Housing and Rural Environment
Print ISSN: 2008 - 4994 Online ISSN: 2588 - 6215
Homepage: https://jhre.ir

Improvement and renovation of dilapidated rural sidewalks by adding cellulose Nano-fiber to adobe blocks; case study: the sidewalks of amreh village in Sari city

Seyed Ali Seyedian[1], **Seyedeh Mahsa Bagheri**[2]✉, and **Leila Sadat Hamidian Divkolai**[3]

1. Associate Professor, Department of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. E-mail: a_seyedian@umz.ac.ir
2. Corresponding author, PhD in Architecture, Department of Architecture, University of Art, Tehran, Iran. E-mail: Mahsa.bagheri_1989@yahoo.com
3. Instructor, Department of Architecture and Urban planning, Technical and Vocational university (TVU), Tehran, Iran. E-mail: lhamidian56@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 February 2023
Received in revised form 09 January 2025
Accepted 28 February 2025
Available online 29 March 2025

Keywords:
Dilapidated area,
adobe block,
cellulose Nanofiber,
sidewalk.

ABSTRACT

Objective: This study aimed to improve and renovate deteriorated sidewalks in the northern region of the country by incorporating nano-fiber cellulose into clay blocks. Given that compressive strength, slip resistance, and water absorption are critical factors for sidewalk pavements in deteriorated areas with low traffic loads, this research investigates the performance of clay blocks stabilized with nano-fiber cellulose for use in paving low-traffic sidewalks in Amreh village. The study also examines the color stability of the treated blocks.

Method: The research method was based on field observations, environmental surveys, and experimental–laboratory analyses.

Results: The results showed that increasing the nano-fiber cellulose content to 10% significantly improved the compressive strength of the samples at all curing ages of 3, 7, and 28 days. However, increasing the nano-fiber cellulose content to 15% reduced this improvement rate. The highest compressive strength was achieved in blocks containing 10% nano-fiber cellulose after 28 days of curing, which showed a 69% increase compared to the control sample of the same age. Furthermore, the compressive strength of all samples increased with curing time. The average surface friction coefficient and water absorption of the samples decreased by approximately 11% and 20%, respectively, when the nano-fiber cellulose content was increased to 15% compared to the control. Moreover, no noticeable color differences were observed in the nano-fiber cellulose–stabilized blocks relative to the control.

Conclusions: The findings indicate that nano-fiber cellulose–stabilized adobe blocks can enhance the performance of adobe pavements and may serve as a viable material for paving sidewalks with low traffic loads in Amreh village.

Cite this article: Seyedian, S. A., Bagheri, S. M., & Hamidian Divkolai, L. S. (2025). Improvement and renovation of dilapidated rural sidewalks by adding cellulose Nano-fiber to adobe blocks; case study: the sidewalks of amreh village in Sari city. *Housing and Rural Environment*, 44 (189), 31-42. https://doi.org/10.22034/44.189.31

© The Author(s).
Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]
[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

Introduction

In recent years, architecture has witnessed the introduction of a vast array of new materials. The use of these materials has expanded to the extent that they often serve as inappropriate substitutes for the indigenous materials of a region. Regrettably, our traditional architectural materials—which once embodied experience, beauty, cultural identity, and authenticity—are gradually being forgotten. It is true that traditional materials cannot necessarily be employed today in exactly the same manner as in the past; however, their properties can be enhanced, and their undesirable characteristics mitigated through scientific and appropriate methods.

One of the most common indigenous materials in Iran is adobe. However, the use of adobe blocks—especially in northern parts of the country—has decreased due to their shortcomings. The main disadvantages of adobe blocks include low compressive, tensile, and flexural strength, vulnerability to high humidity and water erosion during heavy, sustained rainfall, as well as susceptibility to cracking and poor adhesion. Similarly, adobe sidewalk pavements face limitations in terms of compressive and slip resistance and exhibit excessive water absorption during rain events. These disadvantages have restricted their use in traditional and modern sidewalks and buildings despite their valuable properties, such as high thermal capacity, sound insulation, fire resistance, and tolerance to extreme temperatures. Consequently, asphalt has become the predominant pavement material, despite its lack of compatibility with the color and character of deteriorated rural sidewalks.

Advancements in nanotechnology offer new opportunities to improve the physical properties of adobe, including its strength, adhesion, brittleness, and water resistance. Accordingly, this study aims to assess the performance of clay blocks stabilized with nano-fiber cellulose for use in paving low-traffic sidewalks in the northern part of the country, specifically in Amreh village in Sari County. In addition, the research examines the visual and color stability of these modified blocks. The objectives of this study can be summarized by the following research questions:

- What is the effect of adding nano-fiber cellulose on the performance of clay blocks, specifically in terms of compressive strength, slip resistance, and water absorption?
- How does the addition of nano-fiber cellulose influence the color of clay blocks?
- Can nano-fiber cellulose–stabilized clay blocks serve as a suitable material for paving deteriorated rural sidewalks in Amreh village?

Method

This research employed an experimental method utilizing both laboratory tests and field observations for data collection. In the experimental phase, nano-fiber cellulose was added to adobe block samples at concentrations of 5%, 10%, and 15%, making the proportion of nano-fiber cellulose the independent variable. Following preparation and curing, these adobe blocks were tested for compressive strength, slip resistance, water absorption rate, and color stability.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

Results

The results showed that increasing the nano-fiber cellulose content to 10% significantly enhanced the compressive strength of the adobe samples at all curing ages of 3, 7, and 28 days. However, increasing the nano-fiber cellulose content to 15% led to a decrease in the rate of strength improvement. Specifically, samples containing 10% nano-fiber cellulose, after 28 days of curing, demonstrated a 69% increase in compressive strength compared to the control sample of the same age. Extended curing time also contributed to strength gains across all samples.

Additionally, the average surface friction, which reflects slip resistance, decreased as the nano-fiber cellulose content increased. The lowest surface friction was observed in the samples with 15% nano-fiber cellulose. Even so, the probability of slipping on pavements containing any nano-fiber cellulose proportion remained very low.

Water absorption rates also decreased as nano-fiber cellulose content increased. The most substantial reduction was achieved with the 15% nano-fiber cellulose samples, which showed a 20% decrease in water absorption relative to the control. Moreover, there was no visible color difference between the treated and untreated adobe blocks.

Conclusions

In conclusion, adobe blocks stabilized with nano-fiber cellulose significantly improve the performance of traditional adobe, enhancing compressive strength, water resistance, and color stability. These findings indicate that nano-fiber cellulose–stabilized adobe blocks can serve as a practical and durable option for paving low-traffic rural sidewalks in Amreh village.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

Not applicable

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

مسکن و محیط روستا
شاپا چاپی: ۴۹۹۴ - ۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۶۲۱۵ - ۲۵۸۸
Homepage: https://jhre.ir

بهسازی و نوسازی پیاده‌راه‌های بافت فرسوده روستایی با افزودن نانوفیبرسلولز به بلوک‌های خشتی؛ مطالعه موردی: پیاده‌راه‌های روستای امره (شهرستان ساری)

سید علی سیدیان[۱]، سیده مهسا باقری[۲]✉، لیلا سادات حمیدیان دیوکلایی[۳]

۱. دانشیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: a_seyedian@umz.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دکتری معماری، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران. رایانامه: Mahsa.bagheri_1989@yahoo.com
۳. مربی، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران. رایانامه: lhamidian56@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
بافت فرسوده،
بلوک خشتی،
نانوفیبرسلولزی،
پیاده‌راه.

چکیده

هدف: خشت از کهن‌ترین و در دسترس‌ترین مصالح ساختمانی بوم‌آورد ایران است. بسیاری از نمونه‌های فاخر معماری در این سرزمین از خشت در سازه و کف‌سازی بهره برده‌اند. امروزه با پیشرفت علم و فناوری و متعاقب آن ورود مصالح نوین، استفاده از خشت در معماری باوجود سهولت و ارزانی تهیه محدود گشته است. محدودیت استفاده از خشت در سازه‌ها و روسازی پیاده‌راه‌ها به دلایلی چون مقامت اندک فشاری، کششی، خمشی، لغزشی، ترک خوردن و مقاومت کم در برابر رطوبت بخصوص در شمال کشور بوده است و این در حالی است که ورود تکنولوژی نانو به عرصه مصالح ساختمانی می‌تواند نویدبخش رفع مشکلاتی ازاین‌دست باشد. لذا پژوهش حاضر در پی بهسازی و نوسازی پیاده‌راه‌های بافت فرسوده روستایی در شمال کشور ازطریق افزودن نانوفیبرسلولزی به بلوک‌های خشتی بوده است. ازآنجایی‌که در پیاده‌راه‌های بافت فرسوده و دارای بار ترافیکی اندک، مقاومت فشاری، لغزشی، و میزان جذب آب پوشش کف از عوامل حیاتی است، این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد خشت تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی به‌منظور استفاده از آن در روسازی پیاده‌راه‌های دارای بار ترافیکی اندک در روستای امره در شهرستان ساری، به مطالعه عوامل نامبرده خواهد پرداخت. همچنین بلوک‌های تثبیت‌شده را ازلحاظ رنگ بررسی خواهد کرد.

روش پژوهش: روش انجام پژوهش مبتنی بر مطالعات میدانی و بررسی‌های محیطی و با روش‌های تجربی-آزمایشگاهی است.

یافته‌ها: نتایج حاصل نشان داده است با افزایش درصد افزودنی نانوفیبرسلولزی تا ده درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها در تمامی سنین ۳، ۷، و ۲۸ روز افزایش یافته است و با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی به ۱۵ درصد، نرخ بهبود کاهشی بوده است. همچنین بیشترین مقاومت فشاری حاصل مربوط به خشت‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد نانوفیبرسلولزی و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری بوده است که نسبت به نمونه شاهد با همین سن ۶۹ درصد افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری: نتایج همچنین نشان داده است که افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی گشته است. همچنین میانگین عدد اصطکاک سطحی مربوط به مقاومت لغزشی و جذب آب نمونه‌ها با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی به ۱۵ درصد، نسبت به نمونه شاهد به ترتیب حدود ۱۱ و ۲۰ درصد کاهش داشته است. همچنین هیچ‌گونه تغییر رنگی در نمونه‌های آزمایشگاهی نسبت به نمونه شاهد مشهود نبوده است.

استناد: سیدیان، سید علی؛ باقری، سیده مهسا؛ حمیدیان دیوکلایی، لیلا سادات. (۱۴۰۴). بهسازی و نوسازی پیاده‌راه‌های بافت فرسوده روستایی با افزودن نانوفیبرسلولز به بلوک‌های خشتی؛ مطالعه موردی: پیاده‌راه‌های روستای امره (شهرستان ساری). *مسکن و محیط روستا*، ۴۴ (۱۸۹)، ۴۲-۳۱.

https://doi.org/10.22034/44.189.31

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

© نویسندگان.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

مقدمه

امروزه معماری بیش از هر زمان دیگری با گستره‌ای عظیم از مواد و مصالح نوین روبرو است. استفاده از این مصالح تا جایی گسترش یافته است که گاهی جایگزین نامناسبی برای مصالح بوم‌آورد یک خطه گشته است و متأسفانه مصالح معماری بوم‌آورد ما که با تجربه، زیبایی، هویت و اصالت همراه بود رو به فراموشی است. البته مسلم است که استفاده از مصالح سنتی به همان‌گونه که در گذشته استفاده می‌شد امکان‌پذیر نیست، اما می‌توان با شیوه‌هایی علمی و مناسب، خواص آن‌ها را بهبود بخشید و از کیفیت نامطلوب آن‌ها کاست؛ به‌بیان‌دیگر ارتقای کیفیت مصالح بوم‌آورد با روش‌های نوین را جایگزین حذف کامل آن‌ها از معماری و شهرسازی کرد.

یکی از مصالح ساختمانی بومی رایج در ایران خشت بوده است. ایران در استفاده از خشت از کهن‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که در بسیاری از شهرها و روستاها به‌ویژه در نواحی کویری بسیاری از نمونه‌های فاخر در بافت قدیمی و فرسوده، با استفاده از خشت ساخته شده‌اند که توجه بسیاری از گردشگران را به خود جلب کرده است (Ghaforifard & Khabiri, 2022)؛ اما استفاده از خشت محدود به نواحی کویری نمی‌شود؛ خشت حتی در شمال کشور در سازه‌ها، پیاده‌راه‌های بافت سنتی و کف‌سازی حیاط در خانه‌ها و مساجد مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفته است. خشت در بسیاری از بناهای فاخر شمال کشور چون خانه کلبادی و عمارت فاضلی در ساری، خانه باقری‌ها در گرگان، پل‌های خشتی لنگرود و گوراب تولم و مسجد و مدرسه کریم‌ایشان به کار گرفته شده است. باوجود استفاده گسترده معماران گذشته از بلوک‌های خشتی، با پیشرفت فناوری و ورود مصالح نوین ساختمانی استفاده از خشت بخصوص در شمال کشور به دلیل معایب آن به‌تدریج کاهش یافت و تقریباً کنار گذاشته شد. از معایب عمده سازه‌های خشتی می‌توان به مقاومت اندک فشاری، کششی، خمشی، ضعف در برابر رطوبت بالا و آب‌شستگی در برابر بارندگی‌های شدید و پی‌درپی، ایجاد ترک و چسبندگی کم آن اشاره کرد. ضعف روسازی‌های پیاده‌راه‌های خشتی نیز به همین ترتیب در مقاومت فشاری و لغزشی و همچنین جذب آب هنگام بارندگی است (Ghobadian, 2013). این معایب موجب شد که باوجود محاسنی چون ظرفیت حرارتی بالا، مقاومت در برابر سرما و گرما، عایق صدا و مقاومت در برابر آتش استفاده از آن در پیاده‌راه‌ها و بناهای سنتی و مدرن محدود گردد. متعاقب این امر در بسیاری از پیاده‌راه‌های روستایی بافت فاخر فرسوده و سنتی شمال کشور، آسفالت به‌عنوان روسازی متداول رواج یافته است که همخوانی با بافت سنتی حتی ازلحاظ رنگ ندارد. همچنین نسبت به بلوک‌های خشتی هزینه بیشتری نیز دارد (Zare Shahabadi & Farahza, 2017; Namvar & Zeini, 2019; Rahimi, 2017; Ghaforifard & Khabiri, 2022). علاوه بر آن تأثیر استفاده از بلوک‌های خشتی در جهت حفظ میراث فرهنگی و محیط‌زیست قابل‌توجه است.

از طرفی ماهیت فرارشته‌ای علوم و فناوری نانو موجب گسترش دامنه استفاده از آن در صنایع مختلف گردیده است. در چنین شرایطی نمی‌توان ورود آن به حوزه مصالح ساختمانی را نادیده گرفت و از پیشرفت‌های انجام پذیرفته در زمینه بهبود کیفیت آن‌ها چشم‌پوشی کرد.

به نظر می‌رسد استفاده از نانوتکنولوژی می‌تواند امکان بهبود و کنترل بسیاری از خواص بلوک‌های خشتی از قبیل استحکام، چسبندگی، شکنندگی و آب‌شستگی را فراهم کند و با به دست گرفتن کنترل مصالح ساختمانی در مقیاس مولکولی، نویدبخش پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه بهبود کیفیت مصالح باشد. باتوجه‌به پیشرفت‌های سریعی که در زمینه نانوتکنولوژی در سرتاسر جهان صورت می‌پذیرد و تأثیرات قابل‌توجه آن بر اقتصاد و پیشرفت یک کشور، به‌کارگیری روش‌های علمی، صحیح و کارآمد برای توسعه این فناوری در داخل کشور و زنده‌سازی مصالح بومی یک منطقه به‌عنوان عاملی برای صرفه‌جویی اقتصادی در بخش مسکن و ساخت‌وساز، مهم به نظر می‌رسد.

ازاین‌روی پژوهش حاضر بر آن است که به ارزیابی عملکرد بلوک‌های خشت تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی به‌منظور استفاده از آن در روسازی پیاده‌راه‌های دارای بار ترافیکی اندک در شمال کشور و در روستای امره در شهرستان ساری بپردازد، همچنین این بلوک‌ها را ازلحاظ ثبات ظاهری رنگ موردبررسی قرار دهد. هدف از این پژوهش یافت پاسخی برای پرسش‌های ذیل بوده است:

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

- تأثیر افزودن نانوفیبرسلولزی بر عملکرد (مقاومت فشاری، لغزشی و جذب آب) بلوک خشتی چگونه است؟
- افزودن نانوفیبرسلولزی چه تأثیری بر رنگ بلوک‌های خشتی دارد؟
- آیا می‌توان از بلوک‌های خشتی تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی در روسازی پیاده‌راه‌های بافت سنتی و فرسوده روستای امره استفاده نمود؟

پیشینه پژوهش

بهسازی و نوسازی بافت فرسوده روستایی به‌خصوص در شمال کشور که با جذابیت‌های زیست‌محیطی نیز همراه است می‌تواند یک از اصلی‌ترین دغدغه‌های دولت‌ها باشد. به‌خصوص اینکه از دهه ۱۹۸۰ به بعد توجه دولت‌ها و سیاست‌گذاران به مباحث مربوط به پایداری زیست‌محیطی و حفظ محیطزیست در گزارش برانت‌لند[1] و راهبرد حفاظت جهانی سازمان ملل، و همچنین برآوردن نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن محیطزیست و توانایی‌های نسل آینده برای برآوردن نیازهای خویش جلب شد (Farhudi et al., 2011; Hashemnejad et al., 2015). در کنار این امر با افزایش جمعیت و افزایش نیاز به ساخت‌وساز در بخش‌های شهری و روستایی، استفاده از منابع طبیعی و بوم‌آورد، کاهش هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل مصالح، کاهش تولید ضایعات ساختمانی و کاهش تأثیرات سوء پروژه‌های ساختمانی و تولید مصالح ساختمانی بر محیطزیست بیش‌ازپیش اهمیت یافت (Shahidehpour et al., 2018; Shanmugavalli et al., 2017; Nanayakkara et al., 2017; Thirugnanasambantham et al., 2017; Udawattha & Halwatura, 2016; Lojda, 2018). متعاقب این مسئله پژوهش‌های بسیاری در خصوص تثبیت و بهبود عملکرد بلوک‌های رسی پخته‌شده، آجر و خشت به‌عنوان نمونه‌هایی از مصالح طبیعی، بوم‌آورد، و زیست‌سازگار و همچنین ارزیابی عملکرد روسازی‌های مختلف صورت پذیرفته است. همچون اوکوند[1] (۲۰۰۸) که در آزمایش‌های خود بلوک‌های رسی پخته‌شده را برای معابر با ترافیک کم تأیید می‌کند. چاوان[2] و همکاران (۲۰۱۸) نیز در پژوهشی مشابه عملکرد بلوک‌های روسازی ساخته‌شده از شن و ماسه را ازلحاظ عملکرد، حفظ محیطزیست و اقتصادی بررسی کرده و استفاده از آن را برای مسیرهای پیاده‌روی و پارکینگ‌ها مجاز می‌دانند. ساهو و سینگ[3] (۲۰۱۷) نیز در پژوهش خود به امکان تثبیت انواع بلوک‌ها ازجمله بلوک‌های خاکی و ماسه‌ای با مواد مختلف و فناوری‌های جدید و استفاده از آن در پروژه‌های عمرانی اشاره کرده‌اند. در تعدادی از پژوهش‌های داخلی نیز تلاش‌هایی برای تثبیت و بهبود عملکرد بلوک‌های پخته‌شده رسی و خشتی دیده می‌شود، همچون پژوهش اسماعیلی و قلعه نویی (۲۰۱۲) که با اشاره به کاربرد فراوان بلوک‌های خشتی در پروژه‌های عمرانی در بسیاری از کشورهای جهان، تثبیت نمونه‌های خشتی با ۱ درصد آهک و ۱۵ درصد الیاف نخل خرما را پیشنهاد کرده‌اند. فخری و همکاران (۲۰۱۵) به تحلیل اصطکاک و بافت روسازی آسفالتی با استفاده از دستگاه آونگ انگلیسی و پخش ماسه در بزرگراه شهید رجایی تهران پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که بزرگراه نامبرده پس از گذشت ۷ ماه نیاز به بهبود مقاومت لغزشی روسازی دارد. بهرام‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) نیز با تأکید بر لزوم حفظ بناها، محوطه‌ها، و آثار معماری خشتی و تاریخی، تأثیر آهک را بر بهینه‌سازی خشت خام در مقابل رطوبت سنجیده‌اند و تثبیت خشت خام با ۲ درصد آهک را برای افزایش مقاومت سایشی، جذب مویینگی و مقاومت در برابر غوطه‌وری پیشنهاد کرده‌اند. غفوری فرد و خبیری (۲۰۲۲) نیز به تلاش برای بهبود عملکرد روسازی بلوک خشتی پیاده‌روها و معابر روستایی با استفاده از تثبیت‌کننده آهک و سیمان پرداخته‌اند و درنهایت استفاده از ۵ درصد سیمان و ۸ درصد آهک را برای افزایش مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بلوک‌های خشتی تأیید کرده‌اند (Ghaforifard & Khabiri, 2022).

از طرفی در کنار پژوهش‌های انجام‌شده در دهه‌های گذشته، استفاده از نانو مواد در بهبود، تثبیت و بهینه‌سازی خواص و عملکرد محصولات ساختمانی مختلف رشد چشمگیری داشته است. بسیاری از نانومواد که معروف به نانومواد زیستی هستند، منشأ زیستی دارند یعنی توسط گیاهان و موجودات زنده موجود در طبیعت ساخته می‌شوند، لذا زیست‌سازگار، زیست‌تخریب‌پذیر و

1. Okunade
2. Chavan
3. Sahu & Singh

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]
[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

تجدیدپذیرند. نانوفیبرسلولز مهم‌ترین و فراوان‌ترین نانوپلیمر زیستی است که در طبیعت وجود دارد و سالانه میلیاردها تن از آن طی فرایند فتوسنتز ساخته می‌شود (Yousefi & Mashkoor, 2012). خواص منحصربه‌فرد نانوفیبرسلولز سبب شده است تا این نانو پلیمر زیستی کاربردهای بالفعل و بالقوه وسیعی در تولید نانوکامپوزیت، فوم و فیلتر، قطعات ساختمانی، کاغذ، هوافضا، خودرو، محصولات دارویی و بهداشتی، صنایع الکترونیک و مغناطیس، صنایع غذایی، بسته‌بندی و ... پیدا کند. از کاربردهای مهم نانوفیبرسلولز استفاده از آن در ساخت کامپوزیت است (Yousefi & Mashkoor, 2012). در دهه گذشته در زمینه ظرفیت‌های بالقوه نانوفیبرسلولز در تولید نانوکامپوزیت‌ها مطالعات موفقی انجام شد. به نظر می‌رسد خشت نیز به‌عنوان یکی از ابتدایی‌ترین نوع کامپوزیت‌ها یکی از مصالحی است که قابلیت بهبود بسیاری از ویژگی‌های مکانیکی خود را با استفاده از نانوفیبرسلولز خواهد داشت.

تاکنون پژوهش‌های مرتبطی نیز در این زمینه انجام پذیرفته است. البته پژوهش‌های انجام پذیرفته در زمینه نانوتکنولوژی تقریباً از دهه ۱۹۵۰ آغاز گردید؛ ولی سال ۱۹۸۵ طلیعه ظهور فناوری نانو در معماری بود. علاوه بر تحقیق‌های دانشگاهی، شرکت‌های تولیدکننده محصولات مبتنی بر فناوری‌های نوین و کارخانه‌های بزرگ هم در این زمینه تلاش‌هایی کرده‌اند (Gholabchi et al., 2011).

در دهه‌های اخیر در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی در خصوص نانومواد و تأثیر آن‌ها بر بهبود کیفیت مصالح ساختمانی انجام پذیرفته است. همچون غلامیان و همکاران (۲۰۱۲) که به تأثیر نفوذ آب دریا و دما بر دوام پوشش‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت‌ها پرداخته‌اند و خواص ساختاری و عملکرد پوشش‌های اپوکسی و پلی‌یورتان را در آب دریا و محیط‌های گرم سنجیده‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که در این نانوکامپوزیت‌ها، به دلیل بالاتر رفتن چگالی و ایجاد پیوندهای بیشتر، مقاومت در برابر نفوذ آب بیشتر شده و همچنین سازوکار تخریب در دمای بالاتر در پوشش پلی‌یورتان شدت یافته است. محمودی و همکاران (۲۰۰۸) نیز به نقش فناوری نانو در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی صنعت ساختمان نظر داشته‌اند و به نظرورزی در خصوص دستیابی به مصالح تجدیدپذیر با استفاده از نانوتکنولوژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، پاک‌سازی هوای فضای مسکونی با این تکنولوژی پرداختند. گرجی مهلبانی و همکاران (۲۰۱۰) نانو مواد را به‌عنوان تکنیکی نو برای تجهیز کردن مواد رایج بتن، شیشه، فولاد و پلاستیک معرفی می‌کنند که به‌صورت قابل‌توجهی ظاهر ساختمان‌ها و دوام و مقاومت آن‌ها را بهبود خواهد بخشید و سپس استفاده از نانومواد‌ی چون دیوارهای مجهزشده با لایه اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی را برای کاهش اتلاف انرژی در ساختمان معرفی می‌کنند. خانزادی و خزائنی (۲۰۱۰) نیز در پژوهش خود به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیس در بهبود خواص مکانیکی بتن پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داده است که نانوذرات سیلیس به دلیل اندازه کوچک و مکانیسم پرکنندگی مقاومت فشاری بتن را ۳۰ درصد نسبت به بتن مرجع افزایش داده است. گلابچی و همکاران (۲۰۱۱) دیدگاه‌های نوینی در رابطه با نانوفناوری و انواع موارد استفاده از نانومواد در صنعت ساختمان‌سازی همچون نانوشیشه‌ها، نانوسطوح خودتمیزشونده، نانو پوشش‌ها و... ارائه کردند. در پژوهش خسروانی و قربانی (۲۰۱۱) اثر نانو رس Na^+ مونت‌موریونیت بر بهبود خواص خاک‌های چسبنده موردمطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش‌های حد خمیری، حد روانی و آزمایش مقاومت فشاری بر روی رس متراکم شده انجام شده است و نتایج نشان داده است که با افزایش درصد نانو رس، حد خمیری و حد روانی افزایش یافته و همچنین مقاومت تک‌محوری به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. احدی و همکاران (۲۰۱۴) نیز در پژوهشی مشابه به بررسی اثر افزودن نانو رس مونت‌موریونیت و آهک بر خصوصیات خمیری و مقاومت برشی و واگرایی خاک ریزدانه پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نیز افزایش چشمگیر دامنه خمیری خاک را با درصدهای اندک نانوافزودنی نشان داده است. دامنه خمیری بالا می‌تواند منجر به کاهش قابلیت ایجاد ترک در مصالح خاکی گردد. این پژوهش همچنین نشان داده است که با اضافه شدن نانوافزودنی‌ها، قابلیت واگرایی به نحو چشمگیری کاهش یافته است. همچنین استفاده از افزودنی‌های آهک و نانو رس مونت‌موریونیت، ابتدا منجر به کاهش پارامتر مقاومت برشی گردید، اما با افزایش درصد نانوافزودنی‌ها، این پارامتر نیز افزایش یافته است. کیاحسینی و عابدی (۲۰۱۸) نیز در پژوهش خود به ساخت و بررسی خواص مکانیکی و خوردگی کامپوزیت آلومینیوم A۳۵۶- نانولوله‌های کربنی پرداخته‌اند. کامپوزیت آلومینیوم A۳۵۶ به‌وسیله ریخته‌گری

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

اغتشاشی تولید گردید و نانولوله‌های کربنی به آن اضافه شد. نتایج حاکی از این بوده است که افزودن نانولوله‌های کربنی موجب سختی کامپوزیت گشته و مقاومت در مقابل جریان خوردگی در این کامپوزیت افزایش یافته است. ابراهیمی صدرآبادی و همکاران (۲۰۱۷) به تولید و مشخصه‌یابی میکروکپسول‌های حاوی رزین اپوکسی به‌عنوان ماده ترمیم‌کننده جهت استفاده در پوشش‌های خودترمیم‌شونده پرداخته‌اند. پژوهش به تولید موفقیت‌آمیز این میکروکپسول‌ها انجامید. بهمنی اسکویی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر افزودن مس بر ریزساختار، سختی و خواص ضدمیکروبی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی را موردبررسی قرار دادند. پژوهشگران پیرسازی فولادهای آستنیته و کوئنچ شده را در سه دمای ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داده است که پیرسازی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش سختی فولاد و در دمای ۶۰۰–۷۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش سختی آن می‌شود. بهاروندی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعات خود مقاومت به خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی گرافن–دی‌اکسید زیرکونیم/اپوکسی را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند و روکش نانوکامپوزیتی بر پایه سیستم اکسید گرافن–دی‌اکسید زیرکونیم/ اپوکسی ساخته‌اند. نتایج این پژوهش نیز نشان داده است که خواص مقاومتی در برابر خوردگی فلز با افزایش دی‌اکسید زیرکونیم/اپوکسی به طرز چشمگیری افزایش یافته است.

چنانکه تاکنون آمد تاکنون پژوهش‌های بسیاری در خصوص تثبیت بلوک‌های خشتی و رسی با مواد مختلف و همچنین استفاده از نانو مواد در بهبود عملکرد مصالح ساختمانی انجام پذیرفته است، اما در هیچ‌یک از این پژوهش‌ها بهبود عملکرد بلوک‌های خشتی روسازی پیاده‌راه‌های بافت فرسوده روستایی با افزودن نانوفیبرسلولزی مدنظر نبوده است. لذا این پژوهش در نظر دارد به بررسی تأثیر افزودن نانوفیبرسلولزی بر مقاومت فشاری و لغزشی، درصد جذب آب و رنگ بلوک‌های خشتی روسازی پیاده‌راه‌ها در منطقه موردمطالعه بپردازد.

روش‌شناسی پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد بلوک‌های خشتی تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولز به‌عنوان روسازی پیاده‌راه‌های یافت فرسوده روستای امره بوده است. لذا در این پژوهش شیوه دستیابی به هدف، شیوه‌ای تجربی است و برای جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های تجربی–آزمایشگاهی و مطالعات میدانی بهره گرفته شده است. در این آزمایش نانوفیبرسلولز به نمونه‌های آزمایشی بلوک‌های خشتی با نسبت‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد اضافه شد، لذا شاخص متغیر بین نمونه خاک، متفاوت بودن مقدار نانوفیبرسلولز است. سپس این بلوک‌های خشتی تحت آزمایش مقاومت فشاری، لغزشی، میزان جذب آب و همچنین بررسی ثبات ظاهری رنگ قرار خواهد گرفت.

معرفی مواد مورداستفاده در تحقیق

خاک: به‌منظور انجام آزمایش، خاک سه نقطه از محوطه پیاده‌راه موردبررسی انتخاب شد. این خاک پس از خشک شدن مورد آزمایش‌های تعیین pH و خاک‌شناسی برای تعیین میزان رس، لای، ماسه و سوختن تر برای تعیین مقدار مواد آلی قرار گرفت.

برای تعیین میزان مواد آلی موجود در خاک‌ها با آزمایش سوختن تر، مقداری از خاک با کمی آب مخلوط شده و پس از اضافه کردن چند قطره اسیدسولفوریک غلیظ درصد مواد آلی موجود در آن مشخص شد. با استفاده از آزمایش تعیین pH، میانگین اسیدیته خاک نمونه نیز بعد از میانگین گرفتن از اسیدیته در سه نوبت آزمایش ۷/۸۳ در نظر گرفته شد. جدول ۱، نتایج کلی مربوط به میانگین حاصل از سه نوبت آزمایش انجام‌شده را نشان می‌دهد. درصد رس، لای و ماسه خاک نیز پس از رد شدن از الک نمره‌های ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۳۰، ۱۶، ۸ و ۴ تعیین و ارزیابی شد که درصد آن‌ها در خاک نمونه به قرار جدول ۱ بوده است. کلاس بافت نیز از نوع لومی تشخیص داده شد.

استفاده از این خاک با دانه‌بندی غیریکنواخت و تقریباً ضعیف شامل ۳۹ درصد ماسه، ۳۹ درصد لای، و ۲۲ درصد رس این اطمینان را برای پژوهش ایجاد می‌کند که در صورت دستیابی به عملکردی مطلوب پس از تثبیت بلوک‌های خشتی تهیه‌شده از این خاک، خاک‌های با مشخصات بهتر نیز عملکرد بهتری را در روسازی پیاده‌راه‌های این روستا از خود نشان خواهند داد. برای تثبیت بلوک‌های خشتی تهیه‌شده از این خاک از نانوفیبرسلولزی استفاده شد که در ادامه به معرفی آن خواهیم پرداخت.

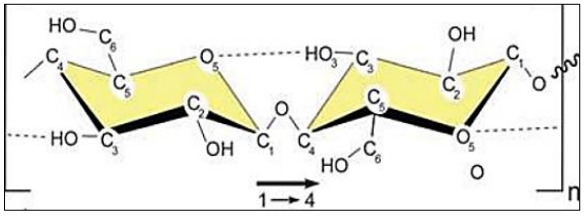
[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

جدول ۱. نتایج مربوط به مشخصات خاک (حاصل از میانگین سه نوبت آزمایش خاک)

مشخصات	عمق	pH یا اسیدیته	هدایت الکتریکی EC×10	درصد اشباع	درصد مواد خنثی‌شونده	درصد مواد آلی	درصد کربن آلی	ماسه	لای	رس	بافت
میزان	۰-۳۰ cm	۷/۸۳	۰/۳۵	٪۵۸	٪۲۵	٪۱/۷۴	٪۱/۰۱	٪۳۹	٪۳۹	٪۲۲	L لوم
ترکیب عناصر P.P.M	کلسیم	آهن	منگنز	منیزیم	روی	مس	سرب	کروم	نیکل	کادمیوم	سدیم
درصد معدنی	–	۶/۸	۳/۹	۲۱۴	۰/۶	۱/۰	–	–	–	–	–

نانوفیبرسلولزی: همان‌گونه که در بالا به آن اشاره شد، نانوفیبرسلولزی از فراوان‌ترین نانو مواد زیستی است و توسط گیاهان ساخته شده است. این ماده زیست‌سازگار و تجدیدپذیر در طی فرایند فتوسنتز ساخته می‌شود (Yousefi & Mashkoor, 2012). سلولز یک زنجیره خطی از مولکول‌های حلقه‌ای گلوکز و دارای ساختار مسطح نواری شکل است. واحد تکرارشونده آن شامل دو حلقه انیدروگلوکز است. $(C_6H_{10}O_5)_n$ ازطریق پیوند کوالانسی C1 حلقه گلوکز با C4 حلقه مجاور (مطابق شکل ۱) به هم متصل شده‌اند که پیوند ۴-۱ گلوکوزیدی نامیده می‌شود (Mehri et al., 2013). شکل ۱، پیوندهای گلیکوزیدی سلولز را نشان می‌دهد.



شکل ۱. پیوندهای گلیکوزیدی سلولز (Mehri et al., 2013)

نانوسلولز دارای ظاهری چسبناک، نواری، ژل مانند و شفاف است و متشکل از فیبرهای سلولز با ابعاد نانو است. این ماده به‌عنوان فراوان‌ترین نانوپلیمر زیستی در دهه اخیر توجه محققان رشته‌های مختلف را به خود جلب کرده است (Hasanjanzadeh et al., 2013). از دلایل این توجه می‌توان به وجود ویژگی‌های زیر در نانوسلولزها اشاره کرد. ۱- زیست‌سازگاری، ۲- زیست تخریب‌پذیری، ۳- تجدیدشوندگی، ۴- مقاومت مکانیکی بالا، ۵- خواص ممانعتی بالا، ۶- خواص نوری مطلوب و ۷- فراوانی و ارزانی ماده اولیه آن (Yousefi & Mashkoor, 2012).

ساخت نمونه آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا خاک نمونه‌برداری‌شده از الک نمره ۴۰ با قطر روزنه ۰/۴۲ عبور داده شد. خاک حاصل ابتدا با ده درصد حجمی کاه مخلوط و نمونه‌های شاهد (بدون افزودنی) و آزمایشگاهی مکعبی برای آزمایش جذب آب و مقاومت فشاری در ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ و نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش مقاومت لغزشی (اصطکاک) به ابعاد ۳۰×۵×۵ به روش‌های فراوری مرسوم و سنتی تهیه شد. روش فراوری سنتی بلوک خشتی شامل ساختن مخلوط و ورز دادن به مدت سه روز، قالب زدن، خشک کردن و از دست دادن رطوبت در هوای آزاد بوده است. بدین ترتیب که در تهیه بلوک خشتی و عمل‌آوری آن ابتدا کاه به میزان لازم کوبیده و آسیاب شد تا حفره‌های موجود در ساقه گیاه گندم باعث کاهش مقاومت فشاری بلوک خشتی نگردد، کاه کوبیده‌شده ابتدا با نسبت پانزده درصد حجمی با خاک موردنظر مخلوط و پس از اضافه کردن آب، به مدت سه روز ورز داده شد. مدت‌زمان ورز دادن گل حاصل و تعداد ضربات نیز در تمامی نمونه‌ها به‌طور یکسان انجام پذیرفت و خمیر حاصل پس از سه روز ورز دادن به‌صورت ضربه‌ای به داخل قالب‌ها ریخته شد تا حفره و فضای خالی در قالب باقی نماند. لازم به یادآوری است به نمونه‌های آزمایشگاهی نیز علاوه بر درصدهای وزنی مختلف نانوسلولز، ۱۵ درصد حجمی کاه اضافه گردید تا امکان مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی با نمونه شاهد در شرایط یکسان فراهم شود. تمامی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی در دمای ۲۵ درجه و رطوبت

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]
[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

نسبی ۶۰ درصد که تشابه با متوسط رطوبت در روستای امره دارد، خشک شد. وزن و ابعاد نمونه‌ها نیز پس از ساخته شدن یادداشت شد.

باتوجه‌به اختلاط ۵ و ۱۰ و۱۵ درصد نانوفیبرسلولز در بلوک‌های خشتی، سه گروه آزمایشی شکل گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی بلوک خشتی تثبیت‌شده با نانوسلولز با نسبت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک خشک موردنیاز برای پر کردن قالب‌ها با نانوفیبرسلولز مخلوط شد. برای آزمایش مقاومت فشاری برای هر مورد از درصدهای اختلاط (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و زمان‌های عمل‌آوری (۳، ۷، و ۲۸ روز) ۴ نمونه مشابه ساخته شد و برای تجزیه‌وتحلیل از میانگین حاصل از آزمایش هر چهار نمونه استفاده گردید. برای آزمایش مقاومت لغزشی و جذب آب نیز ۱۰ نمونه از هر یک از گروه‌های شاهد (بدون افزودنی) و آزمایشگاهی تهیه و سپس میانگین آن‌ها مدنظر قرار گرفت. همچنین ثبات رنگ نمونه‌ها با بررسی ظاهری آن‌ها ارزیابی شد. شکل ۲، مربوط به ۴ نمونه از بلوک‌های خشتی شاهد و آزمایشگاهی با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تثبیت‌کننده در روز دهم فرایند خشک شدن به‌منظور محاسبه مقاومت فشاری ۲۸ روزه است. دو بلوک خشتی بالای تصویر به ترتیب از راست به چپ مربوط به بلوک خشتی شاهد و بلوک خشتی با ۵ درصد تثبیت‌کننده و بلوک‌های خشتی ردیف پایین تصویر به ترتیب از راست به چپ مربوط به بلوک خشتی با ۱۵ و ۱۰ درصد تثبیت‌کننده است.

طرح پیش‌آزمون–پس‌آزمون نیز برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده و به همین دلیل آزمایش‌های مربوط ابتدا بر روی نمونه‌های بدون اختلاط با نانوفیبرسلولز و پس‌ازآن بر روی نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد اختلاط انجام پذیرفت.

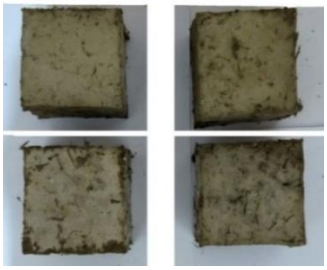
آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش مشخصات خاک

به‌منظور ساخت خشت و پیش از آغاز آزمایش‌های مربوط به عملکرد خشت تثبیت‌شده، برای شناسایی خاک آزمایش‌های تعیین pH و خاک‌شناسی برای تعیین میزان رس، لای، ماسه و سوختن تر برای تعیین مقدار مواد آلی، آزمایش شناسایی مواد معدنی موجود در خاک انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری

با علم به اینکه مقاومت فشاری با تقسیم حداکثر بار بر مساحت محاسبه می‌شود و همچنین حداقل مقاومت فشاری موردنیاز برای استفاده از خشت به‌عنوان روسازی پیاده‌راه کم‌ترافیک در روستای امره $\frac{N}{mm^2}$ ۱۵ است (Ghaforifard & Khabiri, 2022)؛ آزمایش مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری و مطابق با استاندارد BS EN 1338 بر روی نمونه‌های شاهد و آزمایشگاهی انجام پذیرفت. بدین ترتیب که نخست ابعاد هر مکعب شاهد و آزمایشگاهی ساخته‌شده اندازه‌گیری، مساحت آن محاسبه، و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد. سپس ۴ مکعب مورد آزمایش در هر گروه ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تثبیت‌کننده پیش از آزمایش مقاومت فشاری مرطوب در روز ۳، ۷ و ۲۸، به مدت ۲۴ ساعت در آب خیس شد و سپس مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت و میانگین مقاومت فشاری این ۴ مکعب اعلام شد. برای آزمودن مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی در جک ملات‌شکن قرار گرفت. شکل ۳، آزمایش مقاومت فشاری ۳ روزه یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تعدادی از بلوک‌های خشتی شاهد و آزمایشگاهی برای ارزیابی مقاومت فشاری ۲۸ روزه

شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی در جک ملات‌شکن

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

آزمایش جذب آب

به‌منظور ارزیابی کیفیت تراکم بلوک‌های خشتی روسازی پیاده‌راه و میزان آن آزمایش جذب آب بر روی ۱۰ نمونه آزمایشگاهی موجود در دسته شاهد و ۳ دسته آزمایشگاهی ۲۸ روز پس از عمل‌آوری صورت پذیرفت. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C936 تهیه شد. جذب آب کمتر همچنین از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد بلوک‌های خشتی در نواحی پرباران است.

آزمایش مقاومت لغزشی

مقاومت لغزشی سطوح در حقیقت مانع از لغزنده شدن سطح و سرخوردن عابرین بر روی سطح پیاده‌راه می‌شود و برای ایمنی ایشان ضروری است. لغزش زمانی اتفاق می‌افتد که ضریب اصطکاک بین پای عابرین و سطح راه برای حفظ چسبندگی این دو کافی نباشد (Fakhri et al., 2015). در این پژوهش مقاومت لغزشی نمونه‌ها با دستگاه آونگ انگلیسی[۲] و مطابق با استاندارد BS EN 1338 اندازه‌گیری شد و عدد آونگی[۳] با استفاده از این دستگاه محاسبه شد. عدد آونگی در حقیقت عدد اصطکاک سطحی روسازی است (Fakhri et al., 2015) که مقاومت لغزشی آن را نشان می‌دهد. این آزمایش نیز بر روی ۱۰ نمونه آزمایشگاهی موجود در دسته‌های شاهد و آزمایشگاهی و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری صورت پذیرفت. همچنین بعد از ساخت هر نمونه شاهد و آزمایشگاهی، ثبات ظاهری و تغییرات احتمالی در رنگ این نمونه‌ها موردبررسی قرار گرفت.

چنانکه آمد برای اعتبار روش به دلیل خطای موجود در آزمایش‌ها، آزمایش خاک‌شناسی در سه نوبت انجام پذیرفت و میانگین آن‌ها مدنظر قرار گرفت. برای جلوگیری از اشتباهات احتمالی در آزمایش مقاومت فشاری نیز از هر نمونه شاهد و آزمایشگاهی ۴ مورد ساخته شد. همچنین برای مقاومت لغزشی و میزان جذب آب نیز ۱۰ نمونه از هر گروه شاهد و آزمایشگاهی تهیه گردید و سپس میانگین آن‌ها به‌عنوان مرجع در تحلیل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. برای روایی‌سنجی روش و ابزار جمع‌آوری اطلاعات نیز با متخصصین و مهندسین شیمی و نانو، مهندسین سازه و متخصصین امور آزمایشگاهی بحث و تمام آزمایش‌ها و اقدامات انجام‌شده با مشورت آن‌ها صورت پذیرفت.

یافته‌های پژوهش

تحلیل عملکرد بلوک‌های خشتی تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی

در جدول ۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، لغزشی و درصد جذب آب و همچنین وضعیت رنگ نمونه شاهد و نمونه‌های آزمایشگاهی آمده است. در این جدول تأثیر نانوسلولز بر بلوک‌های خشتی به‌وضوح قابل‌مشاهده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، لغزشی و در صد جذب آب و همچنین وضعیت رنگ نمونه شاهد و نمونه‌های آزمایشگاهی

	درصد افزودنی	میانگین مقاومت فشاری (Mpa) نمونه‌ها			میانگین عدد مقاومت لغزشی	میانگین درصد جذب آب	وضعیت رنگ
		۳ روز پس از عمل‌اوری	۷ روز پس از عمل‌آوری	۲۸ روز پس از عمل‌اوری			
نمونه شاهد	۰	۱۵/۲۷	۱۷/۱۰	۱۷/۷۳	۶۹	۳/۸۱	خاکی
نمونه‌های آزمایشگاهی (خشت‌های تثبیت‌شده با نانو فیبرسلولزی)	۵	۱۹/۴۲	۷۶/۲۱	۲۲/۳۶	۶۶	۳/۴۲	ثابت
	۱۰	۲۵/۴۲	۲۸/۱۴	۳۰/۰۲	۶۴	۳/۲۶	ثابت
	۱۵	۲۴/۸۲	۲۷/۱۰	۲۹/۴۳	۶۱	۳/۰۴	ثابت

در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌ها

همان‌طور که نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش درصد افزودنی نانوفیبرسلولزی مقاومت فشاری نمونه‌ها در تمامی سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز افزایش یافته است، اما این افزایش تا مقدار ۱۰ درصد تثبیت‌کننده نانوفیبرسلولزی در تمام سنین ادامه داشته است و با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی به ۱۵ درصد، نرخ بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی کاهش یافته است. همچنین بیشترین مقدار میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها مربوط به خشت‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد نانوفیبرسلولزی و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری بوده است که افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]
[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

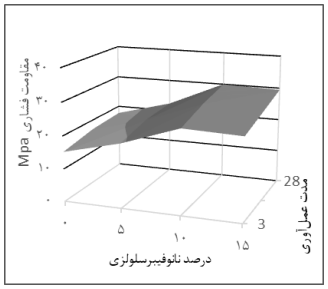
حدود ۶۹ درصد بوده است. همچنین کمترین مقدار مقاومت فشاری نخست مربوط به نمونه‌های شاهد در تمامی سنین و سپس نمونه آزمایشگاهی خشت‌های تثبیت‌شده با ۵ درصد نانوفیبرسلولزی در سن ۳ روزگی بوده است. لازم به ذکر است که افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری از ۳ به ۷ و ۷ به ۲۸ با بهبود واکنش‌های هیدراسیون موجب افزایش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های شاهد و آزمایشگاهی گشته است، بااین‌وجود، میانگین مقاومت فشاری نمونه شاهد در سن ۲۸ روزگی همچنان از مقاومت فشاری نمونه آزمایشگاهی خشت‌های تثبیت‌شده با ۵ درصد نانوفیبرسلولزی حتی در سن ۳ روزگی کمتر بوده است. در خصوص نمونه‌های آزمایشگاهی خشت‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد افزودنی همچنین نمونه‌های با سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌های ۳ روزه حدود ۱۸ درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. شکل ۴، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها را باتوجه‌به درصد نانوفیبرسلولزی و مدت عمل‌آوری نشان می‌دهد.

در خصوص مقاومت لغزشی نمونه‌ها

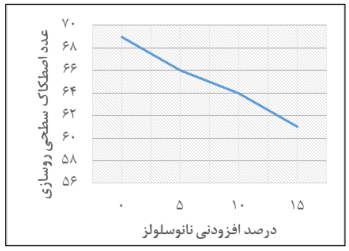
شکل ۵، نتیجه حاصل از آزمایش آونگ انگلیسی و تأثیر افزودن نانوفیبرسلولزی را بر عدد اصطکاک سطحی روسازی خشت تثبیت‌شده با درصدهای مختلف با نانوفیبرسلولزی نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۵ و همچنین جدول ۲، عدد اصطکاک سطحی با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که کمترین عدد اصطکاک سطحی مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی با ۱۵ درصد نانوفیبرسلولزی بوده است. همچنین عدد اصطکاک سطحی خشت‌های تثبیت‌شده با ۱۵ درصد نانوفیبرسلولزی نسبت به نمونه شاهد ۱۱ درصد کاهش داشته است. از این امر می‌توان چنین نتیجه گرفت که نانوفیبرسلولزی به‌عنوان یک ماده چسبنده عمل کرده و به تولید خشتی با سطح صاف‌تر می‌انجامد. البته لازم به ذکر است که باتوجه‌به اینکه عدد اصطکاک سطحی روسازی تمامی نمونه‌ها بالای ۶۰ است، احتمال لغزش بر روی روسازی‌های مربوط بسیار پایین است.

در خصوص درصد جذب آب نمونه‌ها

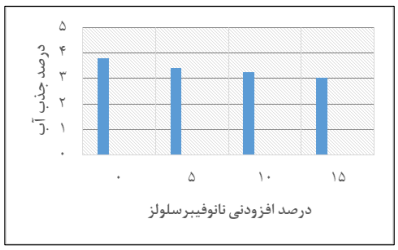
مطابق با شکل ۶ و جدول ۲، نمونه‌های آزمایشگاهی خشت‌های تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی نسبت به نمونه شاهد جذب آب کمتری داشته است. همچنین با افزایش نانوفیبرسلولزی از ۵ به ۱۵ درصد، جذب آب نمونه‌ها حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. مکانیسم کار نانوفیبرسلولزی در خصوص کاهش جذب آب در حقیقت بدین‌صورت بوده است که زمانی که تعداد بسیار زیاد ذرات نانویی این ماده با سطح ویژه بالا به خشت اضافه شده است، به‌عنوان یک پرکننده بسیار ریز، فضای خالی خشت را پرکرده است و ازآنجایی‌که درصد جذب آب در نسبت مستقیم با فضای خالی موجود در خشت قرار دارد، با افزودن نانوفیبرسلولز درصد جذب آب نمونه‌ها کاهش یافته است. مطابق با شکل ۶، حداکثر بهبود حاصل‌شده در درصد جذب آب نمونه‌های آزمایشگاهی، متعلق به خشت تثبیت‌شده با ۱۵ درصد نانوفیبرسلولزی است. میانگین کاهش جذب آب این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد حدود ۲۰ درصد بوده است.



شکل ٤. نمودار مقاومت فشاری در نسبت با درصد نانوفیبرسلولزی و مدت عمل‌آوری نمونه‌ها



شکل ۵. تأثیر افزودن نانوفیبرسلولزی بر عدد اصطکاک سطحی روسازی



شکل ٦. تأثیر افزودن نانوفیبرسلولزی بر درصد جذب آب

در خصوص رنگ نمونه‌ها

استفاده از نانوسلولز هیچ‌گونه تغییر محسوسی در رنگ بلوک‌های خشتی تولیدشده از خاک موردنظر پس از خشک شدن ایجاد نکرده است.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]
[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر در پی بهسازی و نوسازی پیاده‌راه‌های دارای بار ترافیکی اندک در بافت فرسوده روستای امره ازطریق افزودن نانوفیبرسلولز به بلوک‌های خشتی بوده است و به همین منظور، نمونه‌های آزمایشگاهی و شاهد بلوک‌های خشتی را مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت لغزشی، درصد جذب آب و بررسی ظاهری رنگ قرار داده است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که با افزایش درصد افزودنی نانوفیبرسلولزی تا ۱۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها در تمامی سنین ۳، ۷، و ۲۸ روز افزایش یافته است و با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی به ۱۵ درصد، نرخ بهبود کاهشی بوده است. نتایج نشان داده است که مقاومت فشاری نمونه‌های مربوط به خشت‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد نانوفیبرسلولزی و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری نسبت به نمونه شاهد با همین سن ۶۹ درصد افزایش داشته است. همچنین افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های شاهد و آزمایشگاهی گشته است.

نتایج همچنین حاکی از این بوده است که میانگین عدد اصطکاک سطحی مربوط به مقاومت لغزشی نمونه‌ها با افزایش درصد نانوفیبرسلولزی کاهش یافته است. بدین گونه که کمترین عدد اصطکاک سطحی مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی با بیشترین درصد نانوفیبرسلولزی (۱۵ درصد تثبیت‌کننده) و حدود ۱۱ درصد بوده است. همچنین احتمال لغزش بر روی روسازی‌های مربوط به همه درصدهای افزودنی نانوفیبر سلولز بسیار پایین بوده است.

نتایج پژوهش نشان داده است که تثبیت‌شدن خشت با ۱۵ درصد نانوفیبرسلولزی توانسته است درصد جذب آب را در نمونه‌های آزمایشگاهی ۲۰ درصد کاهش دهد لذا بیشترین بهبود را در درصد جذب آب در این نمونه‌های آزمایشگاهی شاهد بودیم.

همچنین هیچ‌گونه تغییر رنگی در ظاهر نمونه‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نمونه شاهد مشهود نبود.

درمجموع می‌توان بیان کرد که بلوک‌های خشتی تثبیت‌شده با نانوفیبرسلولزی می‌تواند عملکرد بلوک‌های خشتی را بهبود بخشد و ازاین‌جهت می‌توان از آن در روسازی پیاده‌راه‌های دارای بار ترافیکی کم در روستای امره استفاده کرد.

نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش یوداواتا[۴] و همکاران (۲۰۱۷) که روسازی خشتی–بتنی را به‌عنوان روسازی مناسبی برای پیاده‌راه معرفی می‌کنند همسو است. همچنین این پژوهش با مطالعات غفوری فرد و خبیری (۲۰۲۲) که در آن به امکان بهبود عملکرد روسازی بلوک خشتی پیاده‌راه ها با استفاده از افزودنی آهک و سیمان می‌پردازند و همچنین مطالعات حجازی و همکاران (۲۰۱۵) که امکان بهبود عملکرد خشت با آهک را تأیید می‌کنند و در هر دو پژوهش استفاده از این افزودنی‌ها را پیشنهاد می‌کنند هم‌راستا است.

در این پژوهش، تأثیر افزودن درصدهای مختلف نانوفیبرسلولزی بر مقاومت فشاری، لغزشی و درصد جذب آب بلوک‌های خشتی سنجیده شد. در پژوهش‌های آتی می‌توان تأثیر تثبیت خشت با نانوفیبرسلولزی بر سایر ویژگی‌های بلوک خشتی چون مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی و نفوذپذیری تحت فشار آب ارزیابی شود. همچنین در پژوهش‌های آتی می‌توان به تأثیر افزودنی‌های نانومقیاس دیگر چون نانوسیلیس بر عملکرد بلوک خشتی پرداخت. علاوه بر آن بررسی تأثیر افزودنی‌های نانو مقیاس در انواع مختلف خاک به‌عنوان پیشنهادی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود. لازم به یادآوری است که پژوهش بر روی تثبیت مصالح ساختمانی با نانومواد در مقیاس فراگیر و صنعتی موجب کاهش چشمگیری در هزینه‌های تولید مواد نانو و توجیه اقتصادی استفاده از آن‌ها در مقایسه با مقیاس آزمایشگاهی خواهد شد. برای پژوهش‌های آتی همچنین پیشنهاد می‌شود با استفاده از سایر تثبیت‌کننده‌های نانویی به‌صورت خاص به بررسی ضعف‌های مصالح خاکی پرداخته و دستاوردهای آن با تثبیت‌کننده نانوفیبرسلولز مقایسه و ارزیابی گردد.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

References

Ahadi, R., Jalili, M., & Nikkhah Shahmirzadi, M. (2014). Investigation of the effect of nano-additives on the engineering properties of soil materials (Case study of Zanjan clay). *First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran. (in Persian)

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

Baharvandi, H., Kolahgar, K., & Fahim, J. (2018). Study and Evaluation of corrosion resistance of Graphene-Zirconia dioxide/Epoxy nanocomposite coatings. *Journal of Nanomaterials*, *10*(34), 97-105. (in Persian)

Bahmani Oskooee, M., Hossein Nedjad, S., & Samadi, A. (2018). Effect of Copper Addition on the Microstructure, Hardness and Antibacterial Properties of Martensitic Stainless Steel (410s). *Journal of Advanced Materials and Technologies*, *7*(1), 35-44. doi: 10.30501/jamt.2018.91627 [In Persian]

Bahramzadeh, K., Razeghi, A., Miri, N K. (2018). The Influence of Lime in Adobe Optimization Against Humidity. *JHRE*. *37*(164), 115-124. doi:DOI: 10.22034/37.164.115. URL: http://jhre.ir/article-1-1325-fa.html (in Persian)

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

Chavan, M., Tamhane, Sh., Chavan, S., & Phuge, R. (2018). Manufacturing of pavement block by using waste plastic and sea sand. Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 5(03).

Ebrahimi Sadrabadi, T., Allah karam, S. R., & Towhidi, N. (2017). Synthesis and Characterization of Microcapsules Containing Epoxy Resin (Epon 828) for Self-healing Coatings. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, *6*(2), 1-8. doi: 10.30501/jamt.2017.70358 (in Persian)

Esmaily, A., Ghalehnovi, M. (2012). The in fluence of palm fibres and lime as natural stabilizer on the mechanical properties of adobe, (in environmental condition contain 35% of humidity). *JHRE*. *31*(138), 53-62. URL: http://jhre.ir/article-1-188-fa.html (in Persian)

Fakhri, M., Hasani, A., Kari M. (2015). Analysis of friction and texture of asphalt pavement by British pendulum tester and sand patch test. *MCEJ*, 15 (5) :161-168. URL: http://mcej.modares.ac.ir/article-16-731-fa.html (in Persian)

Farhudi, R., Rahnemaei, M. T., & Teimouri, I. (2011). Measuring Urban Neighborhoods Sustainable Development with Fuzzy Logic and geographic Information System (Case Study: Tehran – 17th municipal region). *Human Geography Research*, *43*(3), 89-111. (in Persian)

Ghaforifard, Z., & Khabiri, M. M. (2022). Improving the performance of adobe paving of sidewalks and rural passages using additives. *JHRE*. *41*(179), 91-105. doi:DOI: 10.22034/41.179.91 URL: http://jhre.ir/article-1-2298-fa.html (in Persian)

Ghobadian, V. (2013). *Climatic Survey of Traditional Iranian Buildings*. Tehran, University of Tehran Press. (in Persian)

Golabchi, M., Taghizadeh, K., & Soroushnia, E. (2011). *Nanotechnology in Architecture and Building Engineering*. Tehran, Tehran University Press. (in Persian)

Gholamian, F., Ghariban Lavasani, S., Bataghva, F., Moraveji, A., & Ranjbar, Z. (2012). The Effect of water absorption on durability of coatings and nano composites. *Journal of Studies in Color World*, *1*(4), 51-58. (in Persian)

Gorji Mahlabani, Y., Sanmari, M. M., & Mohammadzadeh, N. (2010), The role of nanotechnology in realizing sustainable architecture. Journal of Tarh & Namad, 2, 49-61. (in Persian)

Hasanjanzadeh, H., Yousefi, H., Hejazi, S., & Jamali Rad, L. (2013), Super Mill: A Simple, Fast and Efficient Method for Nanocellulose Production. *First National Conference on Nanotechnology and Its Application in Agriculture and Natural Resources*, University of Tehran, Karaj. (in Persian)

Hashemnejad, H., Feizi, M., & Rezaei, M. (2015). Design strategies for achieving social sustainability in low-income housing in Tehran. *Journal of the Iranian Society of Architecture and Urban Planning*, 9, 81-90. (in Persian)

Hejazi, M., Hashemi, M., Jamalinia, E., & Batavani, M. (2015). Effect of Additives on Mechanical Strengths of Adobe Made From Soils of Isfahan. *JHRE*. *34*(151), 67-80. URL: http://jhre.ir/article-1-832-fa.html (in Persian)

Khanzadi, M., & Khazaeni, G. (2010). Investigation of the mechanisms of silica nanoparticles in

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]

improving the mechanical properties of concrete. *The Second National Iranian Concrete Conference*, Tehran, Iranian Concrete Association. (in Persian)

Khosravani, A., & Ghorbani, A. (2011), Investigation of the effect of nano-clay on the engineering properties of cohesive soils. *The Sixth National Civil Engineering Congress*, Semnan University, Semnan. (in Persian)

Kiahosseini, S., & Abedi, A. (2018). Fabrication and investigation of mechanical properties and corrosion behavior of A356 - carbon nanotube aluminium base composite. *Journal of Nanomaterials*, *9*(32), 265-274. (in Persian)

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

Mahmoudi, M., Behboudi, M. H., & Sedigh Ziabari, H. (2008). Investigating the role of nanotechnology in reducing environmental pollution in the construction industry. *Journal of Environmental Science and Technology*, (3)10, 61-70. (in Persian)

Mehri, E., Ghasemian, A., Afra, E., & Jafari, R. (2013). Types of nanocellulose and its applications. *The Second National Conference on Sustainable Development of Agriculture and Healthy Environment*, Shahid Mofateh Technical College, Hamadan. (in Persian)

Namvar, S., Zeini, M. (2019). The Effect of Sodium Silicate and Acrylic on Physical and Mechanical Parameters of Thatch Mortar. *JHRE*. *38*(168), 51-60. doi:DOI: 10.22034/38.168.51 URL: http://jhre.ir/article-1-1453-fa.html (in Persian)

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.

Rahimi, H. (2017). *Building Materials*. Tehran, Tehran University Press.

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, M., Li, Zh., & Ganji, M. (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., & Halwatura, Rangika. (2016). Embodied energy of mud concrete block (MCB) versus brick and cement blocks. Energy and Buildings, 126, 28–35.

Udawattha, Ch., Galabada, H., & Halwatura, R. (2017). Mud concrete paving block for pedestrian pavements. Case Studies in Construction Materials, 7, 249–262.

Yousefi, H., Mashkoor, M. (2012). Applications and commercialization of cellulose nanofibers, *First National Conference on Nanotechnology and its application in agriculture and natural resources*, University of Tehran, Karaj. (in Persian)

Zare Shahabadi, Sh., & Farahza, N. (2017). A Survey on the Production of Compacted Brick Appropriate to the Climatic Conditions of Yazd. *The Sixth National Conference and the Second International Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering.* (in Persian)

DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31

[Downloaded from jhre.ir on 2026-10-11]

[DOI: https://doi.org/10.22034/44.189.31]