[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]

[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

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

زهره غفوری فرد*، محمدمهدی خبیری**

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

چکیده

ایران در استفاده از خشت در معماری و ساخت‌وساز، از کهن‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که 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 باتوجه‌به 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، به‌شدت موردتوجه قرارگرفته است. ازآنجاکه رنگ تیره روسازی‌های متداول ازجمله روسازی آسفالتی با رنگ بناهای معماری – تاریخی خشت و گلی روستا همخوانی ندارد و از زیبایی آن می‌کاهد؛ در این پژوهش سعی شده است عملکرد خشت تثبیت‌شده با سیمان و آهک به‌منظور استفاده از آن در روسازی پیاده‌روها و معابر بافت روستایی با بار ترافیکی کم موردبررسی قرار گیرد. بدین منظور نمونه‌های بلوک خشتی از خاک ماسه رس‌دار ساخته شد و با درصدهای متفاوت سیمان و آهک تثبیت 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 تثبیت 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 عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۱۱، ۸۹ و ۹۲ درصد افزایش می‌یابد. در خصوص تثبیت 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 عمل‌آوری 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 تثبیت‌کننده، مدت زمان عمل‌آوری 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

مقدمه

صنعت گردشگری به‌عنوان 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 به‌عنوان موتور توسعه از آن نام برده می‌شود، به علت اهمیتی که ازنظر اقتصادی و اجتماعی دارد، روزبه‌روز موردتوجه بیشتری قرارگرفته و دولت‌ها به آن اهمیت ویژه‌ای می‌دهند؛ به‌طوری‌که 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; World Tourism Organization, 2017). از طرفی فضاهای روستایی و شهری به‌ویژه محدوده بافت‌های تاریخی و قدیمی به علت وجود جاذبه‌های معماری، فرهنگی و بناهای ارزشمندی که نمادی از شرایط اقتصادی، اعتقادی و اجتماعی گذشتگان است، از مقاصد مهم گردشگری به شمار می‌روند (کردوانی و موردغفاری، ۱۳۹۰). کشور ایران نیز در این زمینه بسیار غنی است (امیری و باقرزاده، ۱۳۹۴)؛ به‌طوری‌که دارای کهن‌ترین فرهنگ و تمدن جهان و در رده‌های اول دارنده آثار باستانی و ابنیه تاریخی و فرهنگی فاخر در جهان است (مقدسی جهرمی، ۱۳۹۶). ازآنجایی‌که ایران ازنظر 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 روستاها به چشم می‌خورد (اسماعیلی و قلعه نویی، ۱۳۹۱). بدین‌جهت استفاده از پیاده‌رو متناسب با این سازه‌ها و بافت سنتی روستاها یا به عبارتی الگوبرداری از معماری بومی منطقه، علاوه بر اینکه اولین و پایدارترین اقدام در طراحی معماری 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؛ ازاین‌رو 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 تسخیرکننده و متأثرکننده، کاملاً بی‌تحرک، ساکن و عمیق است؛ ازاین‌رو استفاده از روسازی‌های رنگی ازجمله 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 خشتی است. علاوه بر این، استفاده از آن می‌تواند مصرف آسفالت و سیمان (که در روسازی با رویه‌های بتنی و انواع موزاییک‌ها استفاده می‌شود) را به‌عنوان یکی از موارد تهدیدکننده محیط‌زیست، تا حد مطلوبی بکاهد. همچنین ازلحاظ اقتصادی، چون مصالح موردنیاز بلوک‌های خشتی در دسترس است، می‌توان با کمترین هزینه این بلوک‌ها را تولید کرد، درنتیجه ازلحاظ قیمت بسیار ارزان‌تر از سایر روسازی‌های متداول است (زارع شاه‌آبادی و فرح‌زا، ۱۳۹۶؛ نامور و زینی، ۱۳۹۸؛

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

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

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

– عملکرد بلوک خشتی تثبیت‌شده با سیمان چگونه است و تا چه حد باعث بهبود خواص آن می‌شود؟

– تأثیر آهک بر بهبود عملکرد بلوک خشتی چگونه است؟

ادبیات موضوع

امروزه بازسازی فضایی روستایی به‌عنوان یک روش مهم در دستیابی به احیای روستاها جهت ارتقای جذابیت محیط روستایی و جذب بیشتر توریست بسیار موردتوجه دولت‌ها قرارگرفته است (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 واداشته است. به‌طورکلی استفاده از منابع طبیعی در پروژه‌های عمرانی دارای مزایایی ازجمله کاهش هزینه اولیه، کاهش هزینه‌های انرژی مربوط به حمل‌ونقل، 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. به‌عنوان‌مثال الکوفورادو[1] (۲۰۰۶) در 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. درحالی‌که سطوح مصنوعی از درصد بالایی از مواد غیر منعکس‌کننده و مقاوم در برابر آب تشکیل شده‌اند. همچنین در این نوع خاک‌ها جذب مقدار قابل‌توجهی از انرژی خورشیدی باعث تولید گرما می‌شود. ایجاد محیط‌زیست غیرطبیعی و ساختنی و جایگزین کردن آن با محیط طبیعی و درنتیجه رشد محیط‌های مصنوعی به‌صورت روزافزون در حال افزایش است. بااین‌وجود 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[2] (۲۰۰۸) به بررسی استفاده از بلوک‌های رسی پخته که به‌صورت محلی تولید می‌شوند، در پیاده‌روهایی با عبور و مرور کم، پرداخت. او نتیجه گرفت که این نوع بلوک الزامات ASTM C 902 برای عابر پیاده را برآورده می‌کند و برای معابری با ترافیک کم مناسب است. دبوچا و هاشم[3] (۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان «مروری بر بلوک‌ها و بلوک‌های خاکی فشرده و تثبیت‌شده»، بیان می‌دارد که اگرچه ایده اولیه ساخت بلوک‌های رسی به‌عنوان مواد روسازی صرفاً به دلیل نگرانی در خصوص هزینه‌ها بوده است اما پژوهش‌ها نشان داده است که مزایای استفاده آن ازنظر نجات فرهنگ، میراث و سازگاری با محیط‌زیست بسیار موردتوجه است. جیازینگ و مالاواراچی[4] (۲۰۰۹)

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

نیز در پژوهشی به بررسی مقاومت خمشی مصالح بنایی خاکی تثبیت‌شده فشرده می‌پردازند و بیان می‌کنند که امروزه با افزایش هزینه‌های ساخت‌وساز، نیاز به توسعه مواد و فناوری کم‌هزینه برای صنعت ساخت‌وساز وجود دارد. بلوک پخته‌شده 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 هوازدگی و ظاهر جذاب است که عملکرد خوبی در پروژه‌های عمرانی دارد. در سال ۲۰۱۷ نیز ساهو و سینگ[5] در بررسی انتقادی انواع بلوک‌ها بیان داشتند که بلوک یکی از رایج‌ترین و پر تقاضاترین مصالح در ساخت‌وساز است؛ چراکه ازنظر اقتصادی و محیط‌زیست مناسب است و در بسیاری از مناطق به‌راحتی در دسترس است. همچنین بیان می‌دارند که امروزه می‌توان با فناوری‌های جدید انواع بلوک‌ها ازجمله بلوک‌های خاکی و ماسه‌ای را با مواد مختلف تثبیت کرد و از آن در پروژه‌های عمرانی ازجمله راه‌سازی، پیاده‌روسازی و غیره استفاده کرد (Sahu & Singh, 2017). اودواتها[6] و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای تحت عنوان «بررسی استفاده از بلوک سنگ‌فرش بتنی خشتی برای پیاده‌روها»، بیان می‌دارد که بلوک سنگ‌فرش بتنی خشتی 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 درصد تا ۲۲ درصد سیمان همراه با رطوبت بین ۱۴ تا ۱۵ درصد تولید کرد که عملکرد مناسبی ازنظر فنی و سازگاری با محیط‌زیست دارد. همچنین چاوان[7] و همکاران (۲۰۱۸)، عملکرد بلوک روسازی ساخته‌شده از شن، ماسه و پلاستیک ضایعاتی را موردبررسی 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 این‌گونه بلوک‌ها هم ازنظر محیط زیستی و هم ازنظر اقتصادی بسیار مفید است.

در پژوهشی دیگر، اسماعیلی و قلعه‌نوی با بیان اینکه در بسیاری از نقاط جهان، خشت به‌عنوان مصالح ساختمانی، در بافت‌های شهری و روستایی کاربرد فراوان دارد و باتوجه‌به اینکه درصد زیادی از مساحت ایران را مناطق گرم و خشک و کویری تشکیل داده است، موضوع حذف خشت و بناهای خشتی روش درست و مناسبی به نظر نمی‌رسد؛ به بررسی اثر الیاف نخل خرما و آهک به‌عنوان 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 خشتی تثبیت‌شده با آهک و الیاف نخل خرما است (اسماعیلی و قلعه‌نویی، ۱۳۹۱). باتر و همکاران نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر مواد افزودنی مختلف تکتوسیلیکاتی میکرونیزه در ترکیب با ملات کاهگل پرداختند و یافتند 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 نفوذپذیری 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

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

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 بناها، محوطه‌ها و آثار معماری خشتی تاریخی و باستانی متعدد و زیادی در ایران وجود دارد که پراکندگی آن‌ها بیشتر در روستاها و مناطق گرم و کویری ایران به چشم می‌خورد، تأثیر آهک بر بهینه‌سازی خشت خام در مقابل رطوبت را موردبررسی قرار دادند. در این پژوهش پنج نوع خشت با ترکیب ۰، ۲، ۵، ۷، و ۱۰ 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 ساخته‌شده با ۲ درصد آهک بود و نتایج بیان‌کننده تأثیر مثبت آهک بر عملکرد خشت بود (بهرام‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). درمحمدی و همکاران (۱۳۹۹) با تأکید بر اینکه ایران دارای آثار باارزش تاریخی خشت و گلی است و باید در حفظ و ترویج آن کوشید، به مطالعه در خصوص ارزیابی امکان بهبود خواص مکانیکی خشت ازطریق تثبیت مکانیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک پرداختند. بدین منظور آن‌ها با نمونه‌گیری از ۶ معدن خاک سنتی اردکان و تثبیت آن‌ها با به‌کارگیری روش‌های تثبیت مکانیکی (کوبش) با تأکید بر تثبیت فیزیکی خاک (اصلاح دانه‌بندی و افزودن ماسه)، به اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها پرداختند. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری نشانگر بهبود مقاومت فشاری در خشت تولیدشده در مقایسه با روش سنتی تولید است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به‌منظور بهبود مقاومت فشاری خشت تولیدشده علاوه بر تثبیت مکانیکی، اصلاح دانه‌بندی می‌تواند در تغییر مقاومت فشاری مؤثر باشد (درمحمدی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر درمحمدی 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 موردبررسی قرار داده شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین تراکم دینامیکی و مقاومت مکانیکی وجود دارد؛ به‌طوری‌که تراکم خاک در نمونه‌های آزمایشی باعث افزایش مقاومت فشاری۷۹/۴۳ درصد، مقاومت کششی ۴۲/۴۲ درصد و مقاومت خمشی ۷۵ درصد نسبت به خشت‌های شاهد (فاقد تراکم) می‌شود. باتوجه‌به 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 حمل‌ونقلی فعال در جهان شناخته می‌شود (Bunds et al., 2019)؛ به‌طوری‌که بیش از ۹۵ درصد از کاربران مسیر، در صورت وجود مسیر پیاده‌روی مناسب و ایمن، پیاده‌روی را بر حمل‌ونقل موتوری در مسافت‌های کم ترجیح می‌دهند (Galabada et al., 2015). ازاین‌رو ایجاد انگیزه لازم برای افراد جهت استفاده از پیاده‌روها مزایای زیادی دارد که شامل منافع زیست‌محیطی با حداقل

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

کردن استفاده از حمل‌ونقل موتوری است (Chudyk et al., 2017; Marchiori, 2018). بدین‌جهت استفاده 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 به‌کارگیری بلوک‌های خشتی در پروژه‌های عمرانی انجام‌شده است؛ اما هیچ‌کدام از آن‌ها به بررسی روسازی مناسب برای بافت خشت و گلی سنتی شهرها اشاره نکرده‌اند. در این پژوهش استفاده از خشت به‌عنوان روسازی مناسب ازنظر 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 به‌عنوان روسازی پیاده‌رو مناسب ازنظر 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، خاک ماسه‌ای دارای مقدار قابل‌توجه ریزدانه خمیری است که از محوطه پیاده‌روی بدون رویه دانشگاه یزد تهیه شده است. این خاک پس از برداشت به آزمایشگاه منتقل شد و پس از خشک شدن در کوره و الک کردن، درصد عبوری از هر الک مشخص گردید. علاوه بر این برای حذف برخی از دانه‌های درشت از الک #۱۲ استفاده شد. دلیل انتخاب این خاک این است که به دلیل دانه‌بندی بد و ضعیف و ساختار نسبتاً ریزدانه در صورت عملکرد مطلوب آن پس از اصلاح و تقویت، می‌توان نتیجه گرفت سایر خاک‌ها با شرایط بهتر نیز دارای قابلیت استفاده به‌صورت بلوک خشتی برای ساخت پیاده‌روها و معابر کم ترافیک مانند معابر روستایی را دارند.

خاک مورداستفاده دانه‌بندی غیریکنواخت داشته که شامل ابعاد و جنس از ماسه تا رس بوده است و قسمت ریزدانه آن به عبارتی، عبوری از الک #۲۰۰، به علت ویژگی‌های خمیری آن در گروه خاک‌های رسی قرار گرفت؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که ۸۰ درصد وزنی این خاک ماسه‌ای و ۲۰ درصد آن با ویژگی‌های رسی است[۸] که به ترتیب چگالی ویژه، حد خمیری و دامنه خمیری این خاک ۲/۶۹، ۲۶ و ۱۴ است.

همچنین برای تثبیت بلوک‌های خشتی از آهک و سیمان استفاده شد که در جدول شماره ۱ مشخصات سیمان و آهک آورده شده است.

ج۱. مشخصات سیمان و آهک مورداستفاده

مشخصات سیمان	
مقدار (٪)	خصوصیات
۲۰	SiO_2
۶	Al_2O_3
۶	Fe_2O_3
۵	MgO
۳	SO_3
۳	کاهش وزن
۰/۷۵	ذرات نامحلول
۸	C_3A

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

مساحت ویژه (gr/cm2)	۲۸۰۰	
مقاومت فشاری (kg/cm2)	۳ روزه	۱۰۰
	۷روزه	۱۷۵
	۲۸ روزه	۳۱۵
حرارت هیدراتاسیون (Cal/gr)	۷۰	
مشخصات آهک		
خصوصیات	**مقدار (٪)**	
CaO	۴۷/۲۷	
SiO_2	۸/۷۱	
AL_2O_3	۳/۱۷	
Fe_2O_3	۱/۵۶	
MgO	۰/۹۸۷	
K_2O	۰/۷۹۰	
SO_3	۰/۶۷۸	
TiO_2	۰/۲۳۲	
Na_2O	۰/۰۸۲	
ZnO	۰/۰۳۴	
SrO	۰/۰۲۹	
MnO	۰/۰۲۶	
CuO	۰/۰۲۶	
PbO	۰/۰۲۴	
Cl	۰/۰۲۳	
LOI[۹]	۳۶/۱۵	

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 ساخته‌شده به‌صورت 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 ۳۰×۵×۵ سانتی‌متر برای آزمایش تعیین مقاومت خمشی 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 موردمطالعه پیوستگی و چسبندگی داخلی اندکی دارد و درنتیجه مقاومتی ندارد.

آزمایش‌های انجام‌شده

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش آزمایش‌های تعیین درصد جذب آب (ASTM C936.,2008)، مقاومت فشاری (BS EN 1338., 2003)، مقاومت خمشی (ASTM C78.,2009) و مقاومت لغزشی (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 تولیدشده توسط این مطالعه انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 1338، ۳، ۷ و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری انجام شد. ابعاد هرکدام از مکعب‌های آزمایش قبل از خیساندن

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 حداکثر بار بر مساحت آن محاسبه شد. لازم به ذکر است که حداقل مقاومت موردنیاز روسازی برای استفاده از پیاده‌روها $۱۵ \frac{N}{mm^2}$ است.

آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی بلوک‌های خشتی بعد از ۳ روز عمل‌آوری تحت شرایط یکسان با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه بر اساس استاندارد ASTM C78 انجام گرفت.

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

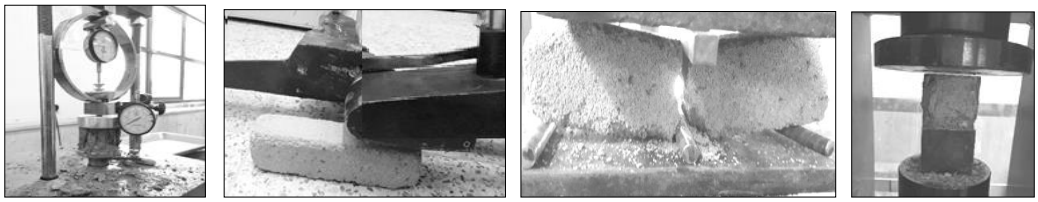
آزمایش مقاومت لغزشی به کمک پاندول انگلیسی

مقاومت در برابر لغزش برای ایمنی مسیرهای عابران پیاده، هم در کنار جاده و هم در مناطق تفریحی بسیار مهم است. ازاین‌رو، در این پژوهش مقاومت لغزشی بلوک‌های خشتی با دستگاه پاندول انگلیسی مطابق استاندارد BS EN 1338 اندازه‌گیری شد (Asi, 2007). تصویر شماره ۱-ج، نحوه انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.

تعیین مدول الاستیسیته

یکی از مسائل اصلی در مهندسی عمران، مدول الاستیسیته مصالح به‌ویژه در طراحی است (تبرئی و همکاران، ۱۳۹۶)؛ هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مصالح در برابر تنش‌های واردشده تغییر شکل کمتری خواهد داشت (سالم نیا و همکاران،۱۳۹۰). محاسبه مدول الاستیسیته به کمک رسم نمودار تنش کرنش انجام شد که این مقدار در کرنش ۵۰ درصد حاصل می‌شود. تصویر شماره ۱-د، نمایی از این آزمایش را نشان می‌دهد.

به‌طورکلی آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق در جدول شماره ۲ ارائه شده است.



(الف) (ب) (ج) (د)

ت۱. الف- آزمایش مقاومت فشاری؛ ب- آزمایش مقاومت خمشی؛ ج- آزمایش مقاومت لغزشی به کمک پاندول انگلیسی؛ د-تعیین مدول الاستیسیته

ج۲. آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق

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

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

یافته‌ها

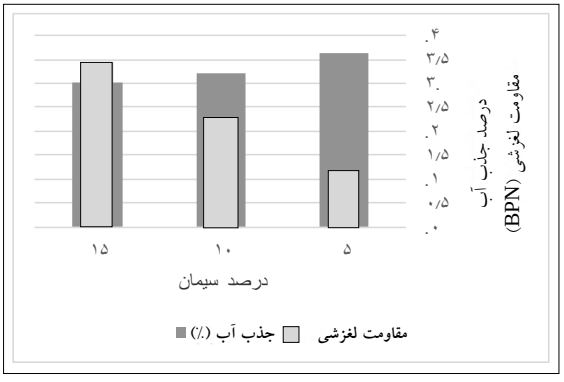
در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های شرح داده‌شده در قسمت ۳ پرداخته شده و نتایج در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

ج۳. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق

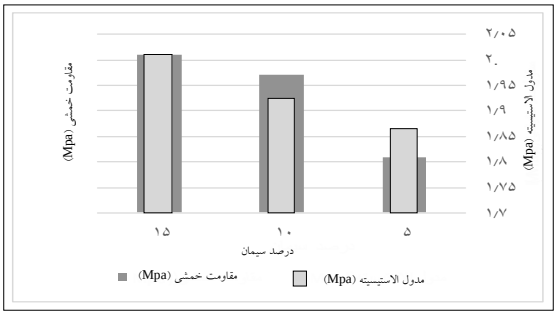
ماده افزودنی	درصد	جذب آب (٪)	اصطکاک	مقاومت خمشی (Mpa)	مدول الاستیسیته (pa)	مقاومت فشاری (Mpa)		
مدت عمل‌آوری (روز)	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۷	۲۸
سیمان	۵	۳/۶۲	۶۶	۱/۸۱	۱۶۴	۱۵/۲	۱۷/۳	۱۷/۸
	۱۰	۳/۲۱	۶۲	۱/۹۷	۲۲۴	۲۱/۸	۲۳/۴	۲۴/۱
	۱۵	۳/۰۱	۵۸	۲/۰۱	۳۱۰	۲۹/۲	۳۰/۴	۳۰/۸
آهک	۴	۴/۱۲	۷۲	۱/۰۷	۱۰۵	۹/۱	۱۰/۴	۱۱/۲
	۶	۴/۰۵	۶۵	۱/۳۲	۱۳۷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

بررسی عملکرد بلوک خشتی تثبیت‌شده با سیمان

در تصاویر شماره ۲ و ۳، تأثیر میزان سیمان بر عملکرد بلوک خشتی به‌وضوح قابل‌مشاهده 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 خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد در مدت عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، 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 چسبندگی 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 باتوجه‌به تصویر شماره ۳ با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری بلوک خشتی تثبیت‌شده افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در یک میزان سیمان ثابت به‌عنوان نمونه ۵ درصد، از ۳ تا ۲۸ روز عمل‌آوری میزان مقاومت فشاری نمونه ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است؛ زیرا که افزایش مدت زمان عمل‌آوری 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 خمشی، کششی و خصوصیات خمیری خشت می‌شود. همچنین نتایج پژوهش یوداتا[10] و همکاران (۲۰۱۷) تحت عنوان «سنگ‌فرش بتنی خشتی برای روسازی‌های پیاده‌رو» بیانگر آن است که سنگ‌فرش بتنی خشتی عملکرد فنی مناسبی به‌عنوان روسازی پیاده‌روها دارد که با نتایج این پژوهش همسو است.

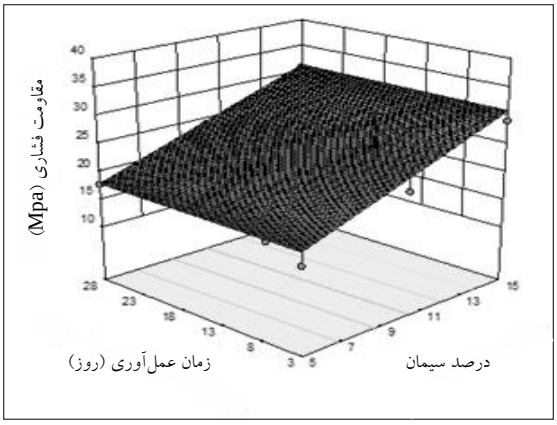


(الف)



(ب)

ت۲. تغییرات پارامترهای الف- جذب آب و مقاومت لغزشی؛ ب- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بلوک خشتی تثبیت‌شده با سیمان در عمل‌آوری ۳ روزه



ت۳. تأثیر درصد سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بلوک خشتی

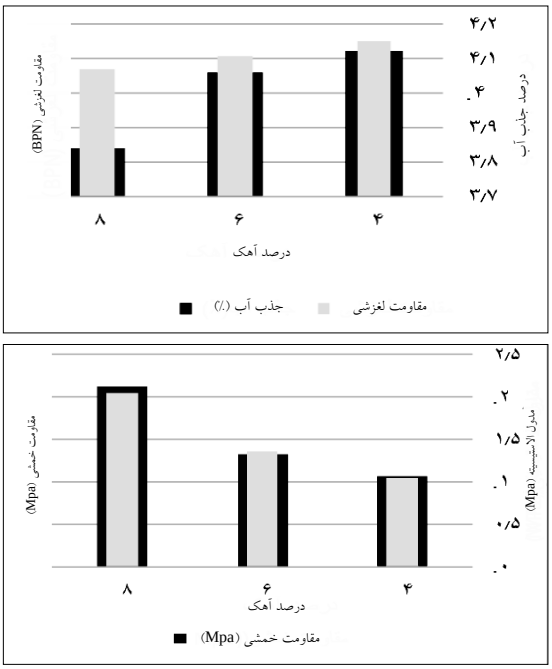
بررسی عملکرد بلوک خشتی تثبیت‌شده با آهک

در تصاویر شماره ۴ و ۵ تأثیر میزان آهک بر عملکرد بلوک خشتی به‌وضوح قابل‌مشاهده 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 خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد آهک از ۴ درصد به ۸ درصد در مدت عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۹۹، ۹۶ و ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علت کاهش درصد جذب آب با افزایش درصد آهک، پر شدن فضاهای خالی درون بلوک خشتی به‌وسیله آهک است؛ زیرا درصد جذب آب مواد به‌شدت تحت تأثیر درصد فضای خالی آن است. همچنین با افزایش آهک و چسبندگی 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 باتوجه‌به تصویر شماره ۵ با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری بلوک خشتی تثبیت‌شده افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در یک میزان آهک ثابت به‌عنوان نمونه ۴ درصد، از ۳ تا ۲۸ روز عمل‌آوری میزان مقاومت فشاری نمونه ۲۳ درصد افزایش پیداکرده است. درنتیجه مدت زمان عمل‌آوری، علاوه بر مقدار ماده افزودنی بر مقاومت مؤثر است. حجازی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تحت عنوان «تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته‌شده از خاک اصفهان»، با بررسی خشت تثبیت‌شده با مواد مختلف ازجمله 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 سایشی، جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری خشت می‌شود که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

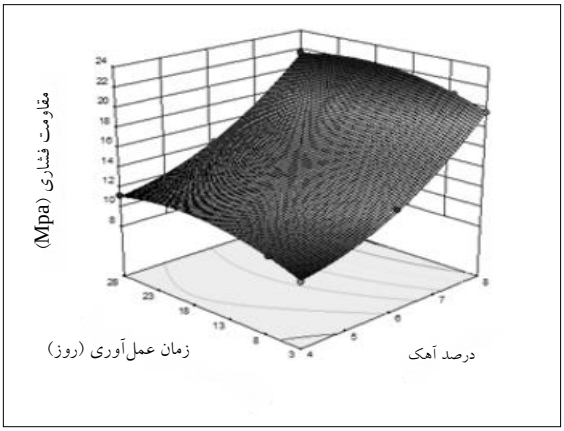
درنهایت باتوجه‌به نتایج و عملکرد مثبت بلوک خشتی تثبیت‌شده با افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک می‌توان گفت بلوک‌های خشتی تثبیت‌شده مصالحی مناسب ازنظر اقتصادی و محیط زیستی برای روسازی پیاده‌روها، مخصوصاً در مناطق گرمسیر که خشت به‌وفور یافت می‌شود، است (Galabada, 2016).

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]



ت۴. تغییرات پارامترهای الف- جذب آب و مقاومت لغزشی؛ ب- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بلوک خشتی تثبیت‌شده با آهک در عمل‌آوری ۳ روزه



ت۵. تأثیر درصد آهک و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بلوک خشتی

بررسی زیرساختاری

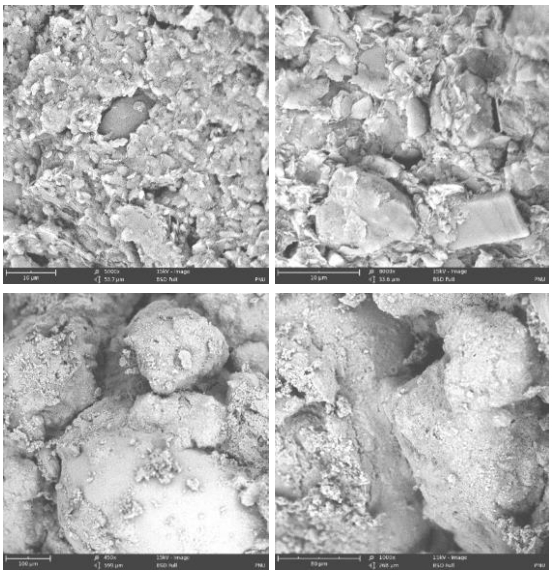
به‌منظور بررسی ریزساختاری از نمونه‌های بلوک خشتی تثبیت‌شده با آهک و سیمان از فرایند بررسی میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. میکروسکوپ الکترونیکی ابزار جدید مناسب برای تحلیل مورفولوژی ساختارهای درونی و پیوستگی اجزا مواد مرکب است در حقیقت این روش با تابش فوتون‌های نوری با طول موج کوتاه، باعث وضوح قدرت تفکیک و دستیابی به اطلاعات مناسب‌تر است. همچنین به کمک این تصاویر می‌توان نحوه اختلاط و ساختار خشت تثبیت‌شده با این دو ماده تثبیت‌کننده را به‌خوبی بررسی کرد.

مخلوط ساخته‌شده در اختلاط مختلف در این پژوهش، در تصویر شماره ۶ ارائه‌شده 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 قابل‌مشاهده است.

ملات چسبنده پوزولان حاوی سیمان یا آهک با خاک رس توانسته است فاصله بین ذرات ماسه را به‌خوبی پر کند و این امر باعث افزایش مقاومت تک‌محوره بلوک‌های خشتی حاوی درصدهای مختلف سیمان و آهک می‌شود. همان‌طور که در تصویر شماره ۶ قابل‌مشاهده است، پیوستگی بین اجزا خاک تثبیت‌شده نسبت به قبل تثبیت بیشتر شده است که در تمامی موارد افزایش مقاومت و مدول الاستیسته خاک را به دنبال دارد.

همچنین باتوجه‌به نتایج ارائه‌شده در جدول شماره ۳، میانگین مقاومت خمشی و فشاری بلوک تثبیت‌شده با سیمان به ترتیب حدود ۲۹ درصد و ۵۷ درصد بیشتر از مقاومت تثبیت‌شده 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 مجتمع‌تری می‌شود و مصالح را به‌خوبی به هم می‌چسباند و درنتیجه مقاومت بیشتری حاصل می‌شود. این در حالی است که آهک بیشتر در خواص خمیری

ریزدانه اثرگذار است.



(الف) (ب)

ت۶. الف- تصاویر SEM تثبیت با آهک؛ ب- تصاویر SEM تثبیت با سیمان

نتیجه

این پژوهش باهدف بررسی عملکرد خشت تثبیت‌شده با سیمان و آهک به‌منظور استفاده از آن در روسازی پیاده‌روهای معابر بافت سنتی با بار ترافیکی کم انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها بلوک خشتی متفاوتی از خاک ماسه رس‌دار ساخته شد و با درصدهای متفاوت سیمان و آهک تثبیت شد و سپس تحت آزمایش درصد جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت لغزشی و درنهایت تعیین مدول الاستیسیته قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است: در خصوص تثبیت با سیمان، با افزایش درصد سیمان از ۵ به ۱۵ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۴ درصد کاهش می‌یابد.

با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد در مدت عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۱۱، ۸۹ و ۹۲ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در یک میزان سیمان ثابت با افزایش مدت زمان عمل‌آوری 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 عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری به ترتیب حدود ۹۹، ۹۶ و ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

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

نتایج بیانگر این است که با استفاده از مواد تثبیت‌کننده ازجمله آهک و سیمان می‌توان عملکرد و مقاومت بلوک‌های خشتی را بهبود بخشید و از آن در پیاده‌روهای بافت سنتی و خشت و گلی روستاها استفاده کرد.

به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی، به این موضوع می‌توان توجه نمود که مطالعات کاربردی بر روی بلوک‌های خشتی از مقیاس‌های آزمایشگاهی به‌صورت محدود انجام شده است؛ ولی در قالب طرح‌های کلان کاربردی به‌ویژه 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 به‌جای تثبیت و تقویت‌کننده سیمان و آهک استفاده نمود. از جهت دیگر به‌منظور تکمیل بررسی‌های عملکردی این نوع بلوک‌ها آزمایش‌های دوام و پایداری را در شرایط محیطی مختلف و آزمایش‌های نفوذپذیری

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

و جذب آب را برای بلوک‌های پیشنهادی انجام داد.

تشکر و قدردانی

بخشی از آزمایش‌های این تحقیق در قالب پروژه تخصصی توسط آقای محمدعلی انوری‌زارچ و زینب‌السادات هاشمی‌پور در دانشکده مهندسی عمران در آزمایشگاه مکانیک خاک و روسازی انجام‌شده 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 خشتی 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 Lgnition
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 به‌عنوان تثبیت‌کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت). فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۳۱(۱۳۸)، ۶۲–۵۳.

– اکرمی، غلامرضا؛ علیپور، لیلا. (۱۳۹۵)، نقش مصالح بومی در معماری پایدار از دیدگاه زیست‌محیطی. فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۳۵(۱۵۶)، ۴۸–۲۹.

– امیری، شاهرخ؛ باقرزاده، مسعود. (۱۳۹۴)، بررسی آثار و جاذبه‌های گردشگری در ایران. کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط‌زیست؛ افق‌های آینده، نگاه به گذشته.

– باتر، مسعود؛ عابدی کوپایی، جهانگیر؛ احمدی، حسین؛ عمادی، رحمت اله. (۱۳۹۶)، بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های میکرونیزه تکتوسیلیکاتی بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود سنتی کاهگل. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۴(۱).

– بهرام‌زاده، کاوه؛ رازقی، علیرضا؛ میری، نجمه خاتون. (۱۳۹۷)، تأثیر آهک بر بهینه‌سازی خشت خام در مقابل رطوبت. فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۳۷(۱۶۴)، ۱۲۴–۱۱۵.

پاکدل، محبوبه؛ عالمی، بابک. (۱۳۹۹)، خشت، مصالحی پایدار در معماری خانه‌های تاریخی اقلیم گرم و خشک ایران. نخستین همایش ملی مسکن پایدار.

– تبرئی، عبداله؛ ابریشمی، سعید؛ سیدی حسینی نیا، سید احسان؛ گنجیان، نوید. (۱۳۹۶)، تعیین مدول الاستیسته خاک دانه‌ای خشک با آزمایش بارگذاری یک‌بعدی. کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.

– حجازی، مهرداد؛ هاشمی، محمود؛ جمالی نیا، الهه.؛ باتوانی، محمود. (۱۳۹۴)، تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته‌شده از خاک اصفهان. فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۳۴(۱۵۱)، ۸۰–۶۷.

– درمحمدی، منصوره؛ فتوحی اردکانی، محسن؛ رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۹۹)، تأثیر تثبیت مکانیکی و اصلاح دانه‌بندی خاک بر مقاومت فشاری خشت؛ تجربه‌ای برای بهبود رفتار فیزیکی خشت در منطقه اردکان یزد. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۷ (شماره ویژه ۴).

– رحیمی، حسن. (۱۳۹۶)، مصالح ساختمانی. انتشارات دانشگاه تهران.

– رحیم‌نیا، رضا؛ حیدری، داریوش. (۱۳۹۰)، تأثیر دامنه خمیری خاک (PI) بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت‌شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی. نشریه علمی مرمت و معماری ایران، ۱(۲)، ۱۰۲–۹۱.

– زارع شاه‌آبادی، شادی؛ فرح‌زا، نریمان. (۱۳۹۶)، پیمایشی در تولید خشت فشرده متناسب با شرایط اقلیمی یزد. ششمین

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

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

– سالم نیار، امین؛ کریمی، محمد؛ احدیان، 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؛ موردغفاریریال ونوس. (۱۳۹۰)، توریسم و رویکرد نوسازی در طراحی بافت‌های تاریخی شهری (مطالعه موردی: شهر اصفهان). فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۸(۳۰)، ۳۱–۱۹.

– مقدسی جهرمی، زینب. (۱۳۹۶)، اهمیت و چگونگی حفاظت و نگهداری از آثار باستانی و ابنیه 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 روستا، 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 روستا, 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, Bhadranie., & 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.

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

[Downloaded from jhre.ir on 2025-03-18]
[DOR: 20.1001.1.20084994.1401.41.179.7.5]
[DOI: DOI: 10.22034/41.179.91]

- 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 (IJ0SER), 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