

# 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؛ 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 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، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاکه رنگ تیره روسازی‌های متداول از جمله 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 به منظور 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 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 در نهایت 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 به عنوان یکی از متنوع ترین و بزرگ ترین صنایع در جهان، مهم ترین منبع درآمد و ایجاد فرصت های شغلی برای بسیاری از کشورهای دنیا است (Ribeiro & Wang, 2020)؛ این صنعت که به عنوان موتور توسعه از آن نام برده می شود، به علت اهمیتی که از نظر اقتصادی و اجتماعی دارد، روزبه روز مورد توجه بیشتری قرار گرفته و دولت ها به آن اهمیت ویژه ای می دهند؛ به طوری که امروزه یکی از پایه های اصلی و استوار اقتصاد جهان است. در تقسیم بندی جهانی پس از نفت و خودروسازی، صنعت گردشگری در رده سوم قرار می گیرد (Parvin et al., 2020; World Tourism Organization, 2017). از طرفی فضاهای روستایی و شهری به ویژه محدوده بافت های تاریخی و قدیمی به علت وجود جاذبه های معماری، فرهنگی و بناهای ارزشمندی که نمادی از شرایط اقتصادی، اعتقادی و اجتماعی گذشتگان است، از مقاصد مهم گردشگری به شمار می روند (کردوانی و موردغفاری، ۱۳۹۰). کشور ایران نیز در این زمینه بسیار غنی است (امیری و باقرزاده، ۱۳۹۴)؛ به طوری که دارای کهن ترین فرهنگ و تمدن جهان و در رده های اول دارنده آثار باستانی و ابنیه تاریخی و فرهنگی فاخر در جهان است (مقدسی 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 نیمه خشک محسوب می شود؛ تعداد زیادی از خانه های قدیمی و آثار باستانی فاخر، سازه هایی از جنس خشت و گل است (پاکدل و عالمی، ۱۳۹۹) که اکثر این سازه های خشت و گلی در روستاها به چشم می خورد (اسماعیلی و قلعه نویی، ۱۳۹۱). بدین جهت استفاده از پیاده رو متناسب با این سازه ها 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؛ می تواند جذابیت این آثار گردشگری را بیشتر کند و باعث جذب گردشگر و در نتیجه توسعه هر چه 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 محیط ها، مکان ها و فضاهای شهری است؛ از این رو رنگ معابر در بافت تاریخی نیز اهمیت ویژه دارد. رنگ تیره مصالح متداول، با رنگ روشن سازه های خشت و گلی هماهنگی ندارد. روان شناسان معتقدند که رنگ سیاه شدیداً تسخیرکننده و متأثرکننده، کاملاً بی تحرک، ساکن و عمیق است؛ از این رو استفاده از روسازی های رنگی از جمله آسفالت های رنگی توسط محققین مطرح شد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹) که معایب متعدد دارد و مهم ترین عیب این نوع روسازی ها هزینه بالای آن نسبت به آسفالت معمولی است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از مصالحی که با سازه های خشت و گلی همخوانی مناسب دارد، استفاده از بلوک های خشتی است. علاوه بر این، استفاده از آن می تواند مصرف آسفالت و سیمان (که در روسازی با رویه های بتنی و انواع موزاییک ها استفاده می شود) را به عنوان یکی از موارد تهدیدکننده محیط زیست، تا حد مطلوبی بکاهد. همچنین از لحاظ اقتصادی، چون مصالح مورد نیاز بلوک های خشتی در دسترس است، می توان با کمترین هزینه این بلوک ها را تولید کرد، در نتیجه از لحاظ قیمت بسیار ارزان تر از سایر روسازی های متداول است (زارع شاه آبادی و فرحزاد، ۱۳۹۶؛ نامور و زینی، ۱۳۹۸)؛

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، بخار آب 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 در نتیجه 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 اوکونادا<sup>۲</sup> (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 ASTM C 902 برای عابر پیاده را برآورده می‌کند و برای معابری با ترافیک کم مناسب است. دیوچا و هاشم<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان «مروری بر بلوک‌ها و بلوک‌های خاکی فشرده و تثبیت‌شده»، 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 مالواراچی<sup>۴</sup> (۲۰۰۹)

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 پیاده‌روهایی 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 به عنوان یک روش مهم در دستیابی به احیای روستاها جهت ارتقای جذابیت محیط روستایی و جذب بیشتر توریست بسیار مورد توجه دولت‌ها قرار گرفته است (Gao & Cheng, 2020). از طرفی با افزایش جمعیت و در نتیجه 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 پیدا کرده است (Lojda, 2018; Shahidehpour et al., 2018; Shanmugavalli et al., 2017) و مهندسیین را به استفاده از منابع طبیعی در پروژه‌های عمرانی واداشته 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<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) در

نیز در پژوهشی به بررسی مقاومت خمشی مصالح بنایی خاکی تثبیت 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 هوازگی و ظاهر جذاب است که عملکرد خوبی در پروژه‌های عمرانی دارد. در سال ۲۰۱۷ نیز ساهو و سینگ<sup>۵</sup> در بررسی انتقادی انواع بلوک‌ها بیان داشتند که بلوک یکی از رایج‌ترین و پر تقاضاترین 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). اودواتها<sup>۶</sup> 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 از نظر فنی و سازگاری با محیط‌زیست دارد. همچنین چاوان<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، عملکرد بلوک روسازی ساخته شده از شن، ماسه و پلاستیک ضایعاتی را مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد که این بلوک‌ها از مقاومت خوبی

برخوردارند و می‌توان از آن‌ها برای روسازی مسیره‌های 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 قلعه‌نوی با بیان اینکه در بسیاری از نقاط جهان، خشت به‌عنوان 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 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 تثبیت شده با آهک و الیاف نخل خرما است (اسماعیلی و قلعه‌نوی، 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 میکروسلیس تا ۲۰ درصد، با ژئولیت 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 میکروسلیس، ژئولیت 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

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 مورد بررسی 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). در محمدی 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 از طریق 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 (در محمدی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر در محمدی 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 طوری که 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 حمل‌ونقلی فعال در جهان شناخته می‌شود (Bunds et al., 2019)؛ به طوری که 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). از این رو ایجاد انگیزه لازم برای افراد جهت استفاده از پیاده‌روها مزایای زیادی دارد که شامل منافع زیست‌محیطی با حداقل

کردن استفاده از حمل و نقل موتوری است ( Chudyk et al., 2017; Marchiori, 2018). بدین جهت استفاده از مصالح مناسب و جذاب در پیاده‌روها، مخصوصاً پیاده‌روهایی با تقاضای بالای پیاده‌روی مانند پیاده‌روهای بافت سستی 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 انجام شده است؛ اما هیچ‌کدام از آن‌ها به بررسی روسازی مناسب برای بافت خشت و گلی سستی شهرها اشاره نکرده‌اند. در این پژوهش استفاده از خشت به‌عنوان روسازی مناسب از نظر محیط زیستی، اقتصادی و گردشگری برای معابر بافت خشت و گلی سستی شهرها، پیشنهاد می‌شود و به بررسی عملکرد آن پرداخته می‌شود.

#### روش تحقیق

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد بلوک خشتی به‌عنوان روسازی پیاده‌رو مناسب از نظر فنی است. بدین جهت 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 مورد استفاده در تحقیق

خاکی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت،

خاک ماسه‌ای دارای مقدار قابل توجه 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 مورد استفاده 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<sup>۱</sup> 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.

#### ج ۱. مشخصات سیمان و آهک مورد استفاده

مشخصات سیمان	
مقدار (%)	خصوصیات
۲۰	SiO <sub>2</sub>
۶	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵	MgO
۳	SO <sub>3</sub>
۳	کاهش وزن
۰٫۷۵	ذرات نامحلول
۸	C <sub>3</sub> A

مساحت ویژه (gr/cm <sup>2</sup> )	۲۸۰۰	
مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )	۳ روزه	۱۰۰
	۷ روزه	۱۷۵
	۲۸ روزه	۳۱۵
حرارت هیدراتاسیون (Cal/gr)	۷۰	
مشخصات آهک		
خصوصیات	مقدار (%)	
CaO	۴۷/۲۷	
SiO <sub>2</sub>	۸/۷۱	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۱۷	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۵۶	
MgO	۰/۹۸۷	
K <sub>2</sub> O	۰/۷۹۰	
SO <sub>3</sub>	۰/۶۷۸	
TiO <sub>2</sub>	۰/۲۳۲	
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۸۲	
ZnO	۰/۰۳۴	
SrO	۰/۰۲۹	
MnO	۰/۰۲۶	
CuO	۰/۰۲۶	
PbO	۰/۰۲۴	
Cl	۰/۰۲۳	
LOI <sup>a</sup>	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 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 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 مورد مطالعه پیوستگی و چسبندگی داخلی اندکی دارد و در نتیجه مقاومتی ندارد.

### آزمایش‌های انجام شده

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  $\frac{N}{mm^2}$  ۱۵ 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 به این ترتیب 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. از این رو، 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 (تیرئی و همکاران، ۱۳۹۶)؛ هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مصالح در برابر تنش‌های وارد شده 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.

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



(د)



(ج)



(ب)



(الف)

۱. الف- آزمایش مقاومت فشاری؛ ب- آزمایش مقاومت خمشی؛ ج- آزمایش مقاومت لغزشی به کمک پاندول

انگلیسی؛ د- تعیین مدول الاستیسیته

ج ۲. 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



شرح داده‌شده در قسمت ۳ پرداخته شده و نتایج در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

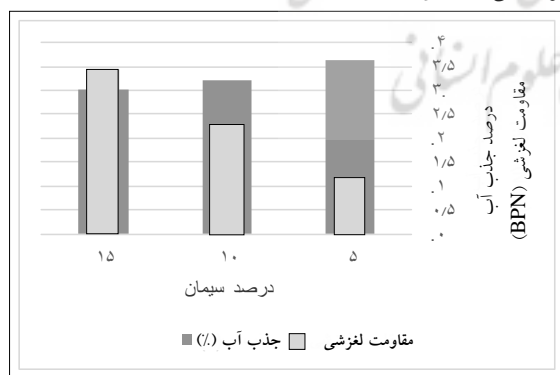
ج ۳. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق

ماده افزودنی	درصد	جذب آب (%)	اصطکاک	مقاومت خمشی (Mpa)	مدول الاستیسیت (pa)	مقاومت فشاری (Mpa)	
مدت عمل‌آوری (روز)	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲۸
سیمان	۵	۳/۶۲	۶۶	۱/۸۱	۱۶۴	۷	۱۷/۸
	۱۰	۳/۲۱	۶۲	۱/۹۷	۲۲۴	۲۳/۴	۲۴/۱
	۱۵	۳/۰۱	۵۸	۲/۰۱	۳۱۰	۳۰/۴	۳۰/۸
آهک	۴	۴/۱۲	۷۳	۱/۰۷	۱۰۵	۱۰/۴	۱۱/۳
	۶	۴/۰۵	۶۵	۱/۳۲	۱۳۷	۱۳/۶	۱۴/۲
	۸	۳/۸۷	۵۹	۲/۱۳	۲۰۶	۲۰/۷	۲۱/۶

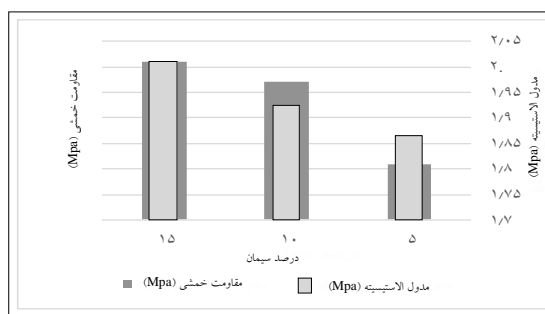
بررسی عملکرد بلوک خشتی تثبیت‌شده با سیمان

در تصاویر شماره ۲ و ۳، تأثیر میزان سیمان بر عملکرد بلوک خشتی به وضوح 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 خمشی، مدول الاستیسیت و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش درصد سیمان از ۵ درصد به ۱۵ درصد در مدت عمل‌آوری ۳ روزه، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیت 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 به وسیله سیمان است؛ چراکه همان‌طور که اشاره شد درصد جذب آب مواد به شدت 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 در نتیجه خشتی با سطحی صاف‌تر و با مقاومت و دوام بالاتری را نتیجه می‌دهد. علاوه بر این باتوجه به تصویر شماره ۳ با افزایش مدت زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری بلوک خشتی تثبیت‌شده افزایش می‌یابد؛ به طوری که 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 در نتیجه 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<sup>۱</sup> 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.

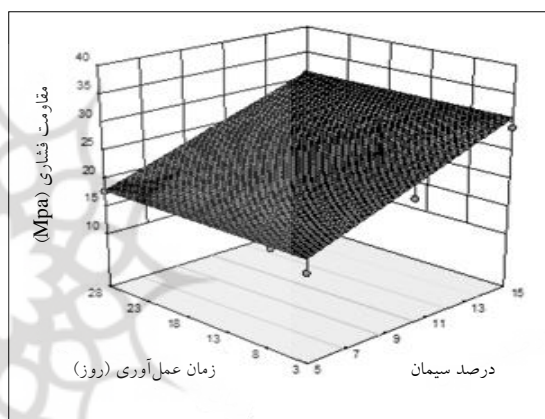


(الف)



(ب)

۲. تغییرات پارامترهای الف- جذب آب و مقاومت لغزشی؛ ب- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در بلوک خشتی تثبیت شده با سیمان در عمل آوری ۳ روزه



۳. تأثیر درصد سیمان و مدت زمان عمل آوری بر

مقاومت فشاری بلوک خشتی

بررسی عملکرد بلوک خشتی تثبیت شده با آهک

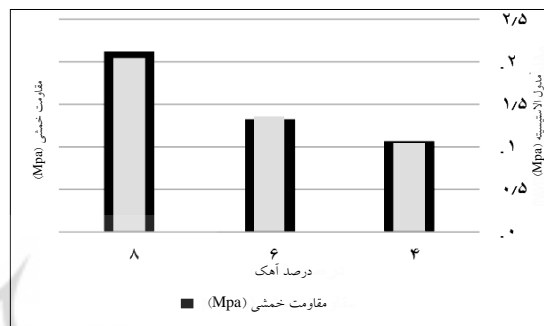
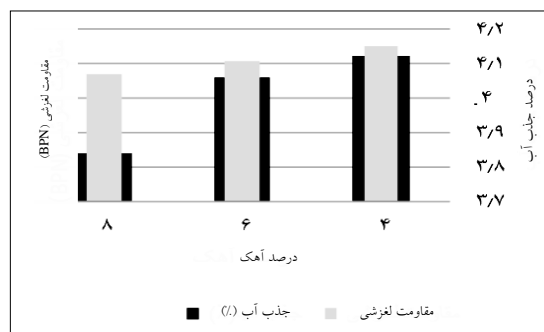
در تصاویر شماره ۴ و ۵ تأثیر میزان آهک بر عملکرد بلوک خشتی به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش درصد آهک از ۴ درصد تا ۸ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۶ و ۱۸ درصد کاهش می یابد. علاوه بر این با افزایش درصد آهک مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری افزایش می یابد؛ به طوری که با افزایش درصد 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 می یابد. علت کاهش درصد جذب آب با افزایش درصد آهک، پدیده شدن فضاهای خالی درون بلوک خشتی به وسیله آهک است؛ زیرا درصد جذب آب مواد به شدت تحت تأثیر درصد فضای خالی آن است. همچنین با افزایش آهک و چسبندگی بهتر ملات بلوک، ذرات خاک ماسه بهتر به هم چسبیده و در نتیجه خشتی با سطحی صاف تر و با مقاومت و دوام بالاتری را نتیجه می دهد. علاوه بر این با توجه به تصویر شماره ۵ با افزایش مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری بلوک خشتی تثبیت شده افزایش می یابد؛ 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 پیدا کرده است. در نتیجه 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 مقاومت های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان»، با بررسی خشت تثبیت شده با مواد مختلف از جمله پودر آهک یافتند که افزودن پودر آهک به خشت باعث افزایش مقاومت و بهبود عملکرد خشت می شود. همچنین بر اساس مطالعات بهرام زاده و همکاران (۱۳۹۷)، افزودن آهک به خشت باعث بهبود مقاومت فشاری در شرایط خشک و اشباع، مقاومت سایشی، جذب مویبندی و مقاومت در برابر غوطه وری خشت می شود که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. در نهایت با توجه به نتایج و عملکرد مثبت بلوک خشتی تثبیت شده با افزودنی هایی مانند سیمان و آهک می توان گفت بلوک های خشتی تثبیت شده مصالحی مناسب از نظر اقتصادی و محیط زیستی برای روسازی پیاده روها، مخصوصاً در مناطق گرمسیر که خشت به وفور یافت می شود، است (Galabada, 2016).

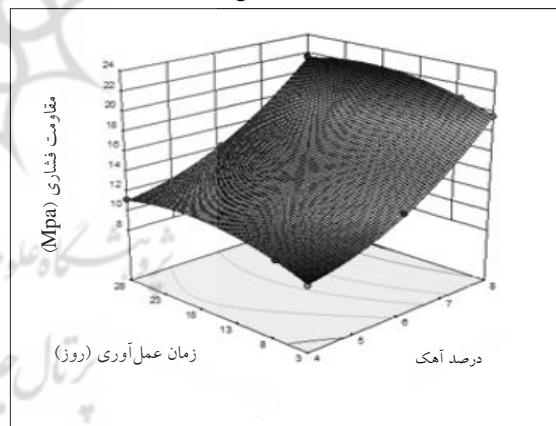
میکروسکوپ الکترونیکی ابزار جدید مناسب برای تحلیل مورفولوژی ساختارهای درونی و پیوستگی اجزا مواد مرکب است در حقیقت این روش با تابش فوتون‌های نوری با طول موج کوتاه، باعث وضوح قدرت تفکیک و دستیابی به اطلاعات مناسب‌تر است. همچنین به کمک این تصاویر می‌توان نحوه اختلاط و ساختار خشت تثبیت‌شده با این دو ماده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

مخلوط ساخته‌شده در اختلاط 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 تثبیت‌شده نسبت به قبل تثبیت بیشتر شده است که در تمامی موارد افزایش مقاومت و مدول الاستیسته خاک را به دنبال دارد.

همچنین با توجه به نتایج ارائه شده 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 به خوبی به هم می‌چسباند و در نتیجه 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 الاستیسته در بلوک خشتی تثبیت‌شده با آهک در عمل‌آوری ۳ روزه



ت ۵. تأثیر درصد آهک و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بلوک خشتی

### بررسی زیرساختاری

به منظور بررسی ریزساختاری از نمونه‌های بلوک خشتی تثبیت‌شده با آهک و سیمان از فرایند بررسی میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد.

ریزدانه اثرگذار است.

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.

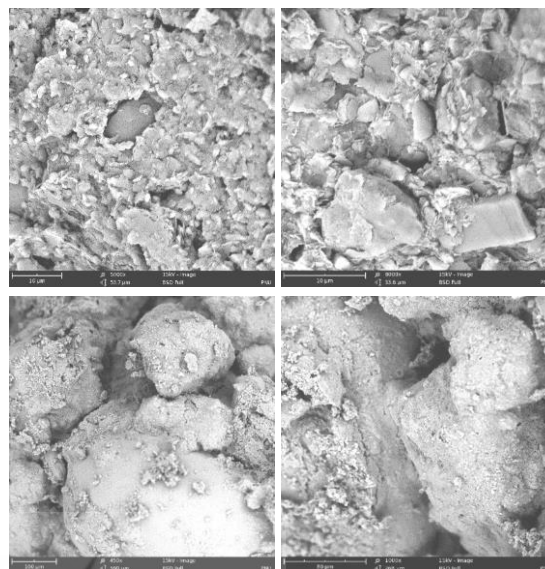
در خصوص تثبیت با آهک، با افزایش درصد آهک از ۴ درصد تا ۸ درصد میزان جذب آب و اصطکاک به ترتیب حدود ۶ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.

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 از جمله 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



(الف) (ب)

ت ۶. 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

و جذب آب را برای بلوک‌های پیشنهادی انجام داد.

## تشکر و قدردانی

بخشی از آزمایش‌های این تحقیق در قالب پروژه تخصصی توسط آقای محمدعلی انوری زارچ و زینب‌السادات هاشمی پور در دانشکده مهندسی عمران در آزمایشگاه مکانیک خاک و روسازی 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 به دلیل 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
8. 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 به عنوان 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، لیلان. (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، رحمت‌اله. (۱۳۹۶)، بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های میکرونیزه تکتوسیلیکاتی بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی اندود سستی 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، عبدالله؛ 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 ساخته شده 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 تثبیت شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی. نشریه علمی مرمت و معماری ایران، ۲(۱)، ۱۰۲-۹۱.

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

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.

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؛ موردغفاریریا و نوس. (۱۳۹۰)، توریسم و رویکرد نوسازی در طراحی بافت‌های تاریخی شهری (مطالعه موردی: شهر اصفهان). فصلنامه مسکن و محیط روستا، ۸(۳۰)، ۱۹–۳۱.

- 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 (مورد مطالعه: مناطق کوهستانی استان تهران). مسکن و محیط روستا، ۴۰(۱۷۳)، ۱۱۹–۱۳۴.

- نامور، شایسته؛ زینی، مسعود. (۱۳۹۸)، بررسی تأثیر سیلیکات سدیم و آکرلیک بر مقاومت فشاری، خمشی و رطوبتی سلات 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

- 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](http://www.unwto.org)
- <https://doi.org/10.22034/41.179.91>

