کلیدی: بتن سبک سازه‌یی، سبک‌دانه‌ی اسکرپا، سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده، میکروسیلیس، نانوسیلیس.

۱. مقدمه

به دلیل سبکی بسیار زیاد سبک‌دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده^۱ EPS استفاده از آن‌ها در بتن باعث کاهش قابل توجه چگالی بتن می‌شود و همچنین دانه‌های مذکور، مقاومت بتن را با کاهش مواجه می‌کنند. بتن‌های با دانه‌های EPS، شکستی تدریجی و آهسته دارند، در حالی که بتن‌های بدون EPS، شکستی ترد و سریع دارند. در بتن‌های با EPS و چگالی برابر، استفاده از دانه‌های EPS با اندازه‌ی کوچک‌تر، سبب مقاومت بیشتر بتن می‌شود. در پژوهشی بر روی خواص بتن‌های سبک‌دانه (۲۰۱۳)^۲، با استفاده از ترکیب‌هایی مختلف از ریزدانه و درشت‌دانه‌ی خاکستر بادی، بتن‌های با چگالی ۱۷۷۳ تا ۲۰۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب تولید شده و این نتیجه به‌دست آمده است که برای رسیدن به یک اسلامپ معین، افزایش مقدار دانه‌های خاکستر بادی، نیاز به افزایش‌دهی شیمیایی را کاهش می‌دهد که این به دلیل شکل‌گرد دانه‌های خاکستر بادی است که باعث لغزیدن آن‌ها بر روی یکدیگر و نیز منجر به بالا رفتن روانی و اسلامپ بتن می‌شوند.

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال^۳، خواص انتقال در بتن‌های توانمند حاوی پوزولان متاکائولین در مقایسه با میکروسیلیس بررسی شده و این نتایج به دست آمده است که متاکائولین در بهبود پارامترهای دوام بتن به‌خصوص در کاهش جذب آب مویینه، افزایش مقاومت الکتریکی و مقاومت نفوذپذیری گاز بهتر از

بتن سبک سازه‌یی نوعی از بتن است که چگالی معادل در محدوده‌ی ۱۹۲۰-۱۱۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارد.^۱ به خاطر مزایای عملی استفاده از بتن سبک‌دانه در سال‌های اخیر، بتن سبک‌دانه به‌عنوان یکی از مصالح سازه‌یی شناخته شده و تقاضا برای استفاده از آن در حال افزایش است. مصالح سبک وزنی که از آن‌ها به‌عنوان سنگ‌دانه در ساخت بتن استفاده می‌شود، محدوده‌ی وسیعی دارند و با به کار بردن مصالح و روش‌های مناسب، چگالی بتن می‌تواند از ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر کند و مقاومت‌های متناظر آن‌ها در حدود ۳ مگاپاسکال و در برخی موارد بیش از ۶۰ مگاپاسکال است. می‌توان با استفاده از سبک‌دانه‌ها و یا ترکیب با دانه‌های پلی‌استایرن، به بتن سبک سازه‌یی با مقاومت فشاری استوانه‌یی استاندارد بالای ۱۷ مگاپاسکال دست یافت.

مطالعات قابل توجهی در سال ۲۰۱۴^۲، بر روی بتن‌های با دانه‌های پلی‌استایرن انجام و نشان داده شده است که می‌توان با افزودن میکروسیلیس و یا افزودنی‌های دیگر به ماتریس بتن، خواص مکانیکی بتن را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۱۰، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2018.1335

fathim@razi.ac.ir
abed.yousefi2000@yahoo.com
e.hematpour@yahoo.com

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ریزدانه‌ی اسکرپا و حدود مجاز ASTM.

شکل ۲. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه‌ی اسکرپا و حدود مجاز ASTM.

است. نانوسیلیس به کار برده شده، خلوص بیش از ۹۹٪ با دانه‌بندی ۱۱ الی ۱۳ نانومتر و میکروسیلیس مورد استفاده، چگالی توده‌ی ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و دانه‌بندی ۰/۲ الی ۰/۳ میکرون داشته‌اند که مشخصات شیمیایی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ماده‌ی حباب‌زا نیز از نوع HBS-B2۸۰ بوده است.

۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش

سنگ‌دانه‌ها قبل از استفاده در بتن، به مدت یک هفته در آب غرقاب شدند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه داخل الک ریخته شدند تا آب اضافی آن‌ها خارج شود و سطح آن‌ها خشک و در حالت اشباع سطح خشک (SSD) استفاده شوند. برای رفع مشکل جداشدگی و آمدن دانه‌های سبک و آبگریز EPS به سطح بتن، از پودر میکروسیلیس و یا نانوسیلیس استفاده شده است. این پودرها سبب چسبندگی بیشتر سبک‌دانه‌های مذکور با سایر اجزاء بتن شده و بتن یکپارچه‌تری را موجب شده‌اند.

در مخلوط‌های بتنی، از ماده‌ی حباب‌زا به مقدار ۵٪ وزن سیمان و برای نگه داشتن اسلامپ در محدوده‌ی ۵-۸ سانتی‌متر، کمترین مقدار ممکن فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اتر استفاده شده است. به خاطر سطح زیاد و جذب آب بسیار زیاد میکروسیلیس و نانوسیلیس، نمونه‌های حاوی آن‌ها بیشترین نیاز به فوق روان‌کننده را داشتند. از آنجاکه دانه‌های EPS سطحی صاف و آبگریز دارند، موجب بالا رفتن اسلامپ بتن می‌شوند؛ لذا با جایگزینی ۲۰٪ از EPS با درشت‌دانه‌ی اسکرپا، نسبت آب به سیمان به مقدار ۵٪ کاهش یافته است. نمونه‌های با EPS ۲۰٪، در عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری کمتر از حد مجاز آیین‌نامه

میکروسیلیس عمل کرده است. در بررسی خواص مکانیکی، دوام و ریزاختر بتن‌های حاوی نانوسیلیس و دوده‌ی سیلیسی در پژوهشی در سال ۱۳۹۰، [۵] نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت فشاری با افزایش نانوسیلیس بوده و همچنین نتایج نشان داده است که نانوسیلیس اثر بیشتری در کاهش نفوذپذیری بتن در مقابل آب و یون کلراید و افزایش مقاومت الکتریکی بتن در مقایسه با دوده‌ی سیلیس به خصوص در سنین اولیه دارد. همچنین در بررسی و مقایسه‌ی خواص مقاومت فشاری بتن حاوی خرده‌لاستیک و پودر لاستیک به همراه میکروسیلیس در همان سال، [۶] نتایج پژوهش مذکور نشان‌دهنده‌ی بهبود نحوه‌ی شکست و افزایش مقاومت در بتن حاوی لاستیک و میکروسیلیس بوده است. در مطالعه‌ی دیگری [۷]، (۲۰۱۴) بر روی خواص مکانیکی و گرمایی بتن‌های سبک حاوی پلی‌استایرن و ورمیکولیت نیز این نتایج به‌دست آمده است که به دلیل جذب آب زیاد سبک‌دانه‌ها، آب داخل آن‌ها در بتن برای عمل‌آوری داخلی بتن استفاده می‌شود و از این جهت بتن سبک نسبت به بتن معمولی مزیت دارد. به دلیل وجود حفره‌های هوا در بتن‌های سبک‌دانه، بتن‌های سبک‌دانه عایق گرمایی خوبی هستند و بتن‌های با پلی‌استایرن نسبت به بتن‌های با ورمیکولیت مقاومت بیشتری دارند و همچنین وزن مخصوص پایین‌تری دارند که نشان‌دهنده‌ی مزیت پلی‌استایرن نسبت به ورمیکولیت است. همچنین در پژوهشی در سال ۱۳۹۵، [۸] این نتیجه به‌دست آمده است که با جایگزینی ۱۰٪ خاکستر کوره‌ی بلند با ریزدانه‌ی طبیعی، بتن سبک‌سازایی با چگالی خشک شده در آون ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قابل دست‌یابی است و با استفاده از سبک‌دانه‌های متخلخل، هدایت حرارتی بتن در مقایسه با بتن کنترل (بتن معمولی) تا ۷۰٪ کمتر می‌شود و هنگامی که مقدار خاکستر کوره‌ی بلند، بیشتر جایگزین ریزدانه‌ی طبیعی شود، هدایت حرارتی بتن به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد که به دلیل تخلخل بیشتر خاکستر کوره‌ی بلند است. در پژوهش دیگری در همان سال، [۹] مشخص شده است که افزودن نانوسیلیس به بتن سبک باعث کاهش نفوذپذیری آب و افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر می‌شود. لذا در نوشتار حاضر، اثر دانه‌های پلی‌استایرن، میکروسیلیس و نانوسیلیس، میزان عیار سیمان و انواع روش‌های عمل‌آوری بتن بر روی مقاومت فشاری، جذب آب، نوع شکست و ریزاختر بتن بررسی و خواص فیزیکی و مکانیکی بتن مطالعه شده است.

۲. مصالح، نحوه‌ی انجام آزمایش و نمونه‌های

مورد مطالعه

۱.۲. مصالح

سیمان مورد استفاده در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM-C۱۵۰ بوده است. ریزدانه‌ی مورد استفاده از نوع سبک‌دانه‌ی اسکرپا و درشت‌دانه مورد استفاده از نوع سبک‌دانه‌ی اسکرپا و دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده (EPS) هستند. دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده‌ی (EPS) مورد استفاده، محصولی فراوری شده (گرانول) و با اندازه‌ی ۲-۴ میلی‌متر بوده است که در طرح اختلاط، جایگزین درشت‌دانه‌ی اسکرپا شده‌اند. ریزدانه‌ی اسکرپا با جذب آب نیم‌ساعته، یک روزه و ۷ روزه به ترتیب ۱۹/۶، ۲۱/۹ درصد و درشت‌دانه‌ی اسکرپا با جذب آب نیم‌ساعته، یک روزه و ۷ روزه به ترتیب ۱۲/۲، ۱۶/۷ و ۱۹/۵ درصد بوده‌اند. ریزدانه‌ی اسکرپا (ماسه‌ی اسکرپا)، مدول نرمی ۲/۶۳ داشته و اندازه‌ی درشت‌دانه‌ی اسکرپا، به ۹/۵ میلی‌متر محدود شده است. نمودار دانه‌بندی ریزدانه‌ی اسکرپا در شکل ۱ و همچنین درشت‌دانه‌ی اسکرپا در شکل ۲ ارائه شده

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند، نانوسیلیس، میکروسیلیس و اسکر یا.

ترکیب	سیمان پرتلند	نانوسیلیس	میکروسیلیس	اسکر یا
SiO ₂ (%)	۲۷ ± ۰/۳	≥ ۹۹	۸۵-۹۲	۴۸/۳۷
CaO(%)	۶۵ ± ۰/۵	-	MAX۱/۵	۸/۴۳
Al ₂ O ₃ (%)	۵/۲ ± ۰/۲	-	MAX۱	۱۲/۴۹
Fe ₂ O ₃ (%)	۴/۶ ± ۰/۲	-	MAX۲	۸/۰۷
C(%)	-	-	MAX۲	-
P ₂ O ₅ (%)	-	-	-	۱/۷۹
MnO(%)	-	-	-	۰/۱۱۸
TiO ₂ (%)	-	-	-	۱/۷۸
MgO(%)	۱/۸ ± ۰/۲	-	MAX۲	۹/۵۸
SO ₃ (%)	۲/۲ ± ۰/۴	-	-	۰/۳۱
Na ₂ O(%)	۰/۱۵ ± ۰/۰۵	-	-	۴/۶۳
Free CaO(%)	۱/۳ ± ۰/۲	-	-	-
C ₂ S(%)	۱۴/۴۸	-	-	-
C ₃ S(%)	۵۹/۴۷	-	-	-
C ₂ A(%)	۶	-	-	-
C ₂ AF(%)	۱۴	-	-	-
Ti(%)	-	≤ ۱۲۰ ppm	-	-
Ca(%)	-	≤ ۷۰ ppm	-	-
Na(%)	-	≤ ۵۰ ppm	-	-
Fe(%)	-	≤ ۲۰ ppm	-	-
Loss on ignition(%)	۱ ± ۰/۵	-	MAX۳	-
Insoluble residue(%)	۰/۴ ± ۰/۱	-	-	-

شکل ۳. عکس سطح پرداخت شده‌ی بتن تازه و سخت شده با EPS حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس و نانوسیلیس.

۱۱۰-۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نمونه‌های حاوی EPS در آون با دمای زیر ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک شدند.

۳.۲. نمونه‌های مورد مطالعه

به منظور بررسی اثر پودر میکروسیلیس و نانوسیلیس در خواص بتن و یافتن مقادیر بهینه‌ی آن‌ها از مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان پودر میکروسیلیس و ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی سیمان پودر نانوسیلیس به صورت جایگزین سیمان استفاده شده است. خلاصه‌ی مقادیر نسبت‌های اختلاط در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۳، تصویر سطح پرداخت شده‌ی بتن تازه و سخت شده‌ی حاوی دانه‌های

داشتند و لذا در مطالعه‌ی حاضر حذف شدند. چگالی تمامی نمونه‌های ساخته شده بین ۱۵۶۵ تا ۱۷۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب (در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه‌ی ACI۲۱۳) به دست آمد. در روش عمل‌آوری با بخار آب، اتاقک بخار درجه حرارت حدود ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت حدود ۹۰٪ بوده است.

در روش عمل‌آوری با آب آهک، از مخلوط آب و آهک با غلظت ۴ گرم آهک در یک لیتر آب استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری بر طبق ASTM-C۳۹^[۱۰] انجام شده است. جذب آب اولیه‌ی نیم ساعته و جذب آب نهایی براساس استاندارد BS ۱۸۸۱^[۱۱] بر روی نمونه‌ها انجام شده است. در آزمایش تعیین جذب آب، برای خشک شدن نمونه‌ها، نمونه‌های بدون EPS درون آون (Oven) با دمای

جدول ۲. نسبت‌های اختلاط بتن‌های سبک.

شماره‌ی نمونه	سیمان (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	نانوسیلیس (kg/m^3)	آب به مواد سیمانی	فوق روان‌کننده (درصد وزنی مواد سیمانی)	حباب هواساز (درصد وزنی مواد سیمانی)	سنگ‌دانه‌ها (kg/m^3)		
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۴۵۰	۰	۰	۰/۴	۰	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲	۴۲۲/۵	۲۲/۵	۰	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳	۴۰۵	۴۵	۰	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۴	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۰	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۵	۳۶۰	۹۰	۰	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۶	۴۴۵/۵	۰	۴/۵	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۷	۴۴۱	۰	۹	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۸	۴۳۶/۵	۰	۱۳/۵	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۹	۴۳۲	۰	۱۸	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۱۰	۴۵۰	۰	۰	۰/۳۵	۰	۵	۲۳۶	۶۵۰	۲/۵۵
۱۱	۴۲۲/۵	۲۲/۵	۰	۰/۳۵	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۲	۴۰۵	۴۵	۰	۰/۳۵	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۳	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۰	۰/۳۵	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۴	۴۴۵/۵	۰	۴/۵	۰/۳۵	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۵	۴۴۱	۰	۹	۰/۳۵	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۶	۴۳۶/۵	۰	۱۳/۵	۰/۳۵	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۱۷	۴۰۰	۰	۰	۰/۴	۰	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۱۸	۳۸۰	۲۰	۰	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۱۹	۳۶۰	۴۰	۰	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۰	۳۴۰	۶۰	۰	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۱	۳۲۰	۸۰	۰	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۲	۳۹۶	۰	۴	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۳	۳۹۲	۰	۸	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۴	۳۸۸	۰	۱۲	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۵	۳۸۴	۰	۱۶	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۲۶	۴۰۰	۰	۰	۰/۳۵	۰	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۲۷	۳۸۰	۲۰	۰	۰/۳۵	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۲۸	۳۶۰	۴۰	۰	۰/۳۵	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۲۹	۳۴۰	۶۰	۰	۰/۳۵	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۳۰	۳۹۶	۰	۴	۰/۳۵	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۳۱	۳۹۲	۰	۸	۰/۳۵	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۳۲	۳۸۸	۰	۱۲	۰/۳۵	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۲/۵۵
۳۳	۳۵۰	۰	۰	۰/۴	۰	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۴	۳۳۲/۵	۱۷/۵	۰	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۵	۳۱۵	۳۵	۰	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۶	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۰	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۷	۲۸۰	۷۰	۰	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۸	۳۴۶/۵	۰	۳/۵	۰/۴	۰/۲	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۳۹	۳۴۳	۰	۷	۰/۴	۰/۴	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۴۰	۳۳۹/۵	۰	۱۰/۵	۰/۴	۰/۶	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰
۴۱	۳۳۶	۰	۱۴	۰/۴	۰/۸	۵	۳۷۲	۶۵۰	۰

هیدروکسید کلسیم، طی فرایند هیدراسیون سیمان، منجر به تولید فرآورده‌های سیمانی اضافی می‌شوند که این امر باعث اصلاح و بهبود ساختار بتن به واسطه‌ی تبدیل هیدروکسید کلسیم به ژل C-S-H می‌شود.

مقدار بیش از حد مواد سیلیسی مذکور و کمبود آهک آزاد شده‌ی کافی برای ایجاد واکنش، موجب کلوخه شدن سیلیس اضافی در بتن می‌شود که کمکی به افزایش مقاومت نمی‌کند و می‌تواند باعث به‌وجود آمدن نواحی ضعیف در بتن و به‌خصوص در ناحیه‌ی انتقالی بین خمیر سیمان و سبک‌دانه شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت شود. با افزایش عیار سیمان از ۳۵۰ به ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است. این افزایش مقاومت به خاطر نیاز سبک‌دانه‌های متخلخل اسکریا به خمیر سیمان بیشتر برای پر کردن منافذ داخل آن‌هاست. این افزایش مقاومت به گونه‌یی است که به ازاء افزایش هر ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان، مقاومت بتن به‌طور متوسط حدود ۱۸٪ افزایش می‌یابد.

در بتن‌های با EPS نیز همچون بتن‌های بدون EPS، جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس باعث افزایش قابل توجه مقاومت‌های اولیه و نهایی شده است. در بتن‌های با EPS، درحالت جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس و یا ۲٪ نانوسیلیس،

EPS، در بتن‌های بدون میکروسیلیس و نانوسیلیس و بتن‌های حاوی مقادیر مختلف از آن‌ها ارائه شده است.

۳. نتایج آزمایش‌ها و بحث

۱.۳. مقاومت فشاری

نتایج مربوط به میانگین مقاومت فشاری استوانه‌ی استاندارد ۱، ۷، و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بتنی ساخته شده برای همه‌ی روش‌های عمل‌آوری، در حالت بدون EPS در شکل ۴ و در حالت با EPS در شکل ۵ ارائه شده است.

در بتن‌های بدون دانه‌های EPS، با جایگزینی میکروسیلیس تا ۱۵٪ و یا نانوسیلیس تا ۳٪ وزن سیمان، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از آن با افزایش بیشتر مواد مذکور، مقاومت فشاری روندی کاهشی پیدا کرده است. به ازاء افزایش هر ۵٪ میکروسیلیس و یا هر ۱٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری حدود ۱۲ الی ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. میکروسیلیس و به‌خصوص نانوسیلیس، علاوه بر ریزدانه بودن و بالا بودن سطح ذرات و اثر پرکنندگی آن‌ها، خاصیت پوزولانی دارند و با واکنش با

شکل ۴. نمودار مقاومت فشاری بتن‌های سبک بدون EPS.

شکل ۵. نمودار مقاومت فشاری بتن‌های سبک با ۲۰٪ EPS.

بدون EPS مقاومت ۷ روزه را ۸/۳٪ افزایش و مقاومت ۲۸ روزه را ۶/۲٪ کاهش می‌دهد و برای نمونه‌های با EPS مقاومت ۷ روزه را ۵/۹٪ افزایش و مقاومت ۲۸ روزه را ۵/۲٪ کاهش می‌دهد.

با مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری نمونه‌های دارای نانوسیلیس (جدول‌های ۵ و ۶) مشاهده می‌شود که عمل‌آوری با بخار نسبت به عمل‌آوری با آب آهک برای نمونه‌های بدون EPS، مقاومت ۷ روزه را ۳٪ افزایش و مقاومت ۲۸ روزه را ۱۰/۳٪ کاهش می‌دهد و برای نمونه‌های با EPS، مقاومت ۷ روزه را ۸/۳٪ افزایش و مقاومت ۲۸ روزه را ۱۴٪ کاهش می‌دهد.

همچنین در تمام نمونه‌ها (نمونه‌های با میکروسیلیس و نانوسیلیس) نمونه‌های عمل‌آوری شده با آب مقاومت ۷ روزه‌ی کمتر و مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بیشتر نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده با بخار هستند. به منظور بررسی و مقایسه‌ی اقتصادی نمونه‌ها، با توجه به اینکه مقدار ایده‌آل نانوسیلیس ۳٪ وزنی سیمان و میکروسیلیس ۱۵٪ وزنی سیمان به‌دست آمده است، لذا از نظر اقتصادی، قیمت نانوسیلیس موجود در یک مترمکعب بتن در حدود ۲۳ برابر قیمت میکروسیلیس موجود در ۱ مترمکعب بتن است. بنابراین به‌طور کلی قیمت ۱ مترمکعب بتن حاوی ۳٪ نانوسیلیس، بیش از ۵ برابر قیمت ۱ مترمکعب بتن حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس است.

۲.۳. جذب آب

نتایج مربوط به جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی نمونه‌های بتنی در حالت بدون EPS در شکل ۶ و در حالت با EPS در شکل ۷ ارائه شده است. در بتن‌های بدون EPS، با افزایش مقاومت و تراکم بتن، درصد جذب آب در نمونه‌ها کمتر

بیشترین مقاومت کسب شده و با جایگزینی بیشتر پودر میکروسیلیس و نانوسیلیس، مقاومت اندکی کاهش یافته است.

کمتر بودن مقدار درصد بهینه‌ی میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن‌های با دانه‌های EPS، به دلیل حضور دانه‌های بدون منفذ پلی‌استایرن و عدم نفوذ خمیر سیمان و میکروسیلیس و یا نانوسیلیس به داخل آن است؛ و یا به عبارتی، کمتر بودن مقدار درشت‌دانه‌های اسکرپا و به تبع وجود منافذ کمتر و در نتیجه نیاز به مواد سیلیسی و ژل سیلیکاتی تولید شده کمتر است. مواد سیلیسی، اغلب مقاومت ۲۸ روزه را مقداری بیشتر از مقاومت ۷ روزه افزایش داده‌اند که این به دلیل تکمیل شدن واکنش میکروسیلیس و نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم آزاد شده‌ی ناشی از واکنش هیدراتاسیون سیمان به مرور زمان است. در این بتن‌ها، به‌ازاء افزایش هر ۵٪ میکروسیلیس و یا ۱٪ نانوسیلیس، مقاومت فشاری حدود ۱۱ الی ۱۴ درصد و با افزایش هر ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان، مقاومت حدود ۱۴٪ افزایش یافته است. در همه‌ی بتن‌های مورد آزمایش، نوع عمل‌آوری در مقاومت‌های اولیه و نهایی تأثیرگذار بوده است. روش عمل‌آوری با آب آهک منجر به کسب بیشترین مقاومت ۲۸ روزه شده است. زیرا عمل‌آوری در آب آهک و اعمال نکردن شرایط حرارتی سبب شکل‌گیری گند ریزاختر بتن و کسب مقاومت‌های بالاتر می‌شود. در عمل‌آوری با بخار آب، کسب مقاومت سریع بوده و مقاومت یک روزه‌ی قابل توجهی به‌دست آمده است. لذا بیشترین مقاومت ۷ روزه و کمترین مقاومت ۲۸ روزه را داشته است و این به خاطر فرایند هیدراتاسیون اولیه‌ی سریع و ایجاد یک توزیع غیریکتواخت و ناهمگن از فراورده‌های هیدراتاسیون بوده است.

با مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری نمونه‌های با میکروسیلیس (جدول‌های ۳ و ۴) مشاهده می‌شود که عمل‌آوری با بخار نسبت به عمل‌آوری با آب آهک برای نمونه‌های

شکل ۶. نمودار جذب آب بتن‌های سبک بدون EPS.

شکل ۷. نمودار جذب آب بتن‌های سبک با EPS.

جدول ۳. مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری در مقاومت فشاری نمونه‌های بدون EPS با ۱۵٪ میکروسیلیس.

رده‌ی بتن	عمل‌آوری					
	۷ روزه‌ی بخار	۷ روزه‌ی آب	۷ روزه‌ی آب آهک	۲۸ روزه‌ی بخار	۲۸ روزه‌ی آب	۲۸ روزه‌ی آب آهک
C۴۵۰	۳۰٫۸۸	۲۹	۳۰	۳۹	۴۰	۴۰
C۴۰۰	۲۷٫۵	۲۵٫۵	۲۶٫۷۵	۳۱٫۷۵	۳۳	۳۵٫۵
C۳۵۰	۲۷٫۵	۲۱	۲۲٫۵	۲۹	۲۹٫۲۵	۳۰٫۵
میانگین	۲۸٫۶	۲۵٫۲	۲۶٫۴	۳۳٫۲۵	۳۴٫۱	۳۵٫۳

جدول ۴. مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری در مقاومت فشاری نمونه‌های با EPS با ۱۰٪ میکروسیلیس.

رده‌ی بتن	عمل‌آوری					
	۷ روزه‌ی بخار	۷ روزه‌ی آب	۷ روزه‌ی آب آهک	۲۸ روزه‌ی بخار	۲۸ روزه‌ی آب	۲۸ روزه‌ی آب آهک
C۴۵۰	۱۹٫۹۸	۱۸٫۶۵	۱۹٫۱	۲۹٫۳۲	۲۹٫۶۵	۲۹٫۹۹
C۴۰۰	۱۵٫۷۷	۱۳٫۶۹	۱۴٫۷۳	۲۰٫۳۳	۲۲٫۱	۲۲٫۲
میانگین	۱۷٫۹	۱۶٫۲	۱۶٫۹	۲۴٫۸	۲۵٫۹	۲۶٫۱

جدول ۵. مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری در مقاومت فشاری نمونه‌های بدون EPS با ۳٪ نانوسیلیس.

رده‌ی بتن	عمل‌آوری					
	۷ روزه‌ی بخار	۷ روزه‌ی آب	۷ روزه‌ی آب آهک	۲۸ روزه‌ی بخار	۲۸ روزه‌ی آب	۲۸ روزه‌ی آب آهک
C۴۵۰	۳۱	۲۹	۳۰	۳۵	۳۷٫۵	۳۸
C۴۰۰	۲۸٫۶	۲۵٫۹	۲۷٫۱۸	۳۰	۳۱٫۵	۳۳
C۳۵۰	۲۳	۲۲	۲۳	۲۵	۲۷٫۷۵	۲۸٫۲۵
میانگین	۲۷٫۵	۲۵٫۶	۲۶٫۷	۳۰	۳۲٫۲۵	۳۳٫۱

جدول ۶. مقایسه‌ی تأثیر عمل‌آوری در مقاومت فشاری نمونه‌های با EPS با ۲٪ نانوسیلیس.

رده‌ی بتن	عمل‌آوری					
	۷ روزه‌ی بخار	۷ روزه‌ی آب	۷ روزه‌ی آب آهک	۲۸ روزه‌ی بخار	۲۸ روزه‌ی آب	۲۸ روزه‌ی آب آهک
C۴۵۰	۱۸٫۵	۱۷	۱۷٫۵	۲۳٫۵	۲۶٫۵	۲۷
C۴۰۰	۱۷٫۴۳	۱۵٫۳۵	۱۵٫۷۷	۲۰٫۹۲	۲۲٫۱	۲۳٫۵۸
میانگین	۱۷٫۹۶	۱۶٫۲	۱۶٫۶	۲۲٫۲	۲۴٫۳	۲۵٫۳

خواهد شد. به عبارتی دیگر، همان عواملی که در افزایش مقاومت بتن مؤثر بودند، در کاهش جذب آب مؤثرند. در این حالت نیز درصد بهینه‌ی کاهش جذب آب برای میکروسیلیس ۱۵٪ و برای نانوسیلیس ۳٪ است. به گونه‌یی که با جایگزینی هر ۵٪ میکروسیلیس یا هر ۱٪ نانوسیلیس، جذب آب حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

بتن‌های با EPS مقدار جذب آب کمتری نسبت به بتن‌های بدون EPS دارند. این به‌خاطر آبگریز بودن و سطح صاف و بدون حفره‌ی دانه‌های EPS و عدم جذب آب توسط آن‌ها و کمتر شدن کل حفره‌های داخل بتن است. همچنین در بتن‌های با EPS، درصد بهینه‌ی میکروسیلیس و نانوسیلیس برای کاهش مقدار جذب به ترتیب برابر ۱۰ و ۲ درصد وزنی سیمان است. به گونه‌یی که با جایگزینی هر ۵٪ میکروسیلیس و یا هر ۱٪ نانوسیلیس جذب آب بتن به‌طور متوسط حدود ۱۶ تا ۱۹ درصد کاهش یافته است. نحوه‌ی عمل‌آوری بتن نیز در میزان جذب آب بتن تأثیرگذار بوده است. به گونه‌یی که درصد جذب آب در روش عمل‌آوری با آب آهک نسبت به عمل‌آوری با آب، حدود ۴٪ و نسبت به

عمل‌آوری با بخار آب حدود ۸٪ کاهش یافته است. به عبارتی عمل‌آوری با آب آهک منجر به کمترین جذب آب و عمل‌آوری با بخار منجر به بیشترین جذب آب شده‌اند.

۳.۳. نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در آزمایش تعیین مقاومت فشاری

شکل ۸، مد شکست تعدادی از نمونه‌های بتنی در آزمایش تعیین مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. در بارگذاری نمونه‌های بتنی برای تعیین مقاومت فشاری، در نمونه‌های بدون EPS، ترک‌های مورب بارشی ظاهر و نمونه‌ها دچار شکست مورب (برشی) شده‌اند و با ادامه‌ی بارگذاری، نمونه‌ها به شکل اهرام ناقص درآمده‌اند. در نمونه‌های بتنی با EPS، ترک‌های موازی در راستای بار ظاهر و با ادامه‌ی بارگذاری، نمونه‌ها به چند قسمت تبدیل شده‌اند.

همچنین برخلاف بتن‌های معمولی، درصد بیشتری از صفحه‌ی شکست، از داخل سیک‌دانه‌های اسکریا و EPS عبور کرده است که این درصد در بتن‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس بیشتر است؛ که این به دلیل مقاومت بیشتر خمیر

شکل ۸. تصویر شکست نمونه‌های بتنی تحت آزمایش مقاومت فشاری.

شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های بتن سبک.

سیمان و ناحیه‌ی مرزی بین سبک‌دانه‌ها و خمیر سیمان نسبت به سبک‌دانه‌هاست. انتقالی منسجم‌تر شده و پیوستگی بین خمیر و سنگ‌دانه در ناحیه‌ی انتقالی بهبود یافته است. در نتیجه، سبک‌دانه‌ها به دلیل مقاومت کمتری که دارند، تأثیر بیشتری در کنترل و محدود کردن مقاومت بتن دارند.

۴. نتیجه‌گیری

مقایسه‌ی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن‌های حاوی EPS و فاقد آن در حالت‌های مختلف با افزودنی میکروسیلیس و نانوسیلیس نشان داده است، که در بتن‌های بدون EPS، جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس به ترتیب تا مقدار ۱۵٪ و ۳٪ وزنی سیمان، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت و کاهش جذب آب بتن می‌شود و با جایگزینی بیشتر از مقادیر مذکور، مقاومت و جذب آب بتن به ترتیب روندی کاهشی و افزایشی پیدا می‌کنند. استفاده از دانه‌های EPS در مخلوط بتن، منجر به بالا رفتن اسلامپ و روانی و کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و چگالی و جذب آب بتن می‌شود. استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس، چسبندگی بین دانه‌های EPS با خمیر سیمان را بیشتر می‌کند. در این حالت، مقدار درصد بهینه‌ی میکروسیلیس و نانوسیلیس کاهش می‌یابد و به ترتیب به ۱۰ و ۲ درصد وزنی سیمان می‌رسند. این تأثیرها به گونه‌ی است که تأثیر ۱٪ نانوسیلیس تقریباً مشابه ۵٪ میکروسیلیس است، اما هزینه‌ی به مراتب بیشتری دارد. همچنین عمل‌آوری با بخار آب منجر به کسب

۴.۳. ریزساختار

در شکل ۹، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های بتن سبک ساخته شده ارائه شده است. در بتن بدون EPS، به خاطر سطوح زبر و دارای تخلخل اسکرپا، چسبندگی، انسجام و درهم تنیدگی خوب با خمیر سیمان و در ناحیه‌ی مرزی این دو به‌خصوص در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس مشاهده می‌شود. در بتن‌های با EPS بدون مواد سیلیسی، دانه‌ی EPS با خمیر سیمان چسبندگی کافی ندارد و ناحیه‌ی انتقالی بین EPS و خمیر سیمان، ضخامت نسبتاً زیادی دارد؛ که این نشان دهنده‌ی عدم ایجاد چسبندگی کافی دانه‌های EPS با خمیر سیمان است که این امر به دلیل سطح صاف و کروی و آبگریز بودن دانه‌های EPS است. در نمونه‌های با ۱۰٪ میکروسیلیس و ۲٪ نانوسیلیس، ضخامت ناحیه‌ی مرزی بین EPS و خمیر سیمان کاهش یافته و تقریباً از بین رفته است و مشاهده می‌شود که به دلیل استفاده از میکروسیلیس یا به‌خصوص نانوسیلیس ریزساختار، ناحیه‌ی

دهند. تصاویر SEM نشان داده‌اند که در صورت افزودن میکروسیلیس و نانوسیلیس به بتن، چسبندگی مناسبی بین دانه‌های EPS با خمیر سیمان ایجاد می‌شود و ناحیه‌ی انتقالی بین آن‌ها کاهش می‌یابد. از نظر اقتصادی نیز قیمت نانوسیلیس موجود در ۱ مترمکعب بتن در حدود ۲۳ برابر میکروسیلیس و قیمت ۱ مترمکعب بتن حاوی نانوسیلیس حدود ۵/۵ برابر ۱ مترمکعب بتن حاوی میکروسیلیس است.

سریع مقاومت می‌شود، اما مقاومت نهایی کمتر و درصد جذب آب بیشتری دارد و عمل‌آوری با آب آهک منجر به کسب بیشترین مقاومت نهایی و کمترین میزان جذب آب در سن ۲۸ روزه‌ی بتن می‌شود. حضور دانه‌های EPS در بتن سبب می‌شود که نوع شکست نمونه‌های بتنی از حالت ترد و خطوط مورب به حالت نرم و خطوط موازی تبدیل و تأثیر بیشتری در محدود کردن مقاومت بتن از خود نشان

پانویس

1. expanded poly styrene (EPS)

منابع (References)

1. ACI 213R-14, "Guide for structural lightweight-aggregate concrete. Farmington Hills", MI: American Concrete Institute (2014).
2. udy of the influence Liu, N. and Chen, B. "Experimental st of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, **68**, pp. 227-232 (2014).
3. Gesog, M., Guneyisia, E., Ali, B. and Mermerdas, K. "Strength and transport properties of steam cured and water cured lightweight aggregate concretes", *Construction and Building Materials*, **49**, pp. 417-424 (2013).
4. Shekarchizadeh, M., Valipour, M. and Pargar F. "Comparing the performance of metakaoline with silica fume on properties of high performance concrete", *Journal of Civil Engineering of Ferdowsi University of Mashhad*, **25**(1), pp. 1-14 (2013).
5. Ramezaniapour, A.A., Moravej Jahromi S.M., Mahdikhani, M. and Moodi F. "Comparative study on microstructure and durability of concretes containing nano silica and silica fume", *Journal of Civil Engineering of Amir Kabir University of Tehran*, **44**(1), pp. 65-75 (2012).
6. Karbalai, M. and Sohrabi, M.R. "The investigation and comparison of concretes containing crumb and powder rubber with silica fume", *Journal of Civil Engineering and Environment*, **42**(4), pp. 25-33 (2013).
7. Schackow, A., Effting, C., Folgueras, M.V., Guths, S. and Mendes G.A. "Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent", *Construction and Building Materials*, **57**, pp. 190-197 (2014).
8. Zhang, B. and Poon C.S. "Use of furnace bottom ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties", *Journal of Cleaner Production*, **99**, pp. 94-100 (2015).
9. Hongjian, D., Suhuan, D. and Xuemei, L. "Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, **82**, pp. 114-122 (2015).
10. ASTM C39/C39M-10, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International (2015).
11. BS 1881-122:2011, "Testing concrete: Method for determination of water absorption", British Standard (2015).