

بهبود عملکرد روسازی بلوک خشتشی پیاده‌روها و معابر روستایی با استفاده از افزودنی

زهره غفوری فرد*، محمدمهری خبیری**

۱۴۰۰/۱۱/۱۱

۱۴۰۱/۰۹/۰۶

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

چکیده

ایران در استفاده از خشت در معماری و ساخت‌وساز، از کهن‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود؛ به طوری که اکثر سازه‌های معماری و خانه‌های روستایی در این کشور، با استفاده از خشت ساخته شده‌اند که توجه بسیاری از گردشگران را به خود جذب کرده است. امروزه با پیشرفت علم و فناوری و با توجه به فراوانی مصالح خشتی و از طرفی اهمیت جایگاه گردشگری در کشور ایران، استفاده از خشت، شیوه‌ای که سالیان درازی است در ساختارها و معماری کشور نقش داشته، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. ازان‌جاکه رنگ تیره روسازی‌های متداول از جمله روسازی آسفالتی با رنگ بنای معماری - تاریخی خشت و گلی روستا همخوانی ندارد و از زیبایی آن می‌کاهد؛ در این پژوهش سعی شده است عملکرد خشت ثبت شده با سیمان و آهک به‌منظور استفاده از آن در روسازی پیاده‌روها و معابر بافت روستایی با بار ترافیکی کم مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور نمونه‌های بلوک خشتی از خاک ماسه رس دار ساخته شد و با درصدهای متفاوت سیمان و آهک ثبت شد و سپس تحت آزمایش درصد جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت لغزشی و درنهایت تعیین مدول الاستیسیته قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که در خصوص ثبت با سیمان، با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد تا ۱۵ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۴ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد در مدت عمل آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۱۱، ۸۹ و ۹۲ درصد افزایش می‌یابد. در خصوص ثبت با آهک، با افزایش درصد آهک به ۸ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۶ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد آهک از ۴ درصد به ۸ درصد در مدت عمل آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۹۹، ۹۶ و ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر مقدار ماده ثبت کننده، مدت زمان عمل آوری در مقاومت فشاری نمونه‌ها مؤثر است.

کلمات کلیدی: بافت سنتی خشتی، بلوک خشتی، روسازی پیاده‌رو، مواد افزودنی، معابر روستایی.

* کارشناس ارشد مهندسی راه و ترابری، بخش خاک و راه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

** دانشیار، بخش خاک و راه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران. mkhabiri@yazd.ac.ir

روستاهای این اقلیم بر اینکه اولین و پایدارترین اقدام در منطقه، علاوه بر اینکه همساز با اقلیم در یک منطقه اقلیمی مشخص است و باعث حفظ فرهنگ و سنت آن منطقه است؛ می‌تواند جذابیت این آثار گردشگری را بیشتر کند و باعث جذب گردشگر و درنتیجه توسعه هرچه بیشتر صنعت گردشگری شود (میرزایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ احمدیان و بیات زاده، ۱۳۹۲). از طرفی دیگر، رنگ سطح معابر نقش بسیار مهمی در چهره هر روستا دارد و بخش جدانشدنی از کلیه محیط‌ها، مکان‌ها و فضاهای شهری است؛ از این‌رو رنگ معابر در بافت تاریخی نیز اهمیت ویژه دارد. رنگ تیره مصالح متداول، با رنگ روشن سازه‌های خشت و گلی هماهنگی ندارد. روان‌شناسان معتقدند که رنگ سیاه شدیداً تسبیح‌کننده و متأثرکننده، کاملاً بی‌تحرک، ساکن و عمیق است؛ از این‌رو استفاده از روسازی‌های رنگی از جمله آسفالت‌های رنگی توسط محققین مطرح شد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹) که معایب متعدد دارد و مهم‌ترین عیب این نوع روسازی‌ها هزینه بالای آن نسبت به آسفالت معمولی است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از مصالحی که با سازه‌های خشت و گلی همخوانی مناسب دارد، استفاده از بلوک‌های خشتشی است. علاوه بر این، استفاده از آن می‌تواند مصرف آسفالت و سیمان (که در روسازی با رویه‌های بتُنی و انواع موzaییک‌ها استفاده می‌شود) را به عنوان یکی از موارد تهدیدکننده محیط‌زیست، تا حد مطلوبی بکاهد. همچنین از لحاظ اقتصادی، چون مصالح موردنیاز بلوک‌های خشتشی در دسترس است، می‌توان با کمترین هزینه این بلوک‌ها را تولید کرد، درنتیجه از لحاظ قیمت بسیار ارزان‌تر از سایر روسازی‌های متداول است (زارع شاه‌آبادی و فرج‌زا، ۱۳۹۶؛ نامور و زینی، ۱۳۹۸؛

صنعت گردشگری به عنوان یکی از متنوع‌ترین و بزرگ‌ترین صنایع در جهان، مهم‌ترین منبع درآمد و ایجاد فرصت‌های شغلی برای بسیاری از کشورهای دنیا است (Ribeiro & Wang, 2020)؛ این صنعت که به عنوان موتور توسعه از آن نام برده می‌شود، به علت اهمیتی که از نظر اقتصادی و اجتماعی دارد، روزبه روز مورد توجه بیشتری قرار گرفته و دولت‌ها به آن اهمیت ویژه‌ای می‌دهند؛ به طوری که امروزه یکی از پایه‌های اصلی و استوار اقتصاد جهان است. در تقسیم‌بندی جهانی پس از نفت و خودروسازی، صنعت گردشگری در رده سوم قرار می‌گیرد (Parvin et al., 2020). از طرفی فضاهای روستایی و شهری به ویژه محدوده بافت‌های تاریخی و قدیمی به علت وجود جاذبه‌های معماری، فرهنگی و بنای‌های ارزشمندی که نمادی از شرایط اقتصادی، اعتقادی و اجتماعی گذشتگان است، از مقاصد مهم گردشگری به شمار می‌روند (کردوانی و مورده‌غفاری، ۱۳۹۰). کشور ایران نیز در این زمینه بسیار غنی است (امیری و باقرزاده، ۱۳۹۴)؛ به طوری که دارای کهن‌ترین فرهنگ و تمدن جهان و در رده‌های اول دارنده آثار باستانی و اینهای تاریخی و فرهنگی فاخر در جهان است (قدسی جهرمی، ۱۳۹۶). از آنجایی که ایران از نظر جغرافیایی در بخش بیابانی و نیمه بیابانی جهان قرار گرفته است و بیش از ۸۵ درصد کشور جزو مناطق خشک یا نیمه‌خشک محسوب می‌شود؛ تعداد زیادی از خانه‌های قدیمی و آثار باستانی فاخر، سازه‌هایی از جنس خشت و گل است (پاکدل و عالمی، ۱۳۹۹) که اکثر این سازه‌های خشت و گلی در روستاهای این منطقه از پیاده‌رو متناسب با این سازه‌ها و بافت سنتی

پژوهشی بیان می‌دارد که سطوح طبیعی از گیاهان و خاک‌های مرطوب تشکیل شده است که انرژی خورشیدی لازم را برای کمک به تبخیر و تعرق جذب می‌کنند، بخارآب باعث خنک‌تر شدن هوا می‌شود. در حالی که سطوح مصنوعی از درصد بالایی از مواد غیر منعکس‌کننده و مقاوم در برابر آب تشکیل شده‌اند. همچنین در این نوع خاک‌ها جذب مقدار قابل توجهی از انرژی خورشیدی باعث تولید گرما می‌شود. ایجاد محیط‌زیست غیرطبیعی و ساختنی و جایگزین کردن آن با محیط طبیعی و درنتیجه رشد محیط‌های مصنوعی به صورت روزافزون در حال افزایش است. با این وجود فناوری‌های مدرن قادر به کاهش تأثیرات خطرناک و غیرمفید روی محیط طبیعی مانند تبخیر آب باران و تأثیر روی آب‌وهوای طبیعی و غیره نیستند (Alcoforado, 2006); بنابراین دانشمندان باید به دنبال موادی سازگار با محیط‌زیست باشند که جهت جایگزینی با مواد طبیعی موجود در محیط‌زیست مناسب باشد (اکرمی و علیپور، ۱۳۹۵).

در پژوهشی دیگر اوکوناد^۲ (۲۰۰۸) به بررسی استفاده از بلوک‌های رسی پخته که به صورت محلی تولید می‌شوند، در پیاده‌روهایی با عبور و مرور کم، پرداخت. او نتیجه گرفت که این نوع بلوک الزامات C ۹۰۲ برای عابر پیاده را برآورده می‌کند و برای معابری با ترافیک کم مناسب است. دبوچا و هاشم^۳ (۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان «مروری بر بلوک‌ها و بلوک‌های خاکی فشرده و تثبیت شده»، بیان می‌دارد که اگرچه ایده اولیه ساخت بلوک‌های رسی به عنوان مواد روسازی صرفاً به دلیل نگرانی در خصوص هزینه‌ها بوده است اما پژوهش‌ها نشان داده است که مزایای استفاده آن از نظر نجات فرهنگ، میراث و سازگاری با محیط‌زیست بسیار مورد توجه است. جیازینگ و ملاواراجی^۴ (۲۰۰۹)

رحیمی، ۱۳۹۶) هدف این پژوهش یافتن پاسخ سوالات زیر است:

- آیا به کمک مواد افزودنی مانند آهک و سیمان به بلوک خشتشی می‌توان خواص آن را بهبود بخشید و از آن در روسازی پیاده‌روهای بافت سنتی روستاها استفاده نمود؟

- عملکرد بلوک خشتشی تثبیت شده با سیمان چگونه است و تا چه حد باعث بهبود خواص آن می‌شود؟

- تأثیر آهک بر بهبود عملکرد بلوک خشتشی چگونه است؟

ادبیات موضوع

امروزه بازسازی فضایی روستاها به عنوان یک روش مهم در دستیابی به احیای روستاها جهت ارتقای جذابیت محیط روستاها و جذب بیشتر توریست بسیار Gao & Cheng, (2020). از طرفی با افزایش جمعیت و درنتیجه آن افزایش نیاز به زیرساخت‌ها و همچنین افزایش انواع آلودگی و از طرفی دیگر حیاتی شدن هرچه بیشتر مسائل محیط زیستی، موضوع تأثیر پروژه‌های عمرانی بر محیط‌زیست اهمیت ویژه‌ای پیداکرده است (Lojda, 2018; Shahidehpour et al., 2018; Shanmugavalli et al., 2017) و مهندسین را به استفاده از منابع طبیعی در پروژه‌های عمرانی و اداره است. به طور کلی استفاده از منابع طبیعی در پروژه‌های عمرانی دارای مزایایی از جمله کاهش هزینه اولیه، کاهش هزینه‌های انرژی مربوط به حمل و نقل، کاهش تولید ضایعات ساختمانی، حمایت از مشاغل محلی و منابع اصلی موجود، کاهش هزینه‌های کلی و هدر رفت انرژی است (Nanayakkara et al., 2017; Saberian & Khabiri, 2017; Thirugnanasambantham et al., 2017; Udawattha & Halwatura, 2016, 2017). در این زمینه مطالعات متعددی نیز صورت گرفته است. به عنوان مثال الکوفورادو^۱ (۲۰۰۶) در

نیز در پژوهشی به بررسی مقاومت خمثی مصالح بنایی خاکی ثبت شده فشرده می‌پردازند و بیان می‌کنند که امروزه با افزایش هزینه‌های ساخت و ساز، نیاز به توسعه مواد و فناوری کم‌هزینه برای صنعت ساخت و ساز وجود دارد. بلوک پخته شده خاک رسی یکی از محبوب‌ترین مواد موجود در بسیاری از کشورها به دلیل داشتن خواص بسیار ارزشمندی مانند دوام، هزینه نسبتاً کم، در دسترس بودن، عایق صدا و حرارت، مقاومت در برابر آتش، مقاومت کافی در برابر هوایدگی و ظاهر جذاب است که عملکرد خوبی در پروژه‌های عمرانی دارد. در سال ۲۰۱۷ نیز ساهو و سینگ^۵ در بررسی انتقادی انواع بلوک‌ها بیان داشتند که بلوک یکی از رایج‌ترین و پر تفاضل‌ترین مصالح در ساخت و ساز است؛ چراکه از نظر اقتصادی و محیط‌زیست مناسب است و در بسیاری از مناطق به راحتی در دسترس است. همچنین بیان می‌دارند که امروزه می‌توان با فناوری‌های جدید انواع بلوک‌ها از جمله بلوک‌های خاکی و ماسه‌ای را با مواد مختلف تثبیت کرد و از آن در پروژه‌های عمرانی از جمله راهسازی، پیاده‌روسازی و غیره استفاده کرد (Sahu & Singh, 2017). اودواته^۶ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای تحت عنوان «بررسی استفاده از بلوک سنگ فرش بتونی خشتنی برای پیاده‌روها»، بیان می‌دارد که بلوک سنگ فرش بتونی خشتنی را می‌توان با استفاده از خاک دارای ریزدانه کمتر از ۵ درصد و دارای ماسه به میزان ۵۵ درصد تا ۶۵ درصد ماسه و ۱۸ تا ۲۲ درصد سیمان همراه با رطوبت بین ۱۴ تا ۱۵ درصد تولید کرد که عملکرد مناسبی از نظر فنی و سازگاری با محیط‌زیست دارد. همچنین چاوان^۷ و همکاران (۲۰۱۸)، عملکرد بلوک روسازی ساخته شده از شن، ماسه و پلاستیک ضایعاتی را مورد بررسی قرارداد. نتایج این پژوهش نشان داد که این بلوک‌ها از مقاومت خوبی

برخوردارند و می‌توان از آن‌ها برای روسازی مسیرهای پیاده‌روی، پارکینگ‌ها و غیره استفاده کرد. علاوه بر این، استفاده از این گونه بلوک‌ها هم از نظر محیط زیستی و هم از نظر اقتصادی بسیار مفید است.

در پژوهشی دیگر، اسماعیلی و قلعه‌نوری با بیان اینکه در بسیاری از نقاط جهان، خشت به عنوان مصالح ساختمانی، در بافت‌های شهری و روستایی کاربرد فراوان دارد و با توجه به اینکه درصد زیادی از مساحت ایران را مناطق گرم و خشک و کویری تشکیل داده است، موضوع حذف خشت و بناهای خشتنی روش درست و مناسبی به نظر نمی‌رسد؛ به بررسی اثر الیاف نخل خرما و آهک به عنوان تثبیت‌کننده طبیعی بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت) پرداختند و دریافتند که وجود ۱ درصد الیاف نخل خرما و ۱۵ درصد آهک، برای شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت، بهترین حالت ممکن برای نمونه‌های خشتنی تثبیت شده با آهک و الیاف نخل خرما است (اسماعیلی و قلعه‌نوری، ۱۳۹۱). با این و همکاران نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر مواد افزودنی مختلف تکتوسیلیکاتی میکرونیزه در ترکیب با ملات کاهگل پرداختند و یافته‌ند که با استفاده از ۳ درصد افزودنی تکتوسیلیکاتی ۴۵ میکرون میکروسیلیس تا ۲۰ درصد، با زئولیت تا ۶/۸۵ درصد و با فلدسپات میکرونیزه تا ۷۳ درصد می‌توان ضریب نفوذ پذیری کاهگل را کاهش داد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ۳ درصد وزنی میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات میکرونیزه ۴۵ میکرون، مقاومت فشاری کاهگل را نیز نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب تا ۵/۷۳، ۳۶ و ۵/۷۱ درصد ارتقاء می‌دهد. از سوی دیگر، ارزیابی میزان دوام نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارش مصنوعی با دستگاه شبیه‌ساز باران نشان داد که استفاده

نstanگر بهبود مقاومت فشاری در خشت تولیدشده در مقایسه با روش سنتی تولید است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به منظور بهبود مقاومت فشاری خشت تولیدشده علاوه بر ثبت مکانیکی، اصلاح دانه‌بندی می‌تواند در تغییر مقاومت فشاری مؤثر باشد (درMohmadi و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر درMohmadi و رحیم‌نیا تحت عنوان «اثر ترکیبی تراکم و میزان رس بر خواص مکانیکی آجر خشتی»، نمونه‌های خشت در دو گروه شاهد و آزمایشی (نمونه‌های متراکم شده) با شش نوع خاک از شش معدن مختلف تهیه و ویژگی‌های فیزیکی، کانی‌شناسی و شیمیایی آن‌ها تعیین شد و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار داده شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین تراکم دینامیکی و مقاومت مکانیکی وجود دارد؛ به طوری‌که تراکم خاک در نمونه‌های آزمایشی باعث افزایش مقاومت فشاری ۷۹/۴۳ درصد، مقاومت کششی ۴۲/۴۲ درصد و مقاومت خمشی ۷۵ درصد نسبت به خشت‌های شاهد (فاقد تراکم) می‌شود. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت، تراکم دینامیکی روش قابل قبولی برای ساخت مصالح خاکی مانند خشت با رعایت استانداردهای لازم است (Dormohamadi & Rahimnia, 2020).

علاوه بر این‌ها پیاده‌روی یکی از مدهای حمل و نقلی فعال در جهان شناخته می‌شود (Bunds et al., 2019)؛ به طوری‌که بیش از ۹۵ درصد از کاربران مسیر، در صورت وجود مسیر پیاده‌روی مناسب و ایمن، پیاده‌روی را بر حمل و نقل موتوری در مسافت‌های کم ترجیح می‌دهند (Galabada et al., 2015). از این‌رو ایجاد انگیزه لازم برای افراد جهت استفاده از پیاده‌روها مزایای زیادی دارد که شامل منافع زیست‌محیطی با حداقل

از ۳ درصد وزنی میکروسیلیس، زئولیت و فلدسپات، دوام نمونه‌ها را در مقابل فرسایش ناشی از بارندگی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج بیانگر آن است که با کاهش اندازه ذرات و دانه‌بندی ماده افزودنی، میزان تأثیر مثبت آن‌ها نیز در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات کاهگل افزایش می‌یابد (باتر و همکاران، ۱۳۹۶).

همچنین در سال ۱۳۹۷، بهرامزاده و همکاران در پژوهشی با تأکید بر اینکه بنایا، محوطه‌ها و آثار معماری خشتی تاریخی و باستانی متعدد و زیادی در ایران وجود دارد که پراکنده‌گی آن‌ها بیشتر در روستاهای مناطق گرم و کویری ایران به چشم می‌خورد، تأثیر آهک بر بهینه‌سازی خشت خام در مقابل رطوبت را موردنرسی قرار دادند. در این پژوهش پنج نوع خشت با ترکیب ۲، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۲ درصد از آهک ساخته شد و مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری در شرایط خشک و اشباع، مقاومت سایشی، جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری قرار گرفتند که نتیجه مطلوب و متناسب با هدف این پژوهش مربوط به خشت ساخته شده با ۲ درصد آهک بود و نتایج بیان‌کننده تأثیر مثبت آهک بر عملکرد خشت بود (بهرامزاده و همکاران، ۱۳۹۷). درMohmadi و همکاران (۱۳۹۹) با تأکید بر اینکه ایران دارای آثار بالارزش تاریخی خشت و گلی است و باید در حفظ و ترویج آن کوشید، به مطالعه در خصوص ارزیابی امکان بهبود خواص مکانیکی خشت از طریق ثبت مکانیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک پرداختند. بدین منظور آن‌ها با نمونه‌گیری از ۶ معدن خاک سنتی اردکان و ثبت آن‌ها با به کارگیری روش‌های ثبت مکانیکی (کوبش) با تأکید بر ثبت فیزیکی خاک (اصلاح دانه‌بندی و افزودن ماسه)، به اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها پرداختند. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری

کردن استفاده از حمل و نقل موتوری است (Chudyk et al., 2017; Marchiori, 2018) از مصالح مناسب و جذاب در پیاده‌روها، مخصوصاً پیاده‌روهایی با تقاضای بالای پیاده‌روی مانند پیاده‌روهای بافت سنتی و گردشگری شهرها، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند (Brena et al., 2021).

همان‌طور که اشاره شد پژوهش‌های زیادی در زمینه به کارگیری بلوک‌های خشتی در پروژه‌های عمرانی انجام شده است؛ اما هیچ‌کدام از آن‌ها به بررسی روسازی مناسب برای بافت خشت و گلی سنتی شهرها اشاره نکرده‌اند. در این پژوهش استفاده از خشت به عنوان روسازی مناسب از نظر محیط زیستی، اقتصادی و گردشگری برای معابر بافت خشت و گلی سنتی شهرها، پیشنهاد می‌شود و به بررسی عملکرد آن پرداخته می‌شود.

روش تحقیق

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد بلوک خشتی به عنوان روسازی پیاده‌رو مناسب از نظر فنی است. بدین‌جهت نمونه‌های بلوک خشتی با ابعاد مختلف تهیه شد و در مرحله اول با سیمان و در مرحله دوم با آهک تثبیت شد و سپس تحت آزمایش درصد جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت لغزشی قرار گرفتند.

مواد مورداستفاده در تحقیق

خاکی که در این مطالعه مورداستفاده قرار گرفت،

ج. ۱. مشخصات سیمان و آهک مورداستفاده

مشخصات سیمان	
خصوصیات	مقدار (%)
SiO ₂	۲۰
Al ₂ O ₃	۶
Fe ₂ O ₃	۶
MgO	۵
SO ₃	۳
کاهش وزن	۳
ذرات نامحلول	۰.۷۵
C ₃ A	۸

مساحت ویژه (gr/cm ²)		۲۸۰۰
مقاومت فشاری (kg/cm ²)	۳ روزه	۱۰۰
	۷ روزه	۱۷۵
	۲۸ روزه	۳۱۵
(Cal/gr)		۷۰
مشخصات آهک		
خصوصیات		مقدار (%)
CaO		۴۷/۲۷
SiO ₂		۸/۷۱
AL ₂ O ₃		۳/۱۷
Fe ₂ O ₃		۱/۵۶
MgO		۰/۹۸۷
K ₂ O		۰/۷۹۰
SO ₃		۰/۶۷۸
TiO ₂		۰/۲۲۲
Na ₂ O		۰/۰۸۲
ZnO		۰/۰۳۴
SrO		۰/۰۲۹
MnO		۰/۰۲۶
CuO		۰/۰۲۶
PbO		۰/۰۲۴
Cl		۰/۰۱۳
LOI ^۹		۳۶/۱۵

آزمایش‌های انجام شده

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش آزمایش‌های تعیین درصد جذب آب (ASTM C936, 2008), مقاومت فشاری (BS EN 1338., 2003) و مقاومت لغزشی (BS خمثی 9) (ASTM C78., 2009) و مقاومت فشاری (BS EN 1338., 2003) انجام شد. همچنین مدول الاستیسیته (ASHTO T307-99., 2003) بلوک‌ها نیز تعیین شد.

آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب برای ارزیابی میزان کیفیت تراکم سنگ‌فرش‌ها است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C936 با استفاده از ده قطعه بلوک از نمونه‌های وضعیت مشابه تولید شده توسط این مطالعه انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 1338, ۳, ۷ و ۲۸ روز پس از عمل آوری انجام شد. ابعاد هر کدام از مکعب‌های آزمایش قبل از خیساندن

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش نمونه‌های بلوک خشتی به اشکال و ابعاد مختلف، بسته به نوع آزمایش ساخته شده‌اند و سپس در مرحله اول بلوک‌های خشتی با ۴، ۶ و ۸ درصد آهک و در مرحله دوم با ۵، ۱۰، ۱۵ درصد سیمان تثبیت شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده به صورت مکعبی و استوانه‌ای ساخته شده‌اند که نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر برای آزمایش جذب آب و مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۳۰ سانتی‌متر برای آزمایش تعیین مقاومت خمثی و اصطکاک و نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برای تعیین مدول الاستیسیته ساخته شد. لازم به ذکر است که ساخت نمونه شاهد (بدون افزودنی) تقریباً غیرممکن است؛ چراکه خاک مورد مطالعه پیوستگی و چسبندگی داخلی اندکی دارد و درنتیجه مقاومتی ندارد.

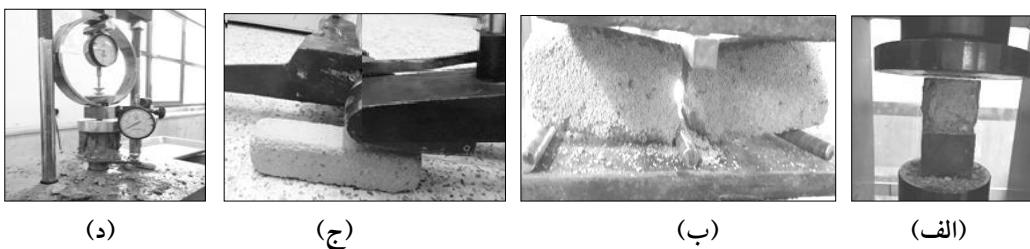
آن‌ها در آب اندازه‌گیری و مساحت آن محاسبه شد. سپس مکعب‌های آزمایشی به مدت ۲۴ ساعت در آب، خیس شدند و تحت آزمایش قرار گرفتند (تصویر شماره ۱-الف). مقاومت فشاری مرطوب با تقسیم حد اکثر بار بر مساحت آن محاسبه شد. لازم به ذکر است که حداقل مقاومت موردنیاز روسازی برای استفاده از پیاده‌روها $\frac{N}{mm^2} \geq 15$ است.

آزمایش مقاومت خمسي

آزمایش مقاومت خمسي بلوک‌های خشته بعد از ۳ روز عمل آوری تحت شرایط یکسان با سرعت بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر ثانیه بر اساس استاندارد ASTM C78 انجام گرفت.

شیوه انجام آزمایش به این ترتیب بود که نمونه‌های بلوک خشته پس از خشک شدن در آون یا گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت تحت دستگاه بارگذاری قرار گرفتند (تصویر شماره ۱-ب).

آزمایش مقاومت لغزشی به کمک پاندول انگلیسی مقاومت در برابر لغزش برای ایمنی مسیرهای عابران



ت. ۱. الف- آزمایش مقاومت فشاری؛ ب- آزمایش مقاومت خمسي؛ ج- آزمایش مقاومت لغزشی به کمک پاندول انگلیسی؛ د- تعیین مدول الاستیسیته

ج. آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق

عنوان آزمایش	شماره استاندارد بین‌المللی آزمایش	هدف آزمایش
درصد جذب آب	ASTM C936	ارزیابی میزان کفیت تراکم سنگفرش‌ها
مقاومت فشاری	BS EN 1338	ارزیابی مقاومت فشاری بلوک
مقاومت خمسي	ASTM C78	ارزیابی مقاومت فشاری بلوک
مقاومت لغزشی	BS EN 1338	ارزیابی مقاومت در برابر لغزش و ایمنی ارزیابی تغییر شکل بلوک در برابر بار
تعیین مدول الاستیسیته	ASHTO T307-99	تعیین مدول الاستیسیته

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های

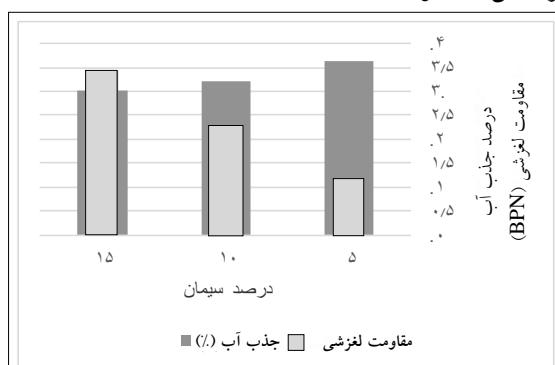
شرح داده شده در قسمت ۳ پرداخته شده و نتایج در

جدول شماره ۳ ارائه شده است.

ج.۳. نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیق

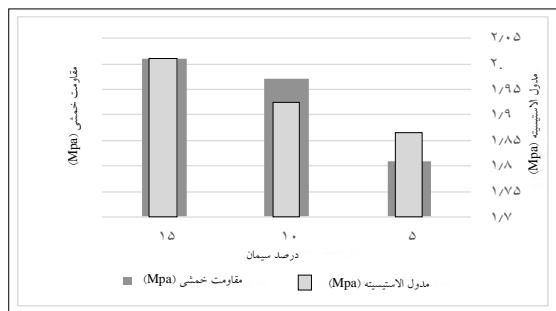
ماده افزودنی	درصد	جذب آب (%)	اصطکاک	مقاومت خمی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	(pa)	مقدار
مدت عمل آوری (روز)	۳	۳	۳	۳	۲	۷	۲۸	۲۸
سیمان	۵	۳/۶۲	۶۶	۱/۸۱	۱۶۴	۱۷/۳	۱۷/۸	۱۷/۸
آهک	۱۰	۲/۲۱	۶۲	۱/۹۷	۲۲۴	۲۳/۴	۲۴/۱	۲۴/۱
سیمان	۱۵	۳/۰۱	۵۸	۲/۰۱	۳۱۰	۲۹/۲	۳۰/۸	۳۰/۸
آهک	۴	۴/۱۲	۷۲	۱/۰۷	۱۰۵	۹/۱	۱۱/۲	۱۱/۲
سیمان	۶	۴/۰۵	۶۵	۱/۳۲	۱۳۷	۱۲/۷	۱۳/۶	۱۴/۲
آهک	۸	۳/۸۷	۵۹	۲/۱۳	۲۰۶	۱۹/۶	۲۰/۷	۲۱/۶

نمونه ۵ درصد، از ۳ تا ۲۸ روز عمل آوری میزان مقاومت فشاری نمونه ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است؛ زیرا که افزایش مدت زمان عمل آوری باعث می‌شود واکنش‌های شیمیایی هیدراسیون بهتر انجام شده و درنتیجه مقاومت افزایش یابد. مطالعات رحیمنیا و حیدری‌بنی (۱۳۹۰)، نشان می‌دهد افزودن سیمان به خشت باعث بهبود مقاومت خمی، کششی و خصوصیات خمیری خشت می‌شود. همچنین نتایج پژوهش یوداتا^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷) تحت عنوان «سنگفرش بتی خشتی برای روسازی‌های پیاده‌رو» بیانگر آن است که سنگفرش بتی خشتی عملکرد فنی مناسبی به عنوان روسازی پیاده‌روها دارد که با نتایج این پژوهش همسو است.



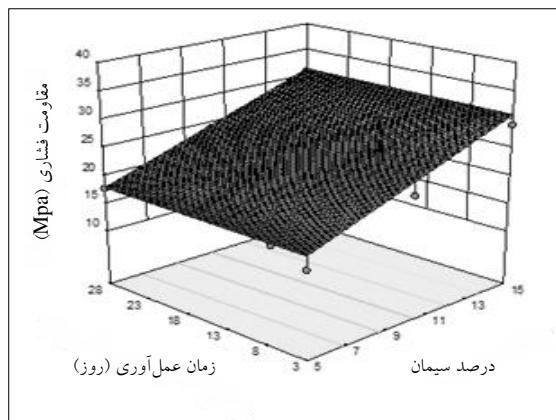
(الف)

بررسی عملکرد بلوک خشتی تثبیت شده با سیمان در تصاویر شماره ۲ و ۳، تأثیر میزان سیمان بر عملکرد بلوک خشتی به‌وضوح قابل مشاهده است. با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش درصد سیمان مقاومت خمی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد در مدت عمل آوری ۳ روزه، مقاومت خمی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۱۱، ۸۹ و ۹۲ درصد افزایش می‌یابد. علت کاهش درصد جذب آب با افزایش درصد سیمان، پر شدن فضاهای خالی درون بلوک خشتی به‌وسیله سیمان است؛ چراکه همان‌طور که اشاره شد درصد جذب آب مواد به‌شدت تحت تأثیر درصد فضای خالی آن است. از طرفی با افزایش ماده چسبنده سیمان و چسبنده‌گی بهتر ملات بلوک، ذرات خاک ماسه بهتر به هم چسبیده و درنتیجه خشتی با سطحی صاف‌تر و با مقاومت و دوام بالاتری را نتیجه می‌دهد. علاوه بر این با توجه به تصویر شماره ۳ با افزایش مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری بلوک خشتی تثبیت شده افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در یک میزان سیمان ثابت به عنوان



(ب)

ت.۲. تغییرات پارامترهای الف- جذب آب و مقاومت لغزشی؛ ب- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بلوك خشتشی ثبیت شده با سیمان در عمل آوری ۳ روزه



ت.۳. تأثیر درصد سیمان و مدت زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری بلوك خشتشی

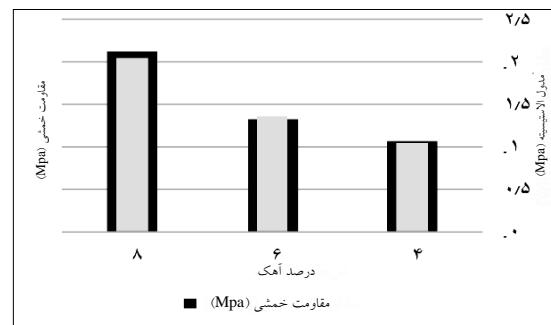
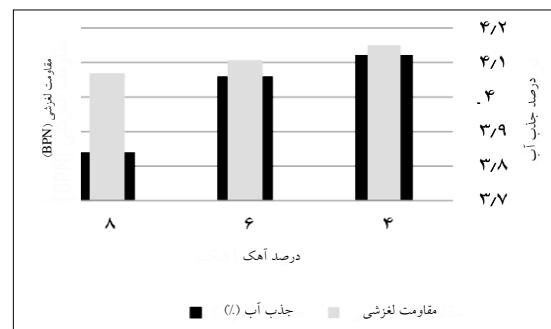
بررسی عملکرد بلوك خشتشی ثبیت شده با آهک در تصاویر شماره ۴ و ۵ تأثیر میزان آهک بر عملکرد بلوك خشتشی بهوضوح قابل مشاهده است. با افزایش درصد آهک از ۴ درصد تا ۸ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۶ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش درصد آهک مقاومت خمسمی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش درصد آهک از ۴ درصد به ۸ درصد در مدت عمل آوری ۳ روزه، مقاومت خمسمی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب

حدود ۹۶، ۹۹ و ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علت کاهش درصد جذب آب با افزایش درصد آهک، پر شدن فضاهای خالی درون بلوك خشتشی بهوسیله آهک است؛ زیرا درصد جذب آب مواد بهشدت تحت تأثیر درصد فضای خالی آن است. همچنین با افزایش آهک و چسبندگی بهتر ملات بلوك، ذرات خاک ماسه بهتر به هم چسبیده و درنتیجه خشتشی با سطحی صاف تر و با مقاومت و دوام بالاتری را نتیجه می‌دهد. علاوه بر این با توجه به تصویر شماره ۵ با افزایش مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری بلوك خشتشی ثبیت شده افزایش می‌یابد؛ به طوری که در یک میزان آهک ثابت به عنوان نمونه ۴ درصد، از ۳ تا ۲۸ روز عمل آوری میزان مقاومت فشاری نمونه ۲۳ درصد افزایش پیداکرده است. درنتیجه مدت زمان عمل آوری، علاوه بر مقدار ماده افزودنی بر مقاومت مؤثر است. حجازی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تحت عنوان «تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان»، با بررسی خشت ثبیت شده با مواد مختلف از جمله پودر آهک یافتند که افزودن پودر آهک به خشت باعث افزایش مقاومت و بهبود عملکرد خشت می‌شود. همچنین بر اساس مطالعات بهرامزاده و همکاران (۱۳۹۷)، افزودن آهک به خشت باعث بهبود مقاومت فشاری در شرایط خشک و اشباع، مقاومت ساییشی، جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری خشت می‌شود که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. درنهایت با توجه به نتایج و عملکرد مثبت بلوك خشتشی ثبیت شده با افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک می‌توان گفت بلوك‌های خشتی ثبیت شده مصالحی مناسب از نظر اقتصادی و محیط زیستی برای روسازی پیاده‌روها، مخصوصاً در مناطق گرسیز که خشت بهوفور یافت می‌شود، است (Galabada, 2016).

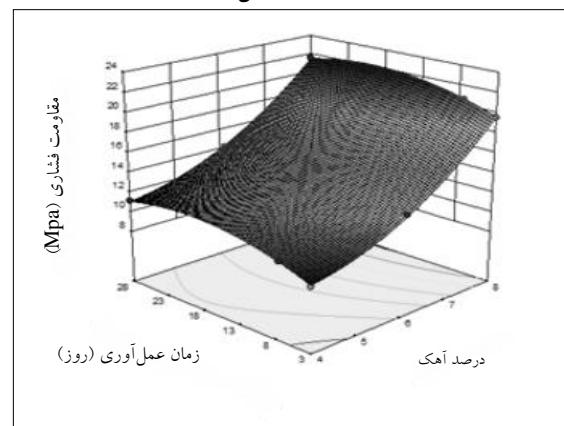
میکروسکوپ الکترونیکی ابزار جدید مناسب برای تحلیل مورفولوژی ساختارهای درونی و پیوستگی اجزا مواد مرکب است در حقیقت این روش با تابش فوتون‌های نوری با طول موج کوتاه، باعث وضوح قدرت تفکیک و دستیابی به اطلاعات مناسب‌تر است. همچنین به کمک این تصاویر می‌توان نحوه اختلط و ساختار خشت تثیت شده با این دو ماده تثیت‌کننده را به خوبی بررسی کرد.

مخلوط ساخته شده در اختلط مختلف در این پژوهش، در تصویر شماره ۶ ارائه شده است. در تصویر شماره ۶-الف، ناحیه بین اجزا ماسه‌ای خاک در حالت وجود آهک و در تصویر شماره ۶-ب، ناحیه بین اجزا ماسه‌ای خاک در حالت وجود سیمان قابل مشاهده است. ملات چسبنده پوزولان حاوی سیمان یا آهک با خاک رس توانسته است فاصله بین ذرات ماسه را به خوبی پر کند و این امر باعث افزایش مقاومت تکمحوره بلوک‌های خشتی حاوی درصدهای مختلف سیمان و آهک می‌شود. همان‌طور که در تصویر شماره ۶ قابل مشاهده است، پیوستگی بین اجزا خاک تثیت شده نسبت به قبل تثیت بیشتر شده است که در تمامی موارد افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته خاک را به دنبال دارد.

همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول شماره ۳، میانگین مقاومت خمثی و فشاری بلوک تثیت شده با سیمان به ترتیب حدود ۲۹ درصد و ۵۷ درصد بیشتر از مقاومت تثیت شده با آهک است؛ چراکه همان‌طور که در تصویر شماره ۷ مشخص است، سیمان در مقایسه با آهک، به علت خاصیت چسبندگی بالا، باعث ایجاد ساختار مجتمع تری می‌شود و مصالح را به خوبی به هم می‌چسباند و درنتیجه مقاومت بیشتری حاصل می‌شود. این در حالی است که آهک بیشتر در خواص خمیری



ت.۴. تغییرات پارامترهای الف- جذب آب و مقاومت لغزشی:
ب- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بلوک خشتشی
تثیت شده با آهک در عمل آوری ۳ روزه

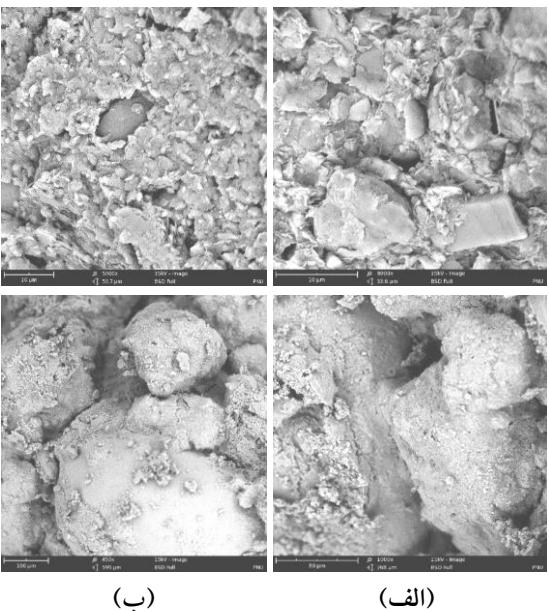


ت.۵. تأثیر درصد آهک و مدت زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری بلوک خشتشی

بررسی زیرساختاری

به‌منظور بررسی ریزساختاری از نمونه‌های بلوک خشتشی تثیت شده با آهک و سیمان از فرایند بررسی میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد.

نتیجه



ت ۶. الف- تصاویر SEM تثبیت با آهک؛ ب- تصاویر SEM تثبیت با سیمان

(ب)

۹۲ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در یک میزان سیمان ثابت با افزایش مدت زمان عمل آوری میزان مقاومت فشاری نمونه افزایش می‌یابد.

در خصوص تثبیت با آهک، با افزایش درصد آهک از ۴ درصد تا ۸ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۶ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.

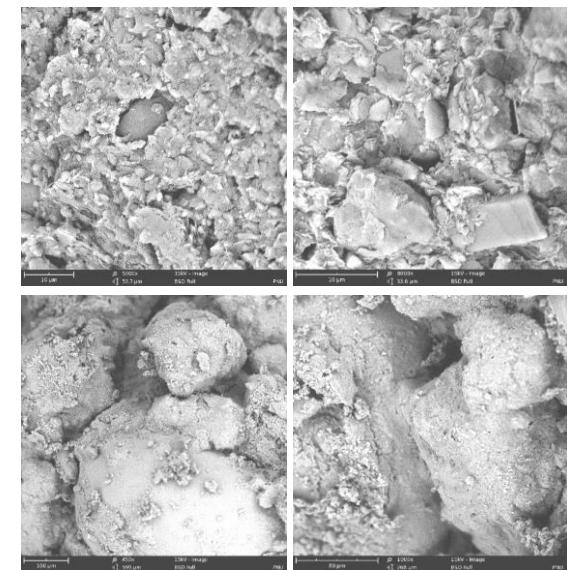
با افزایش درصد آهک از ۴ درصد به ۸ درصد در مدت عمل آوری ۳ روزه، مقاومت خمی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۹۶، ۹۹ و ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در یک میزان آهک ثابت با افزایش مدت زمان عمل آوری میزان مقاومت فشاری نمونه افزایش می‌یابد.

نتایج بیانگر این است که با استفاده از مواد تثبیت‌کننده از جمله آهک و سیمان می‌توان عملکرد و مقاومت بلوک‌های خشتشی را بهبود بخشدید و از آن در پیاده‌روهای بافت سنتی و خشت و گلی روستها استفاده کرد.

به عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی، به این موضوع می‌توان توجه نمود که مطالعات کاربردی بر روی بلوک‌های خشتشی از مقیاس‌های آزمایشگاهی به صورت محدود انجام شده است؛ ولی در قالب طرح‌های کلان کاربردی به ویژه در محیط‌های روستایی و سنتی می‌توان در مقیاس واقعی این مطالعات را تکمیل کرد. همچنین به علت محدودیت تحقیق در استفاده از نوعی خاصی از خاک می‌توان از انواع خاک‌ها و مواد افزودنی یا الیاف‌ها به جای تثبیت و تقویت‌کننده سیمان و آهک استفاده نمود. از جهت دیگر به منظور تکمیل بررسی‌های عملکردی این نوع بلوک‌ها آزمایش‌های دوام و پایداری را در شرایط محیطی مختلف و آزمایش‌های نفوذپذیری

ریزدانه اثرگذار است.



(ب)

ت ۶. الف- تصاویر SEM تثبیت با آهک؛ ب- تصاویر SEM تثبیت با سیمان

تشکر و قدردانی

و جذب آب را برای بلوک‌های پیشنهادی انجام داد.

بخشی از آزمایش‌های این تحقیق در قالب پروژه تخصصی توسط آقای محمدعلی انوری‌زارچ و زینب السادات هاشمی‌پور در دانشکده مهندسی عمران در آزمایشگاه مکانیک خاک و روستازی انجام شده است که ضمن تشکر از ایشان از مسئولین آزمایشگاه مذکور سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین از مدیریت دانشگاه پیام نور به ویژه دکتر کاظم‌نژاد که به‌دلیل کمک در تهیه تصاویر نمونه‌های بلوک خشتشی همکاری نمودند، تقدیر و تشکر می‌شود.

پی‌نوشت

1. Alcoforado
2. Okunade
3. Deboucha & Hashim
4. Jayasinghe & Mallawaarachchi
5. Sahu & Singh
6. Udawattha
7. Chavan

۸. بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید به روش ASTM-2487
9. Loss on Ignition
10. Udawattha

فهرست منابع

- احمدیان، رضا؛ بیات زاده، مهری. (۱۳۹۲)، طراحی پیاده راه‌ها در بافت تاریخی شهرها عاملی برای توسعه صنعت گردشگری (نمونه موردی شهر زنجان). اولین همایش ملی شهرسازی و معماری در گذر زمان.
- اسماعیلی، علیرضا؛ قلعه‌نویی، منصور. (۱۳۹۱)، اثر الیاف نخل خرما و آهک به عنوان تثبیت‌کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت).
فصلنامه مسکن و محیط رosta، (۱۳۸۱)، ۶۲-۵۳.
- اکرمی، غلامرضا؛ علیپور، لیلا. (۱۳۹۵)، نقش مصالح بومی در معماری پایدار از دیدگاه زیست‌محیطی. فصلنامه مسکن و محیط رosta، (۱۳۸۵)، ۴۸-۲۹.
- امیری، شاهرخ؛ باقرزاده، مسعود. (۱۳۹۴)، بررسی آثار و

کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران.

- سالم نیار، امین؛ کریمی، محمد؛ احیدیان، جواد. (۱۳۹۰)، مقاله بررسی اثر رطوبت و تراکم بر تغییرات مدول الاستیسیته خاک رسی مسئله‌دار و خاک-ماسه. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

- قربانی، اسماعیل؛ محمدی، مجتبی؛ موسوی، سیدحسن. (۱۳۹۹)، بررسی عملکرد آسفالت رنگی در کاهش نرخ خستگی در تصادفات جاده‌ای در سطح راههای برون‌شهری. اولین کنفرانس محیط‌زیست، عمران، معماری و شهرسازی.

- کردوانی، پرویز؛ موردهغاریریال و نووس. (۱۳۹۰)، توریسم و رویکرد نویسازی در طراحی بافت‌های تاریخی شهری (مطالعه موردی: شهر اصفهان). فصلنامه مسکن و محیط روتا، ۸(۳۰)، ۳۱-۱۹.

- مقدسی جهرمی، زینب. (۱۳۹۶)، اهمیت و چگونگی حفاظت و نگهداری از آثار باستانی و اینیه تاریخی. کنفرانس پژوهش‌های معماری و شهرسازی اسلامی و تاریخی ایران.

- میرزایی، ابراهیم؛ قایمی، سیدمحمد؛ اکبری مطلق، علی. (۱۳۹۶)، بررسی مشخصات و ویژگی‌های آسفالت رنگی. فصلنامه جاده، ۴۷(۹۱)، ۸۶-۷۷.

- میرزایی، فهیمه؛ مهدی زاده سراج، فاطمه؛ فیاض، ریما؛ مفیدی شمیرانی، مجید. (۱۴۰۰)، ارزیابی اقلیمی طرح‌های بهسازی مسکن روستایی (موردمطالعه: مناطق کوهستانی استان تهران). مسکن و محیط روتا، ۴۰(۱۷۳)، ۱۱۹-۱۳۴.

- نامور، شایسته؛ زینی، مسعود. (۱۳۹۸)، بررسی تأثیر سیلیکات سدیم و آکریلیک بر مقاومت فشاری، خمشی و رطوبتی ملات کاهگل. مسکن و محیط روتا، ۳۸(۱۶۸)، ۶۰-۵۱.

- AASHTO T307-99. (2003) Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

- Alcoforado, Maria João (2006). Planning procedures towards high climatic quality cities. Example referring to Lisbon. Finisterra, 41(82).

- Asi, Ibrahim . (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. Building and Environment, 42(1), 325-329.

- ASTM C936.(2008). Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units.

- ASTM C78-09. (2009). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam

with Third-Point Loading).

- Brena, Sergio., Peterman, Kara., & Sullivan, Rhyan. (2021). Construction and Materials Best Practice for Concrete Sidewalks.

- BS EN 1338. (2003). Concrete paving blocks - Requirements and test methods.

- Bunds, Kyle., Casper, Jonathan., Hipp, James., & Koenigstorfer, Joerg. (2019). Recreational walking decisions in urban away-from-home environments: The relevance of air quality, noise, traffic, and the natural environment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 363-375.

- Chavan, Mukesh., Tamhane, Shubham., Chavan, Sunil., & Phuge, Rushikesh. (2018). Manufacturing of pavement block by using waste plastic and sea sand. *Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(03).

- Chudyk, Anna., McKay, Heather, Winters, Meghan., Sims-Gould, Joanie., & Ashe,Maureen. (2017). Neighborhood walkability, physical activity, and walking for transportation: A cross-sectional study of older adults living on low income. *BMC Geriatrics*, 17(1), 1-14.

- Deboucha, Sadek., & Hashim, Roslan Hashim. (2011). A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*, 6(3), 499-506.

- Dormohamadi, Mansoure., & Rahimnia, Reza. (2020). Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00402.

- Galabada, G. H. (2016). Mud concrete paving block for pedestrian pavements in tropical climatic conditions.

- Galabada, Harsha., Thoradeniya, Bhadrani., & Halwatura, R. U. (2015). Public perceptions on urban outdoor constructions and their materials.

- Gao, Chunliu., & Cheng, Li. (2020). Tourism-driven rural spatial restructuring in the metropolitan fringe: An empirical observation. *Land Use Policy*, 95, 104609.

- Jayasinghe, C., & Mallawaarachchi, R. S. (2009). Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials. *Materials & Design*, 30(9), 3859-3868.

- Lojda, Jan. (2018). Specialties of environmental project management in civil engineering. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018, 897-904.

- Marchiori, Massimo. (2018). Mind your step: Monitoring pedestrian sidewalks. 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (IThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 627-634.

- Nanayakkara, N., Udawattha, C. D., & Halwatura, R. U. (2017). Investigation on elements and their fraction of housing construction cost. 2017 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 277-282.

- Okunade, Emmanuel (2008). Engineering properties of locally manufactured burnt brick pavers for Agrarian and rural earth roads. *American Journal of Applied Sciences*, 5(10), 1348–1351.
- Parvin, Mohammad., Razavian, Mohammad Tagh., & Tavakolinia, Jamileh. (2020). Importance of urban tourism planning in Tehran with economic approach. *Journal of Tourism Hospitality Research*, 8(4), 95–110.
- Ribeiro, Elvira Da Costa., & Wang, Bing.. (2020). Tourism led growth hypothesis: has the tourism industry an impact on the economic growth of Sao Tome and Principe? *International Journal of Economics and Financial Issues*, 10(1), 180.
- Saberian, Mohammad., & Khabiri, Mohammad Mehdi (2017). Experimental and numerical study of the effects of coal on pavement performance in mine haul road. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 2467–2478.
- Sahu, Manish Kumar., & Singh, Lokesh. (2017). Critical review on types of bricks type 14: plastic sand bricks. *Int J Mech Product Eng*, 5(11).
- Shahidehpour, Mohammad., Li, Zhiyi., & Ganji, Mehdi. (2018). Smart cities for a sustainable urbanization: Illuminating the need for establishing smart urban infrastructures. *IEEE Electrification Magazine*, 6(2), 16–33.
- Shanmugavalli, B., Gowtham, K., Nalwin, P. J., & Moorthy, B. E. (2017). Reuse of plastic waste in paver blocks. *International Journal of Engineering Research And*, V6, 2, 313–315.
- Thirugnanasambantham, N., Kumar, P. T., Sujithra, R., Selvaraman, R., & Bharathi, P. (2017). Manufacturing and testing of plastic sand bricks. *International Journal of Science and Engineering Research (IJOSER)*, 5(4), 150–155.
- Udawattha, Chameera., Galabada, Harsha., & Halwatura, Rangika. (2017). Mud concrete paving block for pedestrian pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 249–262.
- Udawattha, Chameera., & Halwatura, Rangika. (2016). Embodied energy of mud concrete block (MCB) versus brick and cement blocks. *Energy and Buildings*, 126, 28–35.
- Udawattha, Chameera., & Halwatura, Rangika. (2017). Life cycle cost of different Walling material used for affordable housing in tropics. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 15–29.
- World Tourism Organization. (2017). 2017 Edition UNWTO. *UNWTO Tourism Highlights*, 10. www.unwto.org
- <https://doi.org/10.22034/41.179.91>