Journal of Sustainable Architecture and Environment
Vol 2, No 5, Spring 2024
https://sanad.iau.ir/journal/jsae
ISSN (Online): 2981-0892

Research Paper

Performance Evaluation of New Recycled Materials With the Use of Thermal Insulation in Building Walls

Aaram Mirmothari: PhD student, Department of Architecture, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran
Mahsa Rahmani Zakavot: Master's degree student, Department of Architecture, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran
Sayedehmamak Salavatian*: Faculty member, Department of Architecture, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

Received: 2024/05/20 **PP** 65-78 **Accepted:** 2024/08/20

Abstract
Continuous increase in energy consumption and environmental pollution is one of the main challenges of the 21st century. One of the approaches to overcome these challenges is to emphasize on the use of recycled materials and environmental-friendly methods in production. Use of new recycled materials as thermal insulation in buildings would play a vital role in reducing environmental pollution and is also effective in saving energy consumption by minimizing heat loss during heating and cooling period of the building. For this purpose, this study evaluates performance of new recycled materials in building envelopes with the use of thermal insulation and examines the effect of the physical and thermal characteristics of these insulating materials on the thermal performance of the exterior walls. In this regard, recycled materials usable in various parts of a building as well as the properties of recycled materials used as thermal insulation in the building wall were investigated in this research. The results show that although the current market is completely dominated by common synthetic insulation materials, it is possible to replace these common materials with recycled materials and achieve the desired thermal performance. In some cases, thermal insulation materials produced from recycled materials with a thickness equal to the raw materials provide the heat transfer coefficient allowed according to the national building regulations and show better results than the existing and predominant products in the market. In addition, the life cycle assessment report indicates that environmental impacts are minimized by replacing common thermal insulation with these recycled materials.

Keywords: Recycled Building Materials, Thermal Insulation, Building Envelope, Environmental Impacts

Citation: Mirmothari, A., Rahmani Zakavot, M., & Salavatian, S. (2024). **Performance Evaluation of New Recycled Materials With The Use of Thermal Insulation in Building Walls,** *Journal of Sustainable Architecture and Environment*, 2 (5), 165-78.

*. **Corresponding author:** seyedehmamak Salavatian, **Email:** salavatian@iaurasht.ac.ir, **Tel:** +989364168911

Extended Abstract

Introduction

Increasing energy consumption and environmental pollution are among the main challenges of the 21st century. One of the solutions to deal with these challenges is the use of recycled materials and environmentally friendly methods in the production of building materials. This research examines the performance of recycled materials as thermal insulation in building walls and evaluates the effect of physical and thermal characteristics of these materials on the thermal performance of buildings. The results show that recycled materials can effectively replace synthetic insulations and provide better performance in some cases. Also, the use of these materials can reduce the environmental impact. Considering the energy crisis and pollution caused by fossil fuels, it is necessary to optimize energy consumption in buildings. The use of efficient thermal insulation can reduce up to 65% of energy consumption. In recent years, attention has been paid to the use of environmentally friendly and recycled materials, and researchers are looking for solutions to optimize energy consumption and preserve natural resources.Previous researches show that the use of recycled materials in the construction industry can contribute to sustainable development and environmental protection. This article examines and evaluates thermal insulation materials made from different wastes and their effect on optimizing energy consumption.

Methodology

The purpose of this research is to investigate recycled materials for insulating building walls. The main research questions include identifying types of recycled materials with thermal insulation performance and the characteristics of these materials. The research methodology is descriptive-analytical and based on library studies.Recycling means reprocessing materials at the end of their life and returning them to the life cycle. In the past, recycling was more of a waste management issue, but nowadays resource efficiency is being considered as a drive for recycling. The goals of recycling include reducing waste, preserving natural resources, preventing pollution, saving energy, and reducing greenhouse gas emissions.The benefits of using recycled materials include not using agricultural land, considering the economy, eliminating water pollution, preventing greenhouse gas emissions, reducing transportation, and creating employment.

Results and discussion

The paper examines new recycled materials in the construction industry that are produced with new compounds in different countries. These materials are mainly based on minerals and are used to make coatings, structures and connections. Considering the challenges of energy consumption in developed countries, and the use of these recycled materials in the production of building materials is increasing. Some of these materials include recycled concrete aggregate, silica fume, cement kiln dust, glass, plastic, and carpet waste. Also, a summary of recycled materials and their applications in construction projects is presented in Table 1.Thermal insulation refers to materials that have the ability to reduce heat transfer. Thermal insulation property is usually measured by thermal conductivity (λ) and thermal transmittance (U-value). Thermal conductivity refers to the heat transfer rate per unit length and temperature difference and is measured in W/mK units. Also, thermal resistance (Rth) is the ratio of material thickness to its thermal conductivity. Materials with thermal conductivity less than 0.07 W/mK are known as thermal insulation, and materials with conductivity below 0.05 W/mK perform better.The study examines building insulation materials and their environmental effects. Currently, most insulating materials are produced from synthetic and mineral fibers such as glass fibers and mineral wool, which have negative effects on the environment. Using recycled, natural or synthetic fibers as alternatives can help improve energy performance, reduce the consumption of non-renewable resources and reduce pollution.In this regard, textile waste and natural fibers such as cotton, hemp and wool have been investigated as thermal insulation materials. These materials can be used as sustainable options in the construction industry due to their proper thermal insulation properties and reduced heat conduction. Also, recycled polyester and nylon fibers have also been introduced as thermal insulation materials with

acceptable properties.Finally, the use of these materials not only helps to reduce textile waste, but can also improve the quality of the environment and human health.Life cycle assessment (LCA) is a systematic method to examine the environmental impact of a product from production to its disposal. This method includes the evaluation of the emission of pollutants in the air, water and soil and environmental effects such as resource depletion and global warming. LCA is usually performed by consulting firms and research institutes and can be done following international standards such as ISO14040 and ISO14044.Research has shown that cotton cultivation and different dyeing processes have different impacts on the environment. In particular, the use of recycled fibers can help reduce carbon footprints and water consumption. For example, the use of recycled cotton fibers in a Swedish factory has resulted in a reduction of 2.4 million tons of CO2 equivalent and more than 900 billion liters of water per year. Also, the production of recycled clothes requires much less energy than the production of raw materials.Finally, the results show that acrylic and polyester fibers have the least impact on the environment, while cotton has the most impact. These findings emphasize the importance of using recycled fibers and reducing the consumption of primary resources.In this study, the performance of recycled materials as an alternative to common thermal insulation in residential constructions in Tehran has been investigated. The aim was to evaluate the potential of these materials to compete with conventional commercial insulations. The most frequent wall type of residential buildings in Tehran was selected as samples and the minimum thermal resistance of the walls was determined based on national building regulations. Five samples of recycled materials were compared with polystyrene and the results showed that these materials with similar thicknesses (57 to 76 mm) can act as substitutes for commercial insulation and provide similar thermal performance.

Conclusion

This article examines the use of recycled materials in the construction industry and their replacement as thermal insulation in building walls. Researches show that some of these materials can effectively replace polystyrene in the walls and provide optimal thermal performance by complying with the national building standards. Also, the use of these materials helps reduce the carbon footprint and save energy. In the future, more research will be done to simulate the thermal and moisture performance of different types of recycled materials to introduce their advantages as an alternative to commercial synthetic materials to building professionals and users.

References

1. Asdrubali, F; D'Alessandro, F; Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustain. Mater. Technol4, 1–17.
2. Asdrubali, F; Schiavoni, S; Horoshenkov, K.V. (2012). A review of sustainable materials for acoustic applications. Build. Acoust.
3. Awwad, M., & Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. Am. J. Eng. Applied Sci.
4. Binici, H., Eken, M., Dolaz, M., Aksogan, O., & kara, m. (2014). An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. Constr. Build. Mater. 51, 24–33.
5. Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., & Fini , E. (2013). Utilization of Recycled and Waste Materials in Various Construction Applications. American Journal of Environmental Science.
6. Briga-Sa A Nascimento D Teixeira N. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. Constr. Build. Mater. 38, 155–160.
7. Datta C Basu D Roy A Banerjee A. (2004). Mechanical and dynamic mechanical studies of epoxy/VAc-EHA/HMMM IPN–jute composite systems. J. Appl. Polym. Sci. 91, 958–963.
8. Delbari, S., & Ghadamyari, H. (2023). Lightweight construction using recycled concrete materials. 8th International Conference on Research in Science and Engineering and 5th International Congress of Civil Engineering, Architecture, and Urban Development of Asia [In Persian].
9. Desarnaulds, V., Costanzo, E., Carvalho, A., & Arlaud, B. (2005). Sustainability of acoustic materials and acoustic

characterization of sustainable materials. In: Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration. https://paginas.fe.u.

10. Dissanayake, D.G.K; Weerasinghe, D.U; Wijesinghe, K.A.P.; Kalpage, K.M.D.M.P . .(۲۰۱۸)

11. Drochytka R; Dvorakova M; Hodna J .(2017). Performance evaluation and research of alternative thermal insulation based on waste polyester fibers. . Procedia Eng. 195, 236–243.

12. Fatima, S., & Mohanty, A. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. Appl. Acoust. 72, 108–114.

13. Gassan, j; Chate, A; Bledzki, A .K; (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. J. Mater. Sci. 36, 3715–3720.

14. Gle, P., Gourdon, E., & Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. Appl. Acoust. 72, 249–259.

15. Gounni A El Wazna M El Alami M El Boua. (2018). Thermal performance evaluation of textile waste as an alternative solution for heat transfer reduction in buildings. . J. Sol. Energy Eng. 140, 1–6.

16. H Lin ،T.T Li, C.W Lo. (2016) Puncture-resisting, sound-absorbing and thermal-insulating properties of polypropylene-selvages reinforced composite nonwovens. J. Ind. Text. 45, 1477–1489.

17. Hakimi, M., Kazemi, M. J., & Tajeddini, A. (2021). Energy consumption optimization management with zero-energy building approach using fuzzy method. Scientific-Research Journal of Structural and Construction Engineering, 8(6), 241-262. https://doi.org/10.22065/jsce.2020.199064.1932 [In Persian].

18. Hosseini, S. S., & Rad, S. (2023). Investigating the changes in the physical properties of bitumen composite with the addition of recycled materials. Journal of Environmental Science and Technology, 25(1), 39-51. https://doi.org/10.30495/jest.2022.616195.5431 [In Persian].

19. Iannace, G., Maffei, L., & Trematerra, P. (2012). On the use of “green materials” for the acoustic correction of classrooms. https://iris.unicampania.it/handle/11591./

20. Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. Journal of Environmental Management.

21. J, Sedlmajer M Zach J Hroudova (2015). Possibilities of development of thermal insulating materials based on waste textile fibers. Adv. Mater. Res. 1124, 183–188.

22. K, Aghaee M, Foroughi (2013). Construction of lightweight concrete partitions using textile waste. . In: Chong, W., Gong, J., Chang, J., Siddiqui, M. (Eds.), ICSDEC 2012.:

23. Krach, A; Advani, S.G; (1996). Influence of void shape, void volume and matrix anisotropy on effective thermal conductivity of a three-phase composite. J. Compos. Mater. 30, 933–946.

24. Leblance, R. (2018). The balance small business textile recycling facts and figures. https://www.thebalancesmb.com.

25. Massoudinejad, M. , Amanidaz, N., Santos, R. .., & Bakhshoode, R. (2019). Use of municipal, agricultural, industrial, construction and demolition waste in thermal and sound building insulation materials. a review article, Journal of Enviro.

26. Patnaik, A. ,., Mvubu, M., Muniyasamy, S., & Botha, A. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers andtheir biodegradation studies. . Energy Build. 92, 161–169.

27. Recycle, C. (2006). Asphalt roofing shingles recycling: Introduction. The California Department of Resources Recycling and Recovery.

28. RMA. (2011). U.S. scrap tire management summary. Rubber Manufacturers Association, Inc.

29. Roos, s; Zamani, B; Sandin, G; Peters, G.M; (2016). A life cycle assessment (LCA)-based approach to guiding an industry sector towards sustainability. the case of the Swedish apparel sector. J. Clean. Prod. 133, 691–700.

30. Sartipi Pour, F. (2015). Feasibility study of material recycling in post-disaster reconstruction (Case study of concrete recycling). Housing and Rural

Environment Quarterly, 34(152), 31-42. [In Persian].

31. Shaghayegh, M. (2013). Study of thermal behavior of common materials in wall construction: Case study of residential buildings in Tehran. Journal of Fine Arts, 18(1), 69-78. https://doi.org/10.22059/jfaup.2013.36358 [In Persian].

32. sustainable urban neighborhood with zero-energy buildings in Valiasr neighborhood of Tabriz. Sustainable City Quarterly, 4(2), 91-106. https://doi.org/10.22034/jsc.2021.259714.1364 [In Persian].

33. Trajković, D; Jordeva, S; Tomovska, E; Zafiro; (2017) Polyester apparel cutting waste as insulation material. J. Text. Inst. 108, 1238–1245.

34. van der Velden, N.M; Patel, M.K; Vogtlände (2014). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 331–356.

35. Wang Y (2010). Fiber and textile waste utilization. Waste Biomass Valorization 1, 135–143.

36. Woolridge, A.C; Ward, G.D; Phillips, P.S; (2006). Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material. an UK energy saving perspective.Resour. Conserv. Recycl. 46, 94–103.

37. Woolridge, A.C; Ward, G.D; Phillips, P.S; (2006). Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material:. an UK energy saving perspective.Resour. Conserv. Recycl. 46, 94–103.

38. Worrell, E., & and Reuter, M. (2014). Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts,. and Scientists, Elsevier Science, 10.

39. Zach J; Korjenic A; Petránek V; Hroudová; (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. Energy Build. 49, 246–253. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014

فصلنامه معماری و محیط پایدار
دوره ۲، شماره ۵، بهار ۱۴۰۳
https://sanad.iau.ir/journal/jsae
شاپا الکترونیکی: ۰۸۹۲-۲۹۸۱

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد مصالح بازیافتی نوین با کاربرد عایق حرارتی در جداره‌های ساختمانی

آرام میرمطهری: دانشجوی دکتری معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
مهسا رهنمائی ذکاوت: دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
سیده مامک صلواتیان[۱]: استادیار، گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱ صص ۷۸-۶۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

چکیده

افزایش مداوم مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم است. یکی از رویکردهای غلبه بر این چالش‌ها افزایش استفاده از مواد بازیافتی و روش‌های سازگار با محیط زیست در تولید است. از آنجایی که استفاده از مصالح بازیافتی نوین بعنوان عایق حرارتی در ساختمان‌ها می‌تواند نقش حیاتی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی داشته باشد، به‌کارگیری این دسته از مواد عایق با به حداقل رساندن اتلاف حرارتی در طول گرمایش و سرمایش ساختمان در صرفه‌جویی مصرف انرژی کارآمد است. هدف از این تحقیق بررسی مواد بازیافتی با هدف عایق‌کاری جداره‌های ساختمان است. از این رو روش‌شناسی پژوهش حاضر توصیفی– تحلیلی و مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای می‌باشد. به این منظور، این مقاله به ارزیابی عملکرد مصالح بازیافتی نوین در جداره‌های ساختمانی با کاربرد عایق حرارتی می‌پردازد و تأثیر مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی این مواد عایق را بر عملکرد حرارتی پوسته خارجی بررسی می‌کند. در این راستا، مصالح بازیافتی قابل استفاده در بخش های مختلف ساخت، و نیز ویژگی های مصالح بازیافتی کاربردی به‌عنوان عایق حرارتی در جداره ساختمان در این پژوهش مورد تشریح و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه بازار کنونی به طور کامل تحت سلطهٔ برخی از مواد عایق سنتزی متداول است، امکان جایگزینی این مواد متداول با مواد بازیافتی و دستیابی به عملکرد حرارتی مورد نظر وجود دارد. در برخی موارد، مواد عایق حرارتی تولید شده از مواد بازیافتی با ضخامتی معادل مصالح اولیه، ضریب انتقال حرارتی مجاز مطابق مقررات ملی ساختمان را تامین نموده و نتایج بهتری نسبت به محصولات موجود و غالب در بازار نشان می‌دهند. علاوه بر آن گزارش ارزیابی چرخهٔ حیات حاکی از آن است که اثرات زیست‌محیطی از طریق جایگزینی عایق‌های حرارتی رایج با این مواد بازیافتی به حداقل می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: مصالح بازیافتی ساختمانی، عایق حرارتی، پوستهٔ ساختمان، اثرات زیست‌محیطی

استناد: میرمطهری، آرام؛ رهنمائی ذکاوت، مهسا و صلواتیان، سیده مامک (۱۴۰۳). **ارزیابی عملکرد مصالح بازیافتی نوین با کاربرد عایق حرارتی در جداره‌های ساختمانی**، *فصلنامه معماری و محیط پایدار*، ۲(۵)، ۶۵-۷۸.

[۱] **نویسنده مسئول:** سیده مامک صلواتیان ، **پست الکترونیکی:** salavatian@iaurasht.ac.ir **تلفن:** ۰۹۳۶۴۱۶۸۹۱۱

مقدّمه

پیشرفت علم و فناوری علاوه بر دستاوردهای فراوان برای آسایش و رفاه بشر، همواره مشکلاتی را نیز برای بشر به همراه داشته است. در این زمینه دو بحران بزرگ که آینده بشریت را تهدید می‌کنند، مسئله انرژی و رو به اتمام بودن منابع انرژی‌های فسیلی و دیگری اثرات تخریبی و آلوده‌کننده محیط زیست در اثر استفاده بی‌رویه از این سوخت‌ها است. مواجهه با این گونه مسائل و مشکلات محققان را به تلاش در راستای کاهش اثرات سوء ناشی از آن سوق داده است (اصغری، ابراهیمی اصل، ملکی گاوگانی و ستاری ساربان قلی، ۱۴۰۰). مقایسه میزان مصرف سرانهٔ انرژی در جوامع بین‌المللی نشان داده است که در ایران میزان مصرف انرژی به ازای هر مترمربع در بخش ساختمان و مسکن ۲/۶ تا ۴ برابر این مقدار در کشورهای صنعتی است که نشانگر فاصله چشمگیر مصرف انرژی در بخش ساختمان در کشور ما با استانداردهای جهانی است. در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از محققان و دست‌اندرکاران مصرف انرژی در بخش ساختمان به رویکرد صرفه‌جویی در مصرف انرژی و یافتن راهکارهای مناسب و کارا برای حفظ منابع انرژی جلب شده است. بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان، برخلاف سایر سیستم‌های تبدیل انرژی با عوامل محدودکننده‌ای نظیر شرایط آسایش حرارتی روبرو بوده و در اغلب موارد کاهش مصرف انرژی در ساختمان منجر به تضعیف شرایط آسایش ساکنین آن می‌گردد؛ بنابراین، باید در پی راهکارهایی بود که بتوان ضمن حفظ شرایط آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول، مصرف انرژی را نیز کاهش داد (حبیب‌زاده،، ۱۳۹۸).

دستیابی به اصولی در راستای معماری پایدار می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، درهای بازگشت به معماری همساز با طبیعت به سبک گذشته را به روی نسل معاصر بگشاید (اصغری و همکاران؛ ۱۴۰۰). به دنبال پیشرفت تکنولوژی و پیدایش مصالح ساختمانی جدید و در پی آن تغییر در الگوی ساخت از شیوه سنتی به صنعتی و تغییر در ساختار سازه‌ای بنا (از دیوار باربر به اسکلتی) و نیز با کاهش ضخامت جداره‌ها، بهره‌گیری از عایق‌کاری حرارتی جداره‌ها عامل مهمی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها محسوب می‌شود. استفاده از مواد عایق کارآمد می‌تواند با به حداقل رساندن تلفات حرارتی به صرفه‌جویی در انرژی کمک کند. بر اساس متون علمی، یک عایق خوب می‌تواند حدود ۶۵ درصد از مصرف انرژی در ساختمان‌های خانگی کاسته و بیش از صد برابر در میزان ردپای کربن ناشی از استفاده و دفع مواد مورد استفاده تاثیرگذار باشد (Islam & Bhat, 2019).

از این رو تهیه و تولید مواد عایق از مواد بازیافتی راه حل بالقوه‌ای برای حل این چالش بوده فلذا هدف از این تحقیق شناخت و ارزیابی عملکرد مواد بازیافتی نوین به‌عنوان مصالح ساختمانی با هدف عایق‌کاری در جداره‌های ساختمان می‌باشد.

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

در سال‌های اخیر، درک روند مصرف و تبیین روش‌هایی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد توجه پژوهشگران و مدیران انرژی در بخش مسکونی قرار گرفته است (حبیب‌زاده، ۱۳۹۸). سرتیپی‌پور در مقاله‌ای با عنوان «امکان‌سنجی بازیافت مصالح در بازسازی پس از سانحه» مطالعه‌ای درباره بازیافت بتن انجام داده و در آن به ضرورت توجه به بازیافت بتن و شیوه‌های استفاده از منافع بازیافت در جهت توسعه صنعت ساختمان، حفظ محیط زیست و صرفه‌جویی‌های ناشی از آن تأکید کرده است (سرتیپی‌پور، ۱۳۹۴).

همچنین، امروزه آگاهی درباره استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست و سالم افزایش یافته است که این امر موجب ترغیب افراد به استفاده از مواد طبیعی و بازیافتی شده است (Asdrubali & Horoshenkov, 2012; Gle et al., 2011; Iannace et al., 2012). در نتیجه، تمایل به استفاده از مواد عایق ساختمانی ساخته شده از مواد طبیعی بی‌ضرر و محصولات بازیافتی به تدریج در حال افزایش است (Asdrubali et al., 2015). شفیق‌الاسلام در مقاله‌ای با عنوان «مواد عایق حرارتی و صوتی سازگار با محیط زیست از منسوجات بازیافتی» به بررسی انواع مصالح بازیافتی جهت عایق‌های حرارتی و صوتی ساختمان پرداخته است (Islam & Bhat, 2019). محمدرضا مسعودی‌نژاد و همکاران در یک مقاله مروری به بررسی مواد عایق حرارتی و صوتی ساخته شده از زباله‌های شهری، کشاورزی، صنعتی، ساختمانی و تخریبی پرداخته‌اند (Massoudinejad et al., 2019). همچنین، چندین نویسنده دیگر مواد بازیافتی طبیعی برای توسعه مواد عایق حرارتی را به دلیل اثرات زیست‌محیطی مثبت، ردپای کم کربن و اثرات خطرناک کم برای سلامتی مطالعه کرده‌اند (Binici, 2014; Fatima & Mohanty, 2011; Desarnaulds et al., 2005). حسینی و راد در مقاله‌ای با عنوان «بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی کامپوزیت قیر با افزودن مواد بازیافتی» بیان می‌کنند که افزودن مواد بازیافتی می‌تواند برخی خواص قیر خالص را بهبود بخشد و می‌توان با توجه به کاربری قیر در صنعت مورد نظر از افزودنی‌هایی که خاصیت مورد نظر را تقویت می‌کنند، استفاده کرد (حسینی و راد، ۱۴۰۲). همچنین، دلبری و قدمیاری در مقاله‌ای با عنوان «سبک‌سازی ساختمان با استفاده از مصالح بازیافتی بتنی» بیان می‌کنند که بازیافت نخاله‌ها و ضایعات ساختمانی کمک زیادی به حفظ محیط

زیست اطراف خواهد کرد. بازیافت مصالح قابل مصرف، هدایت صحیح مواد زائد به محل‌های دفن و نهایتاً زیباسازی از اهداف عمده مدیریت نخاله‌های ساختمانی است (دلبری و قدمیاری، ۱۴۰۲).

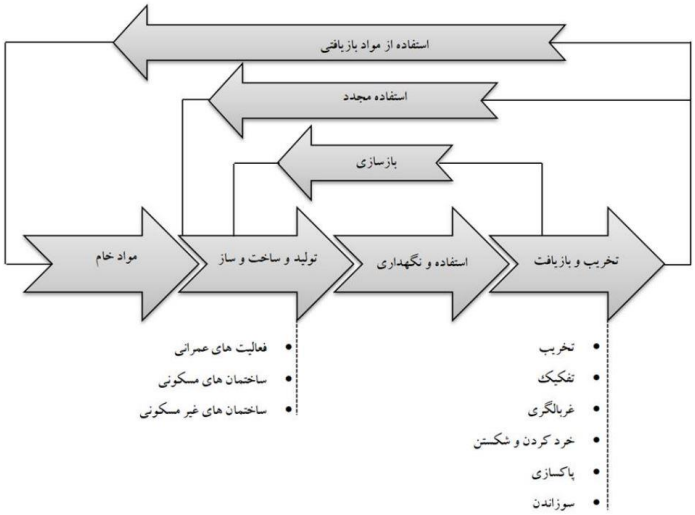
مواد و روش تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی مواد بازیافتی باهدف عایق‌کاری جداره‌های ساختمان است. ازاین‌رو مهم‌ترین سؤالات تحقیق عبارت است از: ۱- انواع مصالح بازیافتی نوین با عملکرد عایق حرارتی کدامند؟ ۲- مصالح بازیافتی قابل استفاده در جداره‌های ساختمان با هدف عایق‌های حرارتی دارای چه ویژگی‌هایی هستند؟ روش‌شناسی پژوهش حاضر توصیفی- تحلیلی و مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای می‌باشد.

بحث و ارائه یافته‌های تحقیق

بازیافت، اهداف و مزایا

بازیافت، فرایندی است که در طی آن، مواد در پایان طول عمر خود مجدداً پردازش می‌شوند و به چرخه زندگی بازگردانده می‌شوند. مواد بازیافتی را «مواد ثانویه» نیز می‌نامند که در تقابل با «مواد اولیه» هستند. در دهه‌های گذشته، بازیافت به طور عمده به‌عنوان مسئله‌ای در مدیریت زباله در نظر گرفته می‌شد. درحالی‌که امروز به‌تدریج این دید به سمت بهره‌وری منابع به‌عنوان محرکی برای بازیافت، تغییریافته است (Worrell & and Reuter, 2014) به‌کارگیری این مواد رابطه مستقیمی با مدیریت کل چرخهٔ حیات ساختمان و مواد و مصالح آن داشته و آن را کامل می‌کند؛ این چرخه متشکل از مراحل تولید، ساخت، تخریب و استفاده مجدد/ بازیافت و یا دفع می‌باشد. نمودار زیر چرخه استفاده از مواد و مصالح در ساختمان و نقش بازیافت را در این چرخه نشان می‌دهد:



شکل۱- مدل چرخهٔ مواد بازیافتی در ساختمان

از جمله اهداف فرایند بازیافت می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کاهش میزان ضایعاتی که برای دفن و سوزاندن فرستاده می‌شوند. - حفظ منابع طبیعی از قبیل چوب، آب و منابع معدنی - پیشگیری از آلودگی از طریق کاهش نیاز به جمع‌آوری مواد خام - صرفه‌جویی در انرژی - کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای که در تغییر آب و هوا نقش دارند. - کمک به پایداری محیط زیست برای تولیدهای آینده

برخی از مزایای استفاده از مصالح بازیافتی نیز به شرح زیر است:

- عدم استفاده از زمین‌های زراعی و منابع طبیعی در محل دپوی زباله و عدم ایجاد آلودگی‌های بصری- کمک به اقتصاد با استفاده مجدد از نخاله‌ها- حذف آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی - جلوگیری از متصاعد شدن گازهای گلخانه‌ای و گازهای سمی سیمان و آهک- جلوگیری از پراکندگی ریزگردها- کاهش حمل و نقل و در نتیجه کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی- ایجاد اشتغال از طریق گسترش صنعت (Bolden, 2013).

مصالح بازیافتی نوین در صنعت ساختمان

امروزه مصالح ساختمانی جدید با ترکیبات نوین در کشورهای مختلف دنیا ساخته می‌شوند. بسیاری از این مصالح بر پایه مواد معدنی و برای ساخت پوشش‌ها، سازه‌ها و اتصالات می‌باشند. باتوجه‌به چالش‌های مصرف انرژی در کشورهای پیشرفته عمدتاً استفاده از این مواد بازیافتی نوین در تولید مصالح ساختمانی روند رو به رشدی داشته است.

سنگدانه بتن بازیافتی، سیلیکافیوم یا دوده سیلیسی، گرد و غبار کورهٔ سیمان، ماسهٔ ریخته‌گری، تایل‌های شینگل بام شیروانی، روسازی آسفالت اصلاح شده، شیشه، پلاستیک، ضایعات فرش، لاستیک تایر، خاکستر بادی، سرباره ، کود حیوانی، چربی حیوانی، پوست مرکبات، لجن فاضلاب (Bolden, 2013).

خلاصه‌ای از مواد بازیافتی انتخاب شده و کاربردهای آنها در پروژه‌های مختلف ساختمانی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- انواع مواد بازیافتی و کاربردهای آنها در پروژه‌های مختلف

مواد بازیافتی	مواد بازیافتی نوآورانه در کاربردهای ساخت و ساز											
	آسفالت مخلوط داغ	مخلوط های بتن	خاکریزها	سنگدانه	خط مبنا	پر کننده معدنی	تثبیت کننده خاک	جاذب	تصفیه فاضلاب	پلیمر	چسب	سوخت جایگزین
کود حیوانی	×											×
چربی حیوانی		×								×		
دوده سیلیکا	×	×									×	
تخته های آسفالت	×			×	×	×	×					
الیاف شاخه های خرما	×											
پوستهای مرکبات								×				
گرد و غبار کوره سیمان	×	×					×					
خاکستر بادی		×	×	×		×		×	×			
ماسه ریخته گری	×	×	×	×	×							
سرباره		×	×		×		×					
شیشه			×	×			×					
پلاستیک	×		×	×								
فرش	×	×	×									
ضایعات لاستیک	×	×	×		×	×	×	×				×
روسازی آسفالت	×			×	×							
سنگدانه بتن		×		×	×							
سنگ گچ	×											
لجن فاضلاب	×	×										

منبع: (Bolden et al, 2013)

عایق حرارتی و ضرورت استفاده از آن

گرما از ماده با دمای بالاتر به ماده دارای دمای پایین‌تر توسط فرآیندهای هدایت، همرفت و تشعشع منتقل می‌شود. عایق حرارتی خاصیت یک ماده برای کاهش جریان یا انتقال حرارت است. خاصیت عایق حرارتی یک ماده معمولاً با هدایت گرمایی (λ) یا انتقال حرارتی (U-value) اندازه‌گیری می‌شود. هدایت گرمایی را می‌توان به‌عنوان نرخ سرعت انتقال گرما در واحد طول یک ماده در جهتی عمود بر سطح یک واحد سطح مقطع در نتیجه اختلاف دما تعریف نمود که با استفاده از واحدهای W/mK اندازه‌گیری کمّی می‌شود. انتقال حرارتی سرعتی است که در آن گرما از طریق یک متر مربع از یک ماده با اختلاف دمای ۱ درجه کلوین منتقل شده و با W/m2K نشان داده می‌شود.

مقاومت حرارتی، Rth، مواد، نسبت ضخامت واقعی (L) نمونه بر حسب متر به هدایت گرمایی (k) بر حسب W/m2°C است.

هدایت گرمایی مهمترین پارامتر برای ارزیابی مواد عایق حرارتی در نظر گرفته می‌شود. ماده‌ای با هدایت گرمایی کمتر از ۰/۰۷ W/mK را می‌توان به‌عنوان عایق حرارتی در نظر گرفت (Islam & Bhat, 2019.). همچنین مواد عایق با هدایت گرمایی زیر ۰/۰۵ W/mK از عملکرد بالایی برخوردارند (Massoudinejad et al., 2019).

عایق حرارتی بازیافتی در جداره‌ها

در حال حاضر، مواد عایق ساختمانی رایج از مواد مصنوعی از جمله الیاف شیشه، پشم معدنی و پلاستیک تولید می‌شوند (Patnaik, 2015). تخمین زده می‌شود که حدود ۶۰ درصد از مواد عایق حرارتی تولید شده در ساختمان‌ها از مواد معدنی یا غیر آلی فیبری (شیشه و پشم سنگ)، ۳۰ درصد از مواد فومی (پلی‌استایرن منبسط‌شونده، پلی‌استایرن اکسترود شده، پلی‌یورتان کمتر گسترده) و ۱۰ درصد باقی‌مانده از مواد غیر سنتی یا کامپوزیت (عایق‌های پشم-چوب، فوم-گچ و غیره) هستند. در سال ۲۰۱۱ پشم معدنی و پلاستیک ۵۲٪ و ۴۱٪ از بازار جهانی مواد عایق حرارتی را به خود اختصاص دادند. این نوع مواد به دلیل خواص تجدیدناپذیر و غیر قابل‌مصرف می‌توانند اثرات مختلفی بر محیط‌زیست داشته باشند(Asdrubali et al., 2015) . مواد مبتنی بر الیاف شیشه از منابع سیلیس به‌دست می‌آیند که اثرات سرطان‌زایی بر بدن انسان

دارند.بنابراین، استفاده از الیاف بازیافتی، طبیعی یا مصنوعی می‌تواند گزینه بهتری برای تولید مواد عایق پایدار محسوب شود. استفاده از مواد بازیافتی برای عایق‌های حرارتی قادر است به توسعه عملکرد انرژی، کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر، کاهش فشار بر محیط‌زیست و بهبود سلامت انسان‌ها و سایر موجودات زنده کمک کند (Islam & Bhat, 2019).

جدول ۲- انواع مصالح بازیافتی به‌عنوان عایق حرارتی در جداره ساختمان با اقتباس

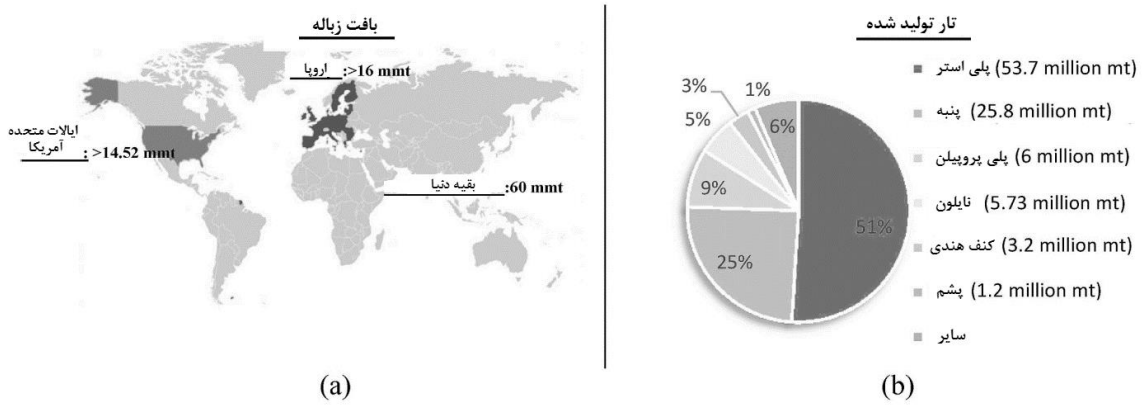
برخی از انواع مصالح بازیافتی تهیه شده از مواد زائد که به‌عنوان عایق حرارتی در جداره ساختمان تاکنون در پژوهش‌های منتشرشده مورد ارزیابی قرار گرفته اند.
بتن بازیافتی با هستهٔ ضایعات نساجی
پانل‌های مبتنی بر مقوای بازیافتی
ضایعات الیاف نساجی
ذرات ضایعات لاستیک با پایان عمر مفید که از خرد کردن مکانیکی لاستیک ساخته شده‌اند
دانه‌های زیتون که پس از جداسازی و استخراج روغن به PVC آسیاب شده و تراشه‌های چوب اضافه می‌شود (حاصل از صنایع چوب)
پانل‌های مبتنی بر الیاف PET بازیافتی از مصرف‌کنندهٔ نهایی بطری‌های پلاستیکی
الیاف پلی‌استر بازیافت شده از پلاستیک بازیافتی
فوم بازیافت شده از مواد بسته‌بندی
جاذب‌های صدای سلولزی که با استفاده از سلولز استخراج شده از کاغذ بازیافتی تولید می‌شوند
زباله‌های شیشه‌ای
پوستهٔ ذرت پس از جدایی ذرت
چوب ذرت پس از جدایی ذرت
ضایعات پشم گوسفند
ساقهٔ آفتابگردان پس از جداسازی و استخراج روغن
ورمیکولیت و پرلیت انبساط یافته
الیاف کلش پس از برداشت گندم و جو
تفالهٔ نیشکر پس از استخراج شکر
لاستیک‌های پایان عمر مفیدELT حاصل از اتومبیل
پرکننده‌های بازیافت شده از جمله خاکستر بادی و خاکستر رسوبی
سربارهٔ فولادی حاصل از کارخانهٔ تولید فولاد
پانل‌های بر پایه مقوا با مقوای بازیافت شده حاصل از بسته‌بندی
کامپوزیت پوست پیاز و الیاف پوستهٔ بادام زمینی، پرلیت، خاکستر بادی، پومیس، سیمان، باریت
پوستهٔ برنج و خاکستر آتشفشانی
باقیماندهٔ زباله‌های الاستومریک (لاستیک واره‌ای) مصرف شده در صنعت بسته‌بندی
زباله محصولات جانبی فرآوری چوب
خاک رس سبک منبسط شونده، آجرهای خرد شده و سنگدانه‌های فوم پلی استایرن و زباله‌های آن
چوب زبالهٔ ساختمانی مورد استفاده در پانل‌های خرده چوب تقویت شده با سیمان
بلوک‌های بتونی بازیافت شده و بتن سنگدانه‌ای بازیافتی

Massoudinejad et al., 2019

منسوجات بازیافتی

هر ساله میلیون‌ها تن پوشاک و منسوجات به محل دفن زباله‌ها ریخته می‌شود که باعث آلودگی جدی محیط زیست می‌شود. در ایالات متحده آمریکا حدود ۱۶میلیون تن زبالهٔ نساجی در سال ۲۰۱۴ تولید شد که از این مقدار ۱۰/۴۶ میلیون تن (به محل دفن زباله فرستاده شد (Leblance, 2018). از این رو، استفاده از منسوجات بازیافتی برای عایق‌کاری ساختمان از پتانسیل بالایی برخوردار است. استفاده از مواد بازیافتی می‌تواند به کاهش تولید الیاف از طریق استخراج یا روش کشاورزی که بالاترین میزان ردپای کربن در بخش پوشاک را داراست کمک کند و به رفع اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ناشی از دفن زباله‌های منسوجات بیانجامد(Dissanayake et al., 2018). انتقال گرما از طریق مواد الیافی به مقدار الیاف بکار رفته، هندسه بافت، تماس بین الیاف و تفاوت دما بستگی دارد. انتقال حرارت از طریق رسانش و تابش را می‌توان با افزایش ضخامت مجموعه‌های فیبری کاهش داد. تارهای ضخیم‌تر برای چگالی سطحی یکسان، مقدار بیشتری از هوا را به دام می‌اندازند و همچنین با ایجاد مسیر مارپیچی انتقال دما، جذب یا پراکندگی تابش را افزایش داده و انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. از آنجایی

که خواص عایق حرارتی مواد به تخلخل و پیچیدگی (نسبت طول منافذ باز و ضخامت) آن ماده بستگی دارد، پارچه‌های نساجی که دارای بخش عظیمی از حفره‌های به هم پیوسته هستند، به انتخاب خوبی برای تولید مواد عایق حرارتی تبدیل شده‌اند. مواد عایق الیافی تولید شده با تکنیک‌های غیر بافته دارای فضاهای خالی کوچک کافی با لایه‌های هوای محبوس شده هستند که برای جلوگیری از انتقال حرارت همرفتی مواد ایده‌آلی محسوب می‌شوند.



شکل۲- تولیدات جهانی ضایعات نساجی (a) و الیاف نساجی (b)؛ منبع: (Islam & Bhat, 2019)

مصالح ساختمانی مخلوط شده با زباله‌های نساجی

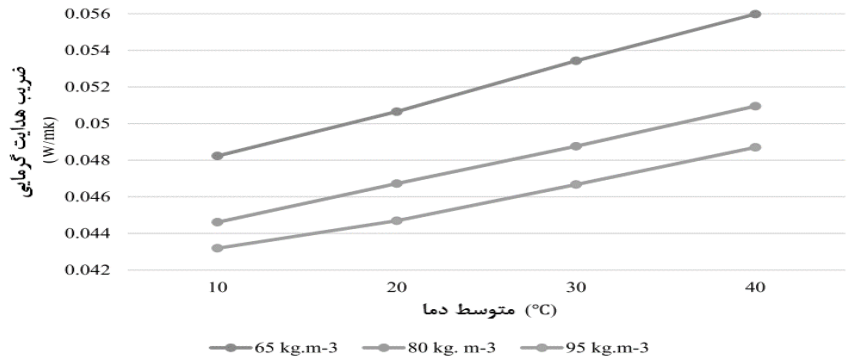
برای چندین دهه از ضایعات نساجی به همراه مصالح ساختمانی (آهک، سیمان و سایر موارد) استفاده شده است. الیاف نساجی همگنی بالاتری در عملکرد خود نسبت به الیاف مبتنی بر کشاورزی نشان می‌دهند. مشاهدات اخیر نشان می‌دهد که زباله‌های نساجی مورد استفاده در ساختارهای خشت خام و سایر شیوه‌های ساختمانی علاوه بر کاهش هدایت حرارتی، دارای مزایای دیگری از جمله مقاومت در برابر زلزله، بهبود خواص آکوستیکی مصالح و همچنین تقویت استحکام، عملکرد و دوام مصالح ساختمانی می‌باشند (Binici, 2014).

ساقه آفتابگردان، الیاف کلش و پنبه همراه با اپوکسی و چسباننده گچی

پنبه، ساقه آفتابگردان و الیاف کلش برای تولید مواد عایق حرارتی برای کاربردهای ساختمانی استفاده می‌شود. در این روش، تخته‌های عایق از طریق دو رویکرد تولید شده است؛ در یک رویکرد از گچ و در دیگری از اپوکسی به‌عنوان پیونددهنده استفاده شده است. در روش اول، مخلوط الیاف و ساقه‌های آفتابگردان بعنوان پایه انتخاب گردیده و سپس این مواد به همراه چسباننده گچی بر روی دیوارهای خشتی، بتونی و آجری استفاده می‌شود. در روش دوم، ساقه‌های آفتابگردان، زباله‌های پنبه‌ای و الیاف با یک چسباننده اپوکسی با نسبت‌های مختلف مخلوط می‌شود و به‌صورت لایه لایه تولید می‌گردد. پس از آن، برای تولید تخته‌های عایق، فشار زیادی بر روی این لایه‌ها اعمال می‌شود. در مقایسه با دیوار بدون عایق، این مواد عایق هدایت گرمایی پایین‌تر (۰/۰۷۲۸ W/mK) دارند(Binici, 2014).

الیاف پلی استر بازیافت شده از پلاستیک بازیافتی

در سال ۱۹۹۰ تولید پلی استر جهانی ۸/۶۷ میلیون متریک تن بوده است در حالیکه تولید فعلی در مقایسه با ۱۹۹۰ بیش از ۵ برابر افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۷، تولید سالانه الیاف پلی استر حدود ۵۳/۷ میلیون متریک تن بود که حدود ۵۱ درصد از تولید الیاف جهانی را شامل می‌شود. در سال ۲۰۱۷ تنها ۱۴ درصد از زباله‌های ناشی از آن بازیافت شده و مقدار زیادی از این الیاف مصنوعی به‌عنوان زباله به محل دفن زباله‌ها دور ریخته شده است. محققان متعددی در حال مطالعه رویکردهایی برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی از طریق بازیافت پلاستیک و زباله‌های پلی‌استر به مواد مختلفی از جمله مواد عایق حرارتی هستند. ضایعات حاصل از برش پلی‌استر به طور مستقیم به‌عنوان یک پوشش عایق برای سقف و دیوارهای داخلی ساختمان‌ها استفاده می‌شود. هدایت گرمایی بین ۰/۰۵۲۰ W/mK و ۰/۰۶۰۳ W/mK نمایانگر خاصیت عایق حرارتی قابل قبول این مواد می‌باشد. مواد عایق تولید شده از پلی‌استر مقاومت خوبی در برابر آتش داشته و احتمال تخریب آن در شرایط مرطوب پایین‌تر است (Trajković, 2017).



شکل ۳- تأثیر دما و چگالی حجمی بر هدایت گرمایی پلی‌استر؛ منبع: (Islam & Bhat, 2019)

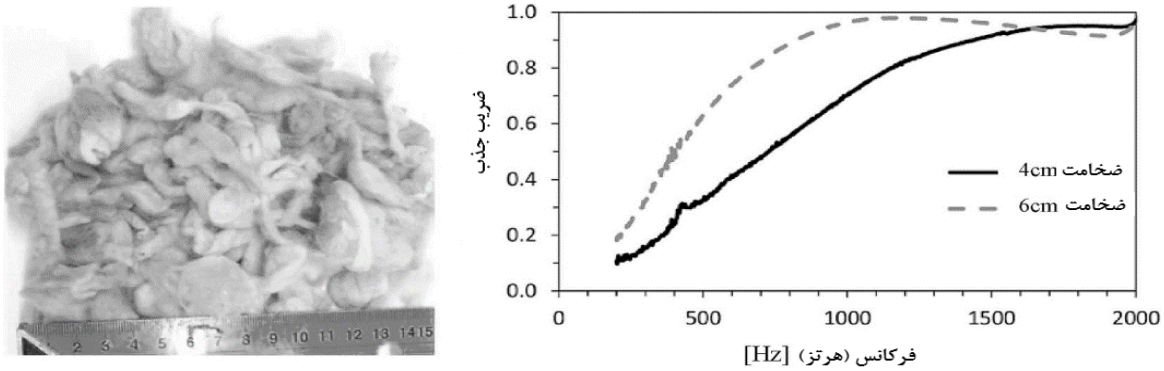
زباله‌های پلی استر مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که چگالی حجمی در هدایت گرمایی تأثیرگذار است؛ به طوری که با افزایش چگالی حجمی، هدایت گرمایی کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که در تصویر ۳ قابل مشاهده است، تأثیر دما بر خواص عایق حرارتی نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که هدایت گرمایی پلی‌استر با کاهش دما به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Drochytka, 2019).

پنبه در پانل‌های پرلیت سبک وزن و پانل‌های بتنی

پنبه یکی از فراوان‌ترین محصولات کشاورزی غیرغذایی است که در تولیدات پوشاک مورد استفاده قرار می‌گیرد(Asdrubali و همکاران ،۲۰۱۵).استفاده از زباله‌های پنبه‌ای برای تولید مواد عایق حرارتی بسیار مناسب بوده و برخی از شرکت‌ها، تولید تجاری مواد عایق متشکل از زباله پنبه را آغاز کرده‌اند.هدایت گرمایی کفپوش‌های عایق تولید شده از الیاف پلی‌استر و پنبه بازیافت شده در نسبت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته که کفپوش‌های با نسبت پنبه بالاتر، خواص عایق بهتری را نشان می‌دهند (Sedlmajer, 2015). همچنین مواد کامپوزیت سبک وزن حاصل از زباله‌های پنبه‌ای و خاکستر بادی بررسی شدند که کامپوزیت‌های حاوی مقدار بیشتری از زباله‌های پنبه‌ای هدایت گرمایی را بهتری نشان می‌دهند (Binici, 2014). پانل‌های پرلیت سبک وزن و پانل‌های بتونی برای تولید پارتیشن از مخلوط کردن زباله‌های پنبه‌ای با مصالح ساختمانی بوجود می‌آید. در این روش ضایعات متشکل از الیاف پنبه و شبکه‌های بافته شده از الیاف شیشه‌ای بکار رفته، سپس با شبکه‌های بافته شده نساجی تعبیه شده در قسمت داخلی بتن سبک وزن پرلیت محدود گشته است. تخلخل پرلیت و هسته الیاف نساجی موجب کاهش هدایت گرمایی ماده تا میزان ۰/۳ W/mK می‌شود.همچنین با ترکیب کردن الیاف پنبه، پلی‌استر و کتان بازیافت شده، مصالح عایق حرارتی تولید می‌گردد. در این روش، پنج مخلوط مختلف از نمونه‌ها از طریق ترکیب کردن الیاف پلی‌استر، کتان و پنبه و الیاف دوجزئی پلی‌استر با دمای ذوب غلاف تهیه شده و هدایت گرمایی و ویژگی‌های عایق آکوستیکی آن مورد بررسی قرار گرفت که میانگین هدایت گرمایی آن W/mk ۰۴۹/۰۳۷–۰/۰ گزارش شده است (Zach, 2012).

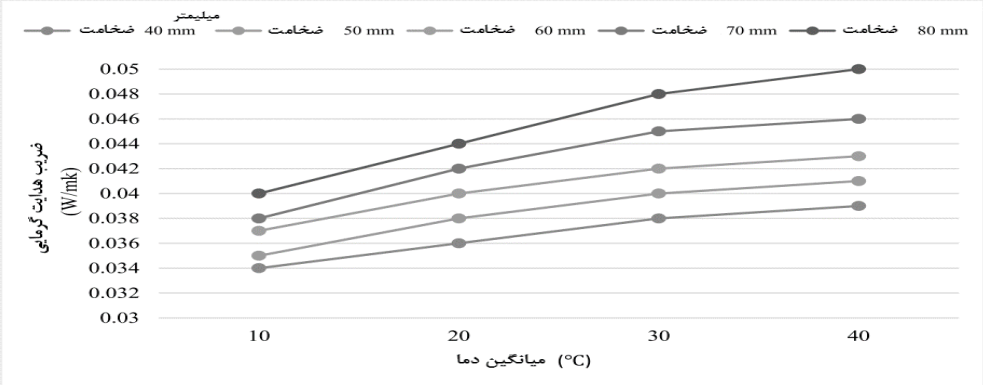
پشم زباله گوسفند

الیاف پشمی از دوران باستان به دلیل خاصیت عایق حرارتی عالی، یکی از پر کاربردترین الیاف حیوانات در جهان است. الیاف پشمی خالص در دوره چیدن موهای گوسفند حاصل می‌شود. پشم به طور کلی از از اسیدهای آمینهٔ مختلفی تشکیل شده است که زنجیره‌های طولانی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۴- ضریب جذب صوتی پشم گوسفند؛ منبع: (Islam & Bhat, 2019)

هدایت گرمایی الیاف پشم گوسفند با کاهش دما، رطوبت و چگالی و با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد (تصویر ۵). دربرخی مواقع الیاف پشم با سایر مواد چسباننده مخلوط می‌شود تا از انسجام کافی بین الیاف برای ایجاد مواد عایق حرارتی با استفاده از روش اتصال حرارتی اطمینان حاصل شود (Zach, 2012).



شکل ۶- تأثیر دما بر هدایت گرمایی در ضخامت‌های مختلف الیاف پشم منبع: (Islam & Bhat, 2019)

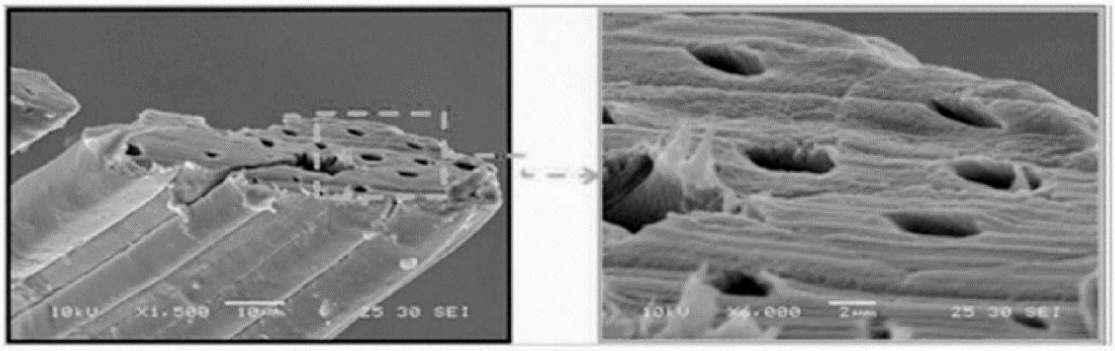
اکریلیک

اکریلیک به‌عنوان الیاف پشمی مصنوعی در نظر گرفته شده و به دلیل حجیم بودن الیاف و خاصیت الاستیک آنها، با الیاف پشم به خصوص در پوشاک بافتنی جایگزین می‌شود. مقدار هدایت گرمایی آکریلیک بسیار شبیه به برخی از مواد تجاری موجود از جمله پلی‌استایرن (EPS)، پلی‌استایرن اکسترود شده (XPS)، پشم معدنی، گرانول‌های رس و ورمیکولیت یا پرلیت گسترده است (Briga-Sá et al., 2013).این مقادیر هدایت گرمایی حاکی از ویژگی‌های قابل قبول زباله‌های اکریلیک و پشم در مقایسه با مواد عایق سنتی مانند پشم شیشه و پشم معدنی می‌باشد. هدایت گرمایی و نفوذپذیری هوا در مواد عایق غیربافته با افزایش تخلخل کاهش یافته، اما با ازدیاد چگالی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد (Islam & Bhat, 2019).مواد نساجی بازیافت شده (ضایعات ریسندگی اکریلیک) برای توسعه مصالح ساختمانی با خواص عایق حرارتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهند که چگالی، نفوذپذیری هوا و هدایت گرمایی مواد به ترتیب ۱۰/۵۸۳ kg/m3، ۱۱۰۰ Lit/m2s و ۰/۰۳۸۲۷ W/mK می‌باشد؛ از این رو می‌توانند به‌صورت یک محصول تجاری به‌عنوان مصالح عایق حرارتی رقابتی برای افزایش عملکرد حرارتی دیوارهای ساختمان مورد استفاده قرار گیرند (Alami, 2018).

کنف

کنف دومین و بزرگترین الیاف طبیعی بعد از پنبه است که عمدتاً در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود(Datta, 2004). مقدار زیادی از این الیاف کنف تبدیل به ضایعات می‌شود و به‌صورت الیاف تابیده نشده (خرد شده) در طی فرآیند تولید پارچه کنفی یا به‌صورت پارچه‌های استفاده شده، کیسه‌های کنفی و سایر محصولات نهایی به محل دفن زباله ریخته می‌شود(Islam & Bhat, 2019). الیاف کنف دارای خواص مکانیکی

بسیار خوبی در مقایسه با بسیاری از الیاف طبیعی دیگر از جمله سیسال، لیف نارگیل و رامی (ابریشم گیاهی) هستند. لیف کنف ساختار متخلخلی داشته و سوراخی در مرکز سلول لیف کنف وجود دارد و سلول دارای یک فضای خالی طولی بسته به‌صورت مجرا می‌باشد (Gassan, 2010) (شکل ۶) شکل و توزیع فضاهای خالی در الیاف کنف، وضعیت هدایت گرمایی آنها را تعیین می‌کند. از این رو، این الیاف پتانسیل بسیار خوبی برای استفاده به‌عنوان مواد عایق حرارتی کارآمد دارند و با مقدار هدایت گرمایی ۰/۰۳۶ W/mK عایق حرارتی خوبی محسوب می‌شوند (Krach & Advani, 1996).



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از یک لیف کنف؛ منبع: (Islam & Bhat, 2019)

نایلون

نایلون سنتزی یا مصنوعی از استحکام و سایر خواص مکانیکی خوبی برخوردار است. مقدار زیادی از این لیف مصنوعی به‌عنوان زباله هم در محل‌های دفن زباله و هم در آب دور ریخته شده است. ضایعات نساجی پساصنعتی لیف نایلون مخلوط با ضایعات اسپندکس (NS) و پلی یورتان (PU) برای تولید مواد عایق حرارتی بسیار مناسب است (Dissanayake, 2018). از مخلوط کردن ضایعات نساجی با فوم پلی‌یورتان در نسبت‌های مختلف فوم پلی‌یورتانی بدست می‌آید که به‌عنوان بهترین ماده عایق حرارتی در نظر گرفته می‌شود و به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و صوتی آن به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود (Islam & Bhat, 2019).

پلی‌پروپیلن

پلی‌پروپیلن یک لیف پلیمری ترموپلاستیک است که در طیف گسترده‌ای از کاربردها، به ویژه در بخش سلامت استفاده می‌شود. پلی پروپیلن سبک‌ترین الیاف بوده و به ترتیب به میزان ۳۴٪ و ۲۰٪ سبکتر از الیاف پلی‌استر و نایلون است. به دلیل وزن مخصوص پایین، این لیف بیشترین حجم را در یک وزن معین تولید کرده و حجم و پوشش خوبی را ایجاد می‌کند. این ویژگی منحصر به فرد لیف پلی‌پروپیلن به آن کمک می‌کند تا گرما را برای مدت طولانی‌تری حفظ نماید. رسانایی گرمایی لیف پلی‌پروپیلن در مقایسه با هر لیف طبیعی یا مصنوعی (سنتزی) کمترین است. در پژوهشی توسط لین و همکاران، مواد کامپوزیت عایق حرارتی مقاوم در برابر سوراخ شدن با استفاده از منسوجات کولار/ نایلون/ پلی‌استر بازیافتی بافته نشده که با الیاف غیربافته پلی‌پروپیلن بازیافتی تقویت شده تولید گردیده است(Lin et al, 2016)

جدول۲- خلاصه‌ای از خواص عایق حرارتی مواد مختلف

مواد	ضخامت t(m)	چگالی (kg/m3)	هدایت گرمایی (W/mK)	هدایت حرارتی نسبی هوا (0.026) = 1
پلی استر بازیافتی (RPET) پلی استر (۸۵٪ هدر + ۱۵٪ BICO)	۰/۰۱۶	۶۲/۵۰ ۸۰	۰/۰۳۵ (۰/۰۰۳) ۰/۰۴۶۷ – ۰/۰۴۸۶	۱/۳۵ ۱/۸۰ – ۱/۸۷
فیبر کناف با PET	۰/۰۱۰	۱۰۰	۰/۰۴۰	۱/۵۴
۱۰۰٪ پشم	۰/۰۱۰	۲۵	۰/۰۴۰	۱/۵۴
پشم گوسفند	۰/۰۴۰	۴۰	۰/۰۳۴ – ۰/۰۳۹	۱/۳۱ – ۱/۵۰
ضایعات پشم از فرش	۰/۰۳۰	۴۵	۰/۰۳۱۱ – ۰/۰۳۳۹	۱/۲۰ – ۱/۳۰
۵۰٪ پشم مغزه گیری ۵۰٪ پلی استر بازیافتی (CWP) پنبه (بازیافتی)	۰/۰۱۶	۶۲/۵۰ ۲۵–۴۵	۰/۰۳۲ (۰/۰۰۴) ۰/۰۳۹ – ۴/۰۴۴	۱/۲۳ ۱/۵۰ – ۱/۶۹

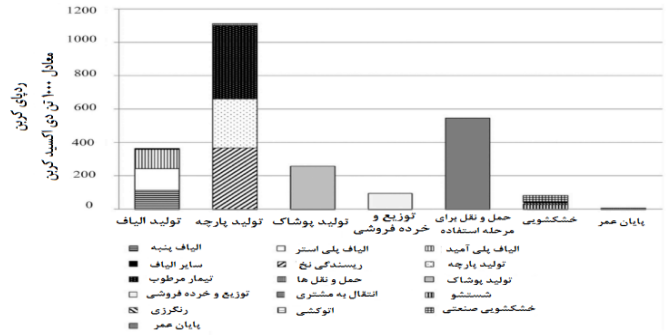
٪۴۰ COT2 ,٪۴۰ PES ,٪۲۰ BICO ساقه اسفنج/ ضایعات پنبه/ اپوکسی (۳۶. ۳۶/۳۶. ۳۶/۲۷. ۲۷) ٪۱۰۰ اکرلیک (ضایعات نخ ریسی)	۰/۰۶۷	۳۸/۹ ۱۴/۵۷۱	۰/۰۳۶۱ ۰/۰۸۷۱ ۰/۰۴۳ — ۰/۰۴۸۶	۱/۳۹ ۳/۳۵ ۱/۶۵ — ۱/۸۷
٪۶۰ نایلون/ لسپندکس (NS) _ ٪۴۰ پلی اورتان	۰/۰۱۰		۰/۰۹۵۳	۳/۶۷
جوت (٪۶۸) + (٪۲۰) + پلی اورتان (٪۱۲)	۰/۰۸۱۲	۲۶/۱	۰/۰۴۵۸–	۱/۷۶
کتان (٪۶۸) + کلاسور (٪۲۰) + پلی اورتان (٪۱۲)	۰/۷۷۴–	۳۲/۱	۰/۰۴۲۹	۱/۶۵
٪۷۵ کتان، ٪۲۵ BICO	۰/۰۸۷	۲۲/۸	۰/۰۴۹۵	۱/۹۰
کنف فنی (٪۶۴) + کلاسور (٪۲۰) + پلی اورتان (٪۱۶)	۰/۰۷۹۶	۲۹/۶	۰/۰۴۷۵	۱/۸۳
الیاف کنف + الیاف سلولزی (۶۰:۴۰) موز پلی پروپن فوم پلی اورتان الیافی(PP) پشم شیشه	۱۰	۳۰–۶۰ ۹۸۰–۱۰۴۰ ۳۰–۸۰ ۹۲/۵	۰/۰۴۶ — ۰/۰۴۷ ۰/۱۵۷ — ۰/۱۸۲ ۰/۰۲ — ۰/۰۲۷ ۰/۰۴۰	۱/۷۷ — ۱/۸۱ ۶/۰۴ — ۷/۰۰ ۰/۷۷ — ۱/۰۴ ۱/۵۴
پشم معدنی پشم سنگ فیبر شیشه		۳۶ ۸۰–۲۰۰ ۲۴–۱۱۲	۰/۰۴۰ — ۰/۰۴۵ ۰/۰۲۵ — ۰/۰۳۵ ۰/۰۳۵ — ۰/۰۳۲	۱/۵۴ — ۱/۷۳ ۰/۹۶ — ۱/۳۵ ۱/۲۳ — ۱/۳۵

منبع: (Islam & Bhat, 2019)

ارزیابی چرخهٔ حیات

ارزیابی چرخهٔ حیات (LCA) روشی سیستماتیک برای ارزیابی یا تخمین تأثیر زیست‌محیطی یک محصول در طول عمر کامل آن از تولید تا دفع است. از این رویکرد به‌عنوان رویکرد گهواره تا گور نیز یاد می‌شود (Asdrubali, 2015). برای تخمین LCA یک محصول، انتشار در هوا، آب و خاک در طول تولید، استفاده و دفع محصول ارزیابی می‌شود. پس از آن، مقدار ارزیابی شده مربوط به اثرات زیست‌محیطی احتمالی از جمله کاهش منابع، تخریب لایه ازن و گرم شدن کره زمین است. تجزیه و تحلیل کامل LCA را می‌توان با پیروی از برخی استانداردهای بین‌المللی از جمله ISO14040 (2006) و ISO14044 (2006) انجام داد.تجزیه و تحلیل LCA معمولاً توسط برخی از شرکت‌های مشاوره یا موسسات تحقیقاتی انجام می‌شود. چندین محقق اثر کشت پنبه را بر محیط زیست با روش‌های کشاورزی مرسوم و ارگانیک و تأثیر فرآیندهای مختلف رنگرزی و تکمیل بر روی محیط زیست را با استفاده از LCA ارزیابی نمودند. در این پژوهش، الیاف مختلف نساجی، پلی‌استر، نایلون، اکریلیک و پنبه مورد مطالعه قرار گرفت و اثرات مقایسه‌ای این الیاف را بر محیط زیست تعیین شد. در مورد الیاف نساجی بازیافتی، مطالعات LCA توسط تعداد محدودی از محققان انجام گرفت (Woolridge, 2006).

روس و همکاران ارزیابی چرخهٔ حیات (LCA) بخش پوشاک سوئد را برای بررسی سهم ردپای کربن (شکل ۷) در مراحل مختلف پوشاک و منسوجات از تولید الیاف تا پایان عمر مطالعه کردند. ردپای کربن برای پنبه، پلی‌استر و پلی‌آمید در مراحل مختلف تولید مشخص شد. همچنین ردپای کربن و ردپای آب منسوجات را تخمین زدند. مصرف پنبه عامل ۲/۶ درصد استفاده از آب جهانی است (Sandin, 2016).

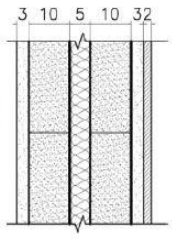


شکل ۷- ردپای کربن بخش پوشاک سوئد؛ منبع: (Islam & Bhat, 2019)

یکی از راه‌های کاهش مصرف آب، جایگزینی الیاف پنبه با پنبه بازیافتی است. در یک کارخانهٔ سوئدی با استفاده از الیاف پنبه بازیافت شده در طول یک سال، ردپای کربن و مصرف آب را به ترتیب حدود ۲/۴ × ۱۰۶ تن معادل CO_2 (دی اکسید کربن) و بیش از ۹۰۰ میلیارد لیتر آب کاهش دادند. به طور مشابه، با استفاده از پلی‌استر بازیافتی، ردپای کربن و مصرف آب را می‌توان به ترتیب حدود ۲/۳ × ۱۰۶ تن معادل CO_2 و بیش از ۱۰۰۰ میلیارد لیتر آب کاهش داد (Roos, 2016). در تحقیقی به منظور تجزیه و تحلیل LCA منسوجات ساخته شده از پنبه، پلی‌استر، نایلون، اکریلیک یا الاستین، مشخص شد اکریلیک و پلی‌استر کمترین تأثیر را بر محیط زیست داشته و پنبه بیشترین تأثیر را نشان داده است (van der Velden, 2016) وولریج و همکاران ارزیابی چرخهٔ حیات را در مراحل مختلف تولید نساجی الیاف پنبه و پلی‌استر از جمله بخش‌های الیاف، ریسندگی، بافندگی، رنگرزی و پوشاک انجام دادند. مشخص شد که با استفاده از یک تن لباس‌های پنبه‌ای و پلی‌استری بازمصرف شده، انرژی خالص ۶۴۹۵۱ kwh و ۸۹۸۱۱ kwh را می‌توان ذخیره کرد. همچنین پس از در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله استخراج منابع، ساخت مواد، تولید برق، جمع‌آوری لباس، فرایند، توزیع و دفع نهایی ضایعات، مشخص شد که با جایگزینی یک کیلوگرم پنبه خالص با یک کیلوگرم لباس دست دوم تقریباً ۶۵ kwh انرژی ذخیره می‌شود. تولید ۱ تن لباس پلی‌استر بازیافتی در مقایسه با تولید ۱ تن لباس‌های پلی‌استر از مواد اولیه، تنها به ۱/۸ درصد انرژی نیازمند است. به طور مشابه، تولید ۱ تن لباس‌های پنبه‌ای بازیافتی در مقایسه با تولید ۱ تن لباس‌های پنبه‌ای از مواد اولیه، تنها به ۲/۶ درصد انرژی نیاز دارد (Woolridge, 2006).

ارزیابی عملکرد حرارتی مصالح بازیافتی جایگزین عایق حرارتی در دیوار

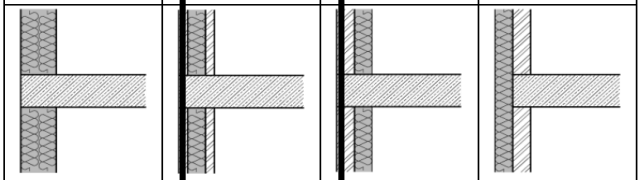
باتوجه‌به مطالعات انجام شده، در گام نهایی، عملکرد مصالح بازیافتی برگزیده به‌عنوان جایگزین عایق‌های حرارتی رایج در سیستم ساخت و ساز حال حاضر کشور مورد بررسی قرار گرفت تا پتانسیل آنها برای رقابت با عایق‌های حرارتی تجاری متداول ارزیابی شود. جهت تعمیم‌پذیری بیشتر نتایج، جزییات سازه‌ای دیوارهای متداول ساختمان‌های مسکونی شهر تهران به‌عنوان پایتخت و پرجمعیت ترین شهر کشور انتخاب شد. سیستم های ساخت و ساز متداول شهر تهران در مقاله ای توسط محمد (۱۳۹۲) مورد ارزیابی قرار گرفته است (محمد،،۱۳۹۲).طبق گفتگوهای انجام شده با کارشناسان صنعت ساخت‌وساز و مشاهدات میدانی نگارنده، یافته‌های مقاله فوق‌الذکر همچنان به‌عنوان پرتکرارین شیوه‌های ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزییات سازه‌ای دیوار متداول مورد بررسی در این مقاله در تصویر ۸ ارائه شده است.

A2 AAC*بلوک (۱۰cm): *Autoclaved aerated concrete	▪ ملات گچ و خاک(۳cm) ▪ AACبلوک(۱۰cm) ▪ فضای خالی پرشده با عایق پلی استایرن منبسط(۵cm) ▪ AACبلوک(۱۰cm) ▪ ملات ماسه سیمان(۳cm) ▪ سنگ نما(۲cm)		۰/۳۷	۳۳	

شکل ۸- جزییات سازه‌ای دیوار متداول مورد بررسی؛ منبع: (محمد،،۱۳۹۲).

باتوجه‌به تعیین مقاومت حرارتی الزامی برای پوسته ساختمان به روش تجویزی در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، حداقل مقاومت حرارتی دیوارها برای ساختمان گروه ۲ مطابق جدول۳ تعیین شده است. لازم به ذکر است ساختمان با کاربری مسکونی با زیربنای کمتر از ۲۰۰۰ مترمربع در دسته ساختمان‌های گروه ۲ طبقه‌بندی می‌شود. باتوجه‌به جزییات ارائه شده برای حدأقل مقاومت حرارتی دیوار مجاور با فضای خارج در حالت کاربرد عایق حرارتی میانی (۱,۵ kwh/m2)، ضریب انتقال حرارتی (U-Value) به میزان ۰,۶۶ ملاک عمل قرار می‌گیرد (جدول۳). برای ارزیابی قابلیت جایگزینی مصالح بازیافتی با عایق‌های حرارتی تجاری متداول، عملکرد دیوار با پنج نمونه از مصالح بازیافتی مورد مقایسه با پلی‌استایرن دیوار اولیه قرار گرفت و ضخامت مصالح مورد نیاز برای تامین انتقال حرارتی مجاز دیوار تخمین زده شد (جدول۴). نتایج محاسبات حاکی از آن است که هر پنج مورد از مصالح بازیافتی پیشنهادی با ضخامت قابل قیاس با عایق حرارتی اولیه (از ۵۷ تا ۷۶ میلیمتر) و قابل اجرا در ترکیب دیوار خارجی، قابل جایگزینی با عایق حرارتی تجاری غیربازیافتی به کار رفته در نمونه اولیه بوده و عملکرد حرارتی مشابه جزییات اجرایی استاندارد- مطابق با مقرات ملی ساختمان مبحث نوزدهم- را ارائه می‌کنند.

جدول۳-حداقل مقاومت حرارتی دیوار ساختمان گروه ۲ برحسب رده انرژی

رده انرژی	دیوار مجاور فضای خارج				دیوار مجاور فضای کنترل نشده
	عایق حرارتی خارجی	عایق حرارتی داخلی	عایق حرارتی میانی	عایق حرارتی همگن *	
					
EC	۰٫۹	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۴	۰٫۸
EC+	۱٫۳	۲٫۱	۲٫۱	۲٫۰	۱٫۱
EC++	۱٫۸	۳٫۰	۳٫۰	۲٫۸	۱٫۶

(منبع: مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان)

جدول۴-جدول مصالح بازیافتی جایگزین در دیوار برحسب ضخامت مورد نیاز

مصالح	ضخامت موردنیاز (m)	چگالی (kg/m3)	هدایت گرمایی ماده (W/mk)
پلی استر بازیافتی	۰,۰۵۷۳	۶۲,۵۰	۰,۰۳۵۰
پشم گوسفند	۰,۰۵۹۸	۴۰,۰۰	۰,۰۳۶۵
پنبه بازیافتی	۰,۰۶۵۵	۳۰,۰۰	۰,۰۴۰۰
اکرلیک(ضایعات نخ ریسی)	۰,۰۷۴۷	۱۴,۵۷	۰,۰۴۵۶
الیاف کنف + الیاف سلولزی (۶۰:۴۰)	۰,۰۷۶۲	۴۵,۰۰	۰,۰۴۶۵

(منبع: نگارنده)

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

باتوجه‌به رویکردهای محیط زیستی در صنعت ساختمان که ناشی از چالش‌های قرن بیست و یکم بوده است، تلاش برای بکارگیری مصالح بازیافتی در اجزای ساختمان مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد عایق حرارتی جداره‌های ساختمانی نیز توسط برخی مصالح بازیافتی قابل جایگزینی است. در این مقاله، مشخصات و ویژگی‌های رایج‌ترین مصالح بازیافتی که در ترکیبات ساختمانی بکار می‌روند، معرفی شده است. با مرور و مطالعه پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، آن دسته از مصالحی که قابلیت کاربرد به‌صورت عایق حرارتی در جداره‌ها را دارند، گردآوری شده و ویژگی‌های حرارتی آنها مورد مقایسه قرار گرفت .به منظور امکان‌سنجی کاربرد آنها در اجرای ساختمان‌های مسکونی شهری، بر اساس مقادیر مجاز ضریب انتقال حرارتی مقررات ملی ساختمان، عملکرد حرارتی دیوار در اثر جایگزینی پنج مورد از مصالح بازیافتی به جای لایه پلی‌استایرن دیوار در مقایسه با نمونهٔ پایه بررسی شد و نشان داد مصالح بازیافتی می‌توانند با ضخامتی معادل مصالح اولیه، ضریب انتقال حرارتی مدنظرمقررات ملی ساختمان را تأمین کرده و در عین حال ردپای کربن کمتری را ایجاد کرده و در انرژی نهاده مصرفی صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد کنند. پیش‌بینی می‌شود تحقیقات آتی این حوزه، شبیه‌سازی عملکرد حرارتی و رطوبتی طیف وسیعتری از مصالح بازیافتی را به انجام رسانده و ارجحیت کاربرد آنها را به‌عنوان جایگزین مصالح سنتزی تجاری برای حرفه‌مندان، مجریان و کاربران ساختمان عرضه نماید.

منابع

۱. اصغری، علیرضا؛ ابراهیمی اصل، حسن؛ ملکی گاوگانی، آیدا و ستاری ساربان قلی, حسن. (۱۴۰۰). ارزیابی محله پایدار شهری با ساختمان‌های صفر انرژی در محله ولی عصر تبریز. فصلنامه شهر پایدار، ۴(۲)، ۹۱-۱۰۶. Doi:10.22034/jsc.2021.259714.1364

۲. حکیمی،مجتبی.کاظمینی،محمد جواد.تاج الدینی،عباس.(۱۴۰۰). مدیریت بهینه سازی مصرف انرژی با رویکرد ساختمان انرژی صفر با استفاده از روش فازی، نشریه علمی – پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، ۸(۶)، ۲۴۱-۲۶۲. https://doi.org/10.22065/jsce.2020.199064.1932

۳. حسینی، سید شرف الدین و راد، سیمین (۱۴۰۲). بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی کامپوزیت قیر با افزودن مواد بازیافتی. دوره ۲۵ (۱)، ۳۹-۵۱. https://doi.org/10.30495/jest.2022.61619.5431

۴. دلبری، سعیده . قدمیاری ، هادی(۱۴۰۲) . سبک‌سازی ساختمان با استفاده از مصالح بازیافتی بتنی. هشتمین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی و پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا.

۵. سرتیپی پور، فرید. (۱۳۹۴). امکانسنجی بازیافت مصالح در بازسازی پس از سانحه (مورد پژوهش بازیافت بتن). فصلنامه مسکن و محیط و روستا، ۳۴ (۱۵۲)، ۳۱-۴۲.

۶. شقایق محمد. (۱۳۹۲). مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تهران. نشریه هنرهای زیبا، ۱۸ (۱)، ۶۹-۷۸. https://doi.org/10.22059/jfaup.2013.36358

7. J.H Lin ،T.T Li و ،C.W Lo. (2016) Puncture-resisting, sound-absorbing and thermal-insulating properties of polypropylene-selvages reinforced composite nonwovens. J. Ind. Text. 45, 1477–1489.

8. Asdrubali, F; D'Alessandro, F; Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustain. Mater. Technol4, 1–17.

9. Asdrubali, F; Schiavoni, S; Horoshenkov, K.V. (2012). A review of sustainable materials for acoustic applications. Build. Acoust.

10. Awwad, M., & Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. Am. J. Eng. Applied Sci.

11. Binici, H., Eken, M., Dolaz, M., Aksogan, O., & kara, m. (2014). An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. Constr. Build. Mater. 51, 24–33.

12. Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., & Fini , E. (2013). Utilization of Recycled and Waste Materials in Various Construction Applications. American Journal of Environmental Science.

13. Briga-Sa A Nascimento D Teixeira N. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. Constr. Build. Mater. 38, 155–160.

14. Datta C Basu D Roy A Banerjee A. (2004). Mechanical and dynamic mechanical studies of epoxy/VAc-EHA/HMMM IPN–jute composite systems. J. Appl. Polym. Sci. 91, 958–963.

15. Desarnaulds, V., Costanzo, E., Carvalho, A., & Arlaud, B. (2005). Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials. In: Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration. https://paginas.fe.u.

16. Dissanayake, D.G.K; Weerasinghe, D.U; Wijesinghe, K.A.P.; Kalpage, K.M.D.M.P.(۲۰۱۸) .

17. Drochytka R; Dvorakova M; Hodna J .(2017). Performance evaluation and research of alternative thermal insulation based on waste polyester fibers. . Procedia Eng. 195, 236–243.

18. Fatima, S., & Mohanty, A. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. Appl. Acoust. 72, 108–114.

19. Gassan, j; Chate, A; Bledzki, A .K; (2001). Calculation of elastic properties of natural fibers. J. Mater. Sci. 36, 3715–3720.

20. Gle, P., Gourdon, E., & Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. Appl. Acoust. 72, 249–259.

21. Gounni A El Wazna M El Alami M El Boua. (2018). Thermal performance evaluation of textile waste as an alternative solution for heat transfer reduction in buildings. . J. Sol. Energy Eng. 140, 1–6.

22. Iannace, G., Maffei, L., & Trematerra, P. (2012). On the use of “green materials” for the acoustic correction of classrooms. https://iris.unicampania.it/handle/11591./

23. Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. Journal of Environmental Management.

24. J, Sedlmajer M Zach J Hroudova (2015). Possibilities of development of thermal insulating materials based on waste textile fibers. Adv. Mater. Res. 1124, 183–188.

25. K, Aghaee M, Foroughi (2013). Construction of lightweight concrete partitions using textile waste. . In: Chong, W., Gong, J., Chang, J., Siddiqui, M. (Eds.), ICSDEC 2012.:

26. Krach, A; Advani, S.G; (1996). Influence of void shape, void volume and matrix anisotropy on effective thermal conductivity of a three-phase composite. J. Compos. Mater. 30, 933–946.

27. Leblance, R. (2018). The balance small business textile recycling facts and figures. https://www.thebalancesmb.com.

28. Massoudinejad, M. , Amanidaz, N., Santos, R. .., & Bakhshoode, R. (2019). Use of municipal, agricultural, industrial, construction and demolition waste in thermal and sound building insulation materials. a review article, Journal of Enviro.

29. Patnaik, A. ,., Mvubu, M., Muniyasamy, S., & Botha, A. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers andtheir biodegradation studies. . Energy Build. 92, 161–169.

30. Recycle, C. (2006). Asphalt roofing shingles recycling: Introduction. The California Department of Resources Recycling and Recovery.

31. RMA. (2011). U.S. scrap tire management summary. Rubber Manufacturers Association, Inc.

32. Roos, s; Zamani, B; Sandin, G; Peters, G.M; (2016). A life cycle assessment (LCA)-based approach to guiding an industry sector towards sustainability. the case of the Swedish apparel sector. J. Clean. Prod. 133, 691–700.

33. Trajković, D; Jordeva, S; Tomovska, E; Zafiro; (2017) Polyester apparel cutting waste as insulation material. J. Text. Inst. 108, 1238–1245.

34. van der Velden, N.M; Patel, M.K; Vogtlände (2014). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 331–356.

35. Wang Y (2010). Fiber and textile waste utilization. Waste Biomass Valorization 1, 135–143.

36. Woolridge, A.C; Ward, G.D; Phillips, P.S; (2006). Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material. an UK energy saving perspective.Resour. Conserv. Recycl. 46, 94–103.

37. Woolridge, A.C; Ward, G.D; Phillips, P.S; (2006). Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material:. an UK energy saving perspective.Resour. Conserv. Recycl. 46, 94–103.

38. Worrell, E., & and Reuter, M. (2014). Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts,. and Scientists, Elsevier Science, 10.

39. Zach J; Korjenic A; Petránek V; Hroudová; (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. Energy Build. 49, 246–253. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014