



A solution to improve the thermal efficiency of the exterior shell of a building using natural non-woven composite materials

Mahbube Pakdel¹, Babak Alemi^{2*}

1- M.S in Architectural Technology, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.

2- Assistant Professor, Architectural Technology Department, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.

* Tehran, Iran, alemi@kashanu.ac.ir

Received: 8 March 2022 Revised: 24 June 2022 Accepted: 21 August 2022

Abstract

Silkworm cocoons are a biological structure and a natural compound that develop over time and responds well to the environmental conditions for silkworms. Understanding the relationships of cocoon structure inspires the creation of composite structures such as low-weight, high-strength nonwoven bio composites. By means of a descriptive-analytical method and logical reasoning, in this study, in addition to introducing the cocoon structure, we try to offer materials as a non-woven bio composite, using sericin cocoon and natural fibers which for various reasons such as being light, non-polluted, abundant, and low-cost can be a suitable alternative to artificial fibers. These materials are recyclable and suitable in terms of stability and energy consumption; therefore, they can be used as thermal and moisture insulation. This function is simulated and analyzed for the hot and dry climate of Kashan city in the outer shell of the building using the Hani Bee energy analysis plugin in the Grasshopper environment. The results show that the proposed non-woven bio composite can help improve, by up to 12.7%, the thermal performance of the building and decrease the movement of heat between the inner and outer space compared to the same building without thermal insulation in its outer shell.

Keywords: Bio mimicry, Silkworm cocoon, Bio fiber composite with natural fibers, Bionic architectural materials

1. Introduction

The use of composites in architecture is in the early stages compared to their use in other industries. The reason for this is the lack of engineering standards in the building and the architects' lack of interest in using these materials. Structures that are made using natural composite materials are more compatible with the environment, which results in reducing energy consumption and carbon emissions during the production process, but the major drawback of composites with synthetic fibers is the lack of a solution for their recycling. [1] Research on eco-friendly composites made from natural fibers is important due to environmental compatibility and resource depletion concerns; Non-woven textiles are a part of these compounds that are connected without special makeup and texture and with the help of glue (matrix). One of these materials is the silkworm cocoon, which is a polymer of a single chain of silk fibers about 1,000 to 1,500 micrometers long, linked by sericin, which contains a protein that is about 75% of the weight of the cocoon and sericin, which is a water-soluble polymer. , constitutes 25% of its weight. [2-3]. Each layer of the silkworm cocoon has different mechanical behavior and proper performance against moisture, air flow, ultraviolet rays and impact. Considering the above, in this study, inspired by the two-component structure of the silkworm cocoon, a non-woven biocomposite composed of natural jute fibers and sericin is proposed due to its abundance and low thermal conductivity. The

suggested materials can perform well in the building. Among other things, it can be used as thermal insulation in the outer shell of the building. In the continuation of this research, the performance of this thermal insulation in the outer shell of the building in hot and dry weather is analyzed by the Honeybee Grasshopper plugin and the results of this simulation are evaluated.

Research questions:

1. How does the study of the structure and materials of silk cocoons and natural fibres lead to a non-woven composite model?
2. How does the proposed natural fibre nonwoven composite model help to improve performance in buildings?

2. Non-Woven natural fiber composite model

In this paper, a non-woven composite model with natural fibers and sericin cocoon grafting is proposed and its structure will be described with a main process. The use of natural fibers is possible in many regions and countries due to their good thermal properties and favorable strength, lightness, recyclability and easy access. These fibers were used in building materials in the past, and today, with increasing environmental concerns, they have been used in several studies in the preparation of biocomposites. To choose natural fibers, you should first check them according to their design needs and compare their strengths and weaknesses. In



this model, jute was considered as a natural fiber in the preparation of fibrous biocomposite due to its lower thermal conductivity than hemp and flax and the abundance of these fibers and the ability to grow in all regions. After choosing the fibers, the adhesive between the fibers is important, which leads to strength and strengthening of mechanical properties. Synthetic bonds have significant disadvantages, such as water absorption, which can reduce the useful life of composite materials, and due to the manufacturing process of composite materials, it consumes more energy. [4-6] In addition, as toxic substances, they cause side effects. [7] Therefore, sericin is a suitable alternative as a natural adhesive. In this research, sericin was considered as a binder between jute fibers to produce nonwoven biocomposites. The amount of sericin can be used up to 30 percent by volume, and the remaining 70 percent is made up of natural fibers. The manufacturing process starts with cutting the fibers to 1 cm length. Then the fibers are poured into a container and sericin solution is added to it and the solution is gently stirred to obtain a homogeneous dispersion of the fibers in the solution. After that, the prepared material is poured into a steel mold and the mixture is placed in a heat press to remove moisture and compress the fibers, to produce a compact composite panel.

3. Simulation of thermal behavior of nonwoven natural fibrous composite

To simulate the thermal behavior of a non-woven jute-sericin composite like moisture and heat insulation, a shell view of the building was first presented. This layer is located as a thermal insulation on the outside of the building wall and the outer wall of the building is considered to be on the south side of the building. Architectural details of the building shell were selected to calculate structures without load bearing and reinforcing elements. To allocate materials to the designed shell components of the building, a 22 cm solid brick was considered for the exterior wall of the building and a 3 cm plate brick was considered for the facade covering. The coefficient of thermal conductivity of brick materials is 0.9 and the coefficient of thermal conductivity of the air layer between the bio composite thermal insulation and the facade cover is 0.026, in accordance with the numbers in Section 19 of the National Building Regulations. The thermal conductivity of non-woven jute biocomposite, which is proposed as thermal insulation with a thickness of 5 cm, was calculated based on Maxwell's formula.

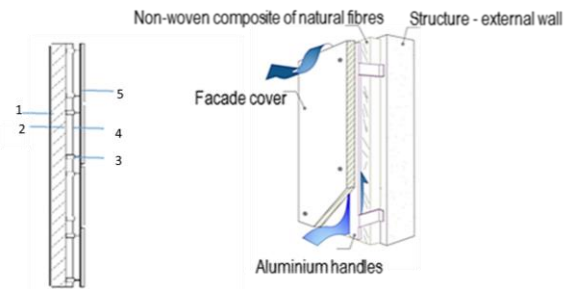


Figure 1. Left) Cross section, 1. Internal wall of 22 cm solid brick, 2. Non-woven composite of natural fibers, 3. Aluminum handles, connecting the facade covering to the inner wall, 4. Air layer, 5. Facade covering. Right) The proposed model of shell façade - Fiber composite panels with natural fibers are placed on the outer shell of the building façade as a moisture and heat retarder. There should be a space for air conditioning between the façade cover and the composite.

In this simulation, the hot and dry climatic conditions of Kashan city were considered. The climate of Kashan is hot for nine months of the year and cold only for three months of the year. For this reason, simulating and reviewing performance for the summer and warm months of the year is a priority. According to the statistics of Kashan meteorological station, August and July with an average temperature of 37 to 40 °C are the warmest months of the year and January is the coldest month of the year with an average temperature of about -2 °C. The average maximum temperature is 24.5 °C and the average minimum temperature is 11 °C. For this reason, the external temperature conditions of the building were considered in accordance with meteorological statistics and for its average temperature in the warm seasons of the year (+40) °C. By determining the boundary conditions of indoor and outdoor environments, the hypothetical temperature inside 24 (equal to thermal comfort conditions) was determined.

Thermal simulation of the outer crust in Rhino and in the Grasshopper environment and its energy analysis was performed by the Honeybee plugin. Two modes were considered for the building shell. At first, the building shell was designed as a thermal insulator in the software environment without considering jute-sericin non-woven composite materials. In the second case, the proposed materials are placed in accordance with the architectural details of "figure 3", such as insulation in the building shell and between the covering materials of the facade and the building wall. Based on the output data of this simulation process, the amount of temperature difference in materials on the outside and inside of the building as well as the amount of heat transferred along surfaces in watts per square meter in Kelvin can be obtained. By comparing the two shell states of the building, by considering the non-woven bio composite insulation of jute as thermal insulation between the inner and outer walls and without

considering that, the performance of the proposed materials in reducing heat transfer in the building can be obtained.

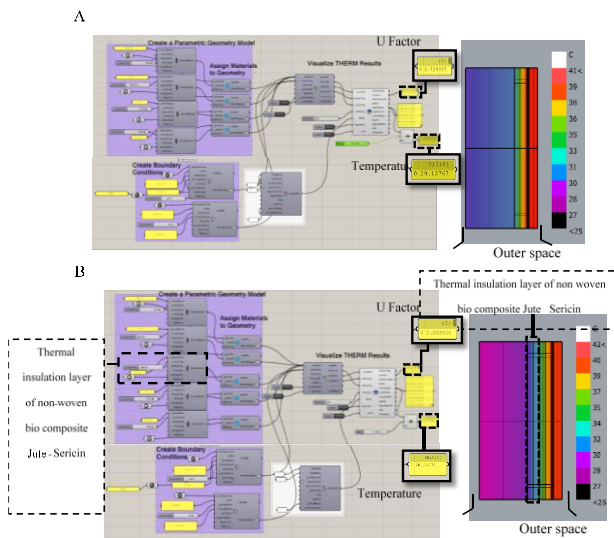


Figure 2. A) Simulation of the thermal behavior of the shell of the building without considering the thermal insulation layer of non-woven composite on the outside of the main wall of the building, left of the thermal analysis algorithm in Honeybee plugin in the hopper environment and right of the thermal analysis display, B) Simulation Thermal behavior of building shell facade by considering the layer of non-woven composite thermal insulation on the outside of the main wall of the building, the left side of the thermal analysis algorithm in the Honeybee plugin in the Grasshopper environment and the right side of the thermal analysis display.

The amount of temperature difference inside and outside the building and heat transfer of the wall surface in two modes of thermal simulation of the building shell, which was done in software, were obtained from the numerical outputs of the thermal analysis algorithm and can be seen in the table below.

Table 1. Investigation of numerical outputs from thermal simulation of building shell [Authors]

Building shell	Inner layer temperature (° C)	Outer layer temperature (° C)	Temperature difference between inside and outside layers (° C)	Heat transfer (w/m ² . °K)
A*	29.2	38.6	2.72	9.4
B**	28.2	38.8	2.28	10.6
Percentage change of temperature difference between inside and outside layers (° C)				12.7%

* First case: Building shell - inner wall and exterior

**Second case: Building shell - inner wall and exterior and bio composite layer of jute-sericin as thermal insulation between them

As shown in “figure 2” and in the table above, the temperature difference between the outside and inside of the building will be greater when the non-woven composite insulation layer of natural jute-sericin fibers is placed between the facade shell and the building wall. This means that the proposed non-woven bio composite materials can be effective in improving the thermal performance up to 1.2 ° C and also by considering the numerical rate of heat transfer in watts from the wall surface per m², the value is 2.72 for the case of non-woven composite insulation with natural fibers. Jute and 2.28 w/m². °K for the case where the shell has non-woven composite thermal insulation. Therefore, the presence of a thermal insulation layer of jute bio composite will help to increase the thermal efficiency up to 12.7% compared to when the building shell is considered without thermal insulation. According to the obtained thermal analysis and the study of numerical values in this analysis, the presence of non-woven composite with natural fibers as a thermal insulator in the outer shell has a good performance and reduces the penetration of heat into the building.

Another point about this bio-composite is its performance comparison with commonly used mineral insulations such as fiberglass, mineral wool and expanded polystyrene. The thermal conductivity of this fibrous biocomposite is slightly higher than the three thermal insulators mentioned above, and this material, as an insulator, has a slightly weaker performance than other insulators. Instead, it is made from natural ingredients. Jute can be cultivated in hot and humid climates, including Iran, and even in areas with low fertility and without pesticides and chemical fertilizers. Jute has global consumption, high production potential and diverse uses, and ranks second among plant fibers after flax. The binder of this biocomposite, i.e. silicone sericin, is also completely natural, and the use of sericin in the silkworm cocoon industry will bring economic and environmental benefits. Therefore, the biocomposite of jute-sericin non-woven fibers is a light material, resistant to moisture and heat, and has good strength against incoming loads. It is part of green materials and is economically suitable for production and use, and further study on these composites will be an important step in achieving environmental sustainability and reducing energy consumption due to their importance.

4. Conclusions

It is essential to use durable and light materials with suitable physical and mechanical properties and compatible with the environment in construction and architecture. The aim of this research is to present a proposed model for the production of fiber non-woven composite panels. Therefore, by using renewable natural raw materials such as natural fibers and using silkworm cocoons and sericin in it, the production of

non-woven biocomposite was achieved, which is environmentally friendly and cost-effective and has good performance against heat and humidity. One of the applications of this composite is thermal insulation, because the appropriate thermal performance of this composite is accompanied by favorable biological and economic benefits. After proposing the model of this composite, its thermal behavior in the external shell of the building was investigated. The results show that if this insulation is used between the external facade and the internal wall, the thermal behavior of the building will be 12.7% better than if it is not used. The behavior of this biocomposite against moisture and heat transfer makes it possible to use it as a new construction material in the direction of sustainable architecture.

5. References

- [1] M. Bechthold, and J. C. Weaver, Materials science and architecture, *Nature Reviews Materials*, Vol. 12, No.2, pp. 1-19, 2017.
- [2] F. Chen, D. Porter, and F. Vollrath, Silkworm cocoons inspire models for random fiber and particulate composites. The American Physical Society, *Physical Review*, Vol. 82, No.4, pp. 041911, 2010.
- [3] D. Gupta, A. Agrawal, and A. Rangi, Extraction and characterization of silk sericin, *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, Vol. 39, No. 4, pp. 364-372, 2014.
- [4] F. Chen, *Silk cocoons as composites Doctoral dissertation*, Oxford University, UK. , 2011.
- [5] B. Blossman-Myer, and W. W. Burggren, The silk cocoon of the silkworm, *Bombyx mori*: Macro structure and its influence on Tran's mural diffusion of oxygen and water vapor, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, Vol. 155, No. 2, pp.259-263, 2010.
- [6] H. W. Kwak, J. Eom, S. Y. Cho, M. E. Lee, and H.-J. Jin, High-toughness natural polymer nonwoven preforms inspired by silkworm cocoon structure, *International journal of biological macromolecules*, Vol.127, pp. 146-152, 2019.
- [7] A. Korjenic, J. Zach, and J. Hroudová, The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions, *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 45-58, 2016.

بهبود کارایی حرارتی پوسته خارجی ساختمان با استفاده از مصالح کامپوزیت بی بافت طبیعی

محبوبه پاکدل^۱، بابک عالمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری معماری، گروه تکنولوژی معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- استادیار، گروه تکنولوژی معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

* تهران، ایران، alemi@kashanu.ac.ir

چکیده

امروزه، ارتباط علم بیومیمیکری با رشته‌های مختلف از جمله معماری گسترش یافته است. بررسی الگوها، سامانه‌ها و عناصر زیستی، راهکاری جهت ایجاد راه‌حل برای رفع مشکلات زندگی انسان‌هاست. پيله کرم ابریشم ساختاری زیستی دارد و کامپوزیتی طبیعی است که در طول زمان تکامل یافته و پاسخگوی مناسبی در برابر شرایط زیست‌محیطی برای کرم ابریشم است، خواص فیزیکی و مکانیکی بالایی در برابر تنش‌ها و عملکردی مناسب به‌عنوان عایق در برابر شرایط دمایی محیط دارد. درک روابط ساختار پيله کرم ابریشم، الهام‌بخش ایجاد ساختارهای کامپوزیتی از جمله بیوکامپوزیت‌هایی بی‌بافت با وزن کم و مقاومت بالا است. در پژوهش حاضر، با روش تحلیلی-توصیفی و استدلال منطقی تلاش می‌شود ضمن معرفی ساختار پيله کرم ابریشم، با بهره‌گیری از سربسین پيله ابریشم و الیاف طبیعی که به دلایل مختلف از جمله سبکی، عدم آلودگی، فراوانی و کم‌هزینه بودن، می‌تواند جایگزینی مناسب برای الیاف مصنوع باشد، مصالحی به‌عنوان یک بیوکامپوزیت بی‌بافت، پیشنهاد گردد. این مصالح خاصیت بازبافت‌پذیری دارد و از منظر پایداری و مصرف انرژی مناسب است و می‌تواند به‌عنوان عایق رطوبتی و حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. این عملکرد در پوسته خارجی ساختمان و با استفاده از پلاگین تحلیل انرژی هانی بی و در محیط گرس‌هاپر، برای اقلیم گرم و خشک شهر کاشان، شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که کامپوزیت بی‌بافت از الیاف طبیعی پیشنهاد شده می‌تواند تا ۱۲.۷ درصد به بهبود عملکرد حرارتی و کاهش انتقال حرارت بین فضای بیرون و درون ساختمان نسبت به زمانی که پوسته ساختمان بدون عایق حرارتی در نظر گرفته شود، کمک کند.

کلیدواژه‌گان: بیومیمیکری، پيله کرم ابریشم، کامپوزیت بی‌بافت با الیاف طبیعی، مصالح معماری بیایونیک

A solution to improve the thermal efficiency of the exterior shell of a building using natural non-woven composite materials

Mahbube Pakdel¹, Babak Alemi^{2*}

1- M.S in Architectural Technology, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.

2- Assistant Professor, Architectural Technology Department, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran.

* Tehran, Iran, alemi@kashanu.ac.ir

Received: 8 March 2022 Accepted: 21 August 2022

Abstract

Nowadays, the relationship between bio mimicry science and various fields including extended architecture and the study of patterns, systems, and biological elements, is a way to create solutions to the problems of human life. Silkworm cocoon is a biological structure and a natural composite that has evolved during the time and is a good response to environmental conditions for silkworm and has high physical and mechanical properties against stress and has a good function as an insulator against ambient temperature conditions. Understanding the structure relationships of silkworm cocoons inspires how to create composite structures, including non-woven, lightweight, and high-strength composites. In this study, the descriptive-analytical method and logical reasoning method attempt to introduce the structure of silk cocoon, using sericin cocoon and natural fibers, which for various reasons such as lightness, non-pollution, abundance, and low-cost, can be a suitable alternative to artificial fibers, offer materials as a non-woven bio composite. These materials, which have recyclable properties and are suitable in terms of energy consumption, can be used as moisture and heat insulation. This performance was simulated and analyzed in the outer shell of the building and using the Hani Bee energy analysis plugin in the Grasshopper for the hot and dry climate of Kashan. The results show that the proposed non-woven composite of natural fibers can help to improve the thermal performance and reduce the heat

transfer between the outside and inside of the building by up to 12.7% compared to when the building shell is considered without thermal insulation.

Keywords: Bio mimicry, Silkworm cocoon, Bio fiber composite with natural fibers, Bionic architectural materials

داشته باشد. این کاربردها شامل تقویت سازه، ایجاد عایق رطوبتی، ایجاد دیواره سبک، سیستم‌های پوششی کف و سقف، پارتیشن‌بندی و عایق حرارتی در پوسته ساختمان است و استفاده از آن می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در بنا کمک کند. سپس کارکرد آن به‌عنوان عایق حرارتی در پوسته‌ی خارجی ساختمان در اقلیم گرم و خشک توسط پلاگین‌هایی بی^۵ در گرس‌هایپر^۶، مورد تحلیل قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی بررسی می‌شود. سؤالات پژوهش:

۱. بررسی ساختار و مصالح پيله ابریشم و الیاف طبیعی چگونه منجر به مدل کامپوزیت بی‌بافت می‌شود؟
۲. مدل کامپوزیت بی‌بافت الیاف طبیعی پیشنهاد شده، چگونه به بهبود کارایی در ساختمان‌ها کمک می‌کند؟

۲- پیشینه تحقیق

در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰، دانشمندان مواد با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مثل اس ای ام^۷، دی ام تی ای^۸ و غیره به استفاده از پيله کرم ابریشم به‌عنوان مدل‌هایی برای کامپوزیت‌های زیستی پرداختند. چن^۹ در سال ۲۰۱۰ با مطالعه گسترده‌ای از انواع پيله‌ها به بررسی جنبه‌های مهندسی آن‌ها به‌عنوان یک سیستم ترکیبی زیستی می‌پردازد و مدلی کمی را پیشنهاد می‌دهد که به‌طور مستقیم ساختار پيله را به خصوصیات مکانیکی آن پیوند می‌زند و می‌تواند برای سایر کامپوزیت‌ها در مقیاس‌های متفاوت نیز به-کار گرفته شود [۴]. مایر^{۱۰} در سال ۲۰۱۰ نیز در مطالعات خود پيله کرم ابریشم را به‌عنوان یک ساختار ناهمگن فیبری از نظر قطر و چگالی معرفی می‌کند و بر این باور است که پيله، با وجود این ساختار پیچیده، سطح رطوبت و تبادل اکسیژن با محیط بیرون را حفظ می‌کند [۵]. در پژوهشی در سال ۲۰۱۹ مدل کامپوزیت بی‌بافت الیاف طبیعی با توجه به ساختار پيله کرم ابریشم، با استفاده از الیاف طبیعی جوت و سریشین پيله کرم ابریشم ساخته و پس از آن، تأثیر محتوای اتصال‌دهنده سریشین بر مشخصات و خصوصیات فیزیکی کامپوزیت بی‌بافت مورد آزمایش قرار گرفته است [۶]. کورجنیک^{۱۱} و همکارانش، مواد بیوکامپوزیتی الیاف طبیعی را به‌عنوان عایق حرارتی در ترکیب با نمای گیاهی در ساختمان‌سازی مورد بررسی قرار دادند و استفاده از این مصالح را محیط زیستی و مؤثر در کاهش انرژی و گرما می‌دانند [۷]. خداری^{۱۲} و همکاران نیز در پژوهش خود کامپوزیتی ساختمانی با کاربری دیوار و سقف، متشکل از الیاف طبیعی و سیمان و شن پیشنهاد می‌دهند که بسیار سبک است و ضریب هدایت کمی دارد [۸].

شناخت بیوکامپوزیت‌ها و خواص آن‌ها می‌تواند مسیری نو در طراحی معماری باشد، زیرا مصالح ساختمانی به‌عنوان عنصری سازنده بر شکل و نحوه عملکرد ساختمان‌ها به‌خصوص از منظر پایداری و انرژی تأثیر می‌گذارد و

۱- مقدمه

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها در معماری و ساختمان در مقایسه با کاربرد گسترده آن‌ها در صنایع خودروسازی، دریایی و هوافضا در مراحل ابتدایی است. این امر تا حد زیادی ناشی از کمبود استانداردهای عمومی مهندسی برای ساختمان‌ها یا مصالح ساخته‌شده از مواد مرکب و عدم توجه برخی از معماران به استفاده از مواد نوین در طراحی است. از منظر پایداری، ساختارهای ایجادشده با مصالح کامپوزیتی، برای دستیابی به عملکرد مناسب، به مواد کمی در مقایسه با ساختارهای مشابه خود نیاز دارند که منجر به کاهش هم‌زمان مصرف انرژی و انتشار کربن در طول فرآیند تولید می‌شود. پیشرفت در علم تهیه مواد کامپوزیت، بینش جدیدی در مورد خصوصیات و کاربرد آن‌ها در زمینه‌ی ساختمان ارائه می‌دهد. بزرگ‌ترین اشکال کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف مصنوعی، عدم وجود راه‌حل برای بازیافت آن‌ها است و از بین بردن آن‌ها صرفاً از طریق دفن کردن یا سوزاندن امکان‌پذیر است [۱].

از آنجا که علاقه به مواد سازگار با محیط‌زیست و نگرانی‌های مربوط به کاهش منابع افزایش یافته‌است، تحقیقات در مورد بیوکامپوزیت‌های پایدار محیطی و ساخته‌شده از الیاف طبیعی اهمیت زیادی دارد و کامپوزیت‌های بی‌بافت^۱ نیز جزئی از این بیوکامپوزیت‌ها هستند. کامپوزیت‌های بی‌بافت از الیاف‌های تشکیل‌شده‌اند که بدون نظم و بافت خاصی کنار یکدیگر قرار گرفتند و با استفاده از ماده‌ی اتصال‌دهنده (ماتریس) با روش‌های شیمیایی یا مکانیکی یا حرارتی به یکدیگر پیوند می‌خورند. از مصادیق این دسته از کامپوزیت‌ها در طبیعت می‌توان به پيله کرم ابریشم اشاره کرد. پيله ابریشمی به‌عنوان یک کامپوزیت پلیمری از یک‌رشته الیاف ابریشم پیوسته، با طولی در حدود ۱۰۰۰-۱۵۰۰ متر، پیوند خورده توسط ماده سریشین و دارای ریزساختارهای متخلخل با سلسله مراتبی خاص و به‌صورت چندلایه است. پروتئین شکل‌دهنده الیاف، بانام فیبروئین^۲ دارای ساختار نیمه کریستالی و در حدود ۷۵ درصد وزن پيله و سریشین^۳ نیز یک پلیمر پروتئین آمورف و محلول در آب است که ۲۵ درصد وزنی را تشکیل می‌دهد [۲،۳]. هر یک از لایه‌های سازنده پيله کرم ابریشم، رفتار مکانیکی متفاوتی دارند و در نهایت منجر به ایجاد ساختار لایه‌ای غیرمنظم بی‌بافت پيله می‌شوند که عملکرد مناسبی در برابر رطوبت، جریان هوا، اشعه فرابنفش خورشید و ضربه دارند و دارای درجه خاصی از حائل حرارتی و قادر به ذخیره گرما است.

با در نظر گرفتن موارد بیان‌شده، در این پژوهش سعی شده، با الهام از ساختار دوجزئی و منحصربه‌فرد پيله کرم ابریشم، فرآیند تولید بیوکامپوزیتی بی‌بافت متشکل از الیاف طبیعی جوت^۴ به دلیل فراوانی و ضریب هدایت حرارتی پایین و سریشین (ماده طبیعی و اتصال‌دهنده الیاف ابریشم در پيله)، پیشنهاد شود. مصالح پیشنهادی می‌تواند کارکردهای مناسبی در ساختمان

5.Honey bee
6.Grasshopper
7.SEM (Scanning electron microscope)
8.DMTA
9.Chen
10.Myer
11.Korjenic
12.Khedari

1.Nonwoven
2.Fibroin
3.Sericin
4.Jute

جوت، نوعی گیاه طویل، نرم و برآق است که می‌تواند به صورت نخ مستحکم درآید. این گیاه به صورت سالانه کاشت و برداشت می‌شود و در آب و هوای گرم و مرطوب رشد می‌یابد.

برمی‌گردد و در صورت بازیافت، مزیت‌های تجاری، اقتصادی و محیط زیستی قابل توجهی را به همراه خواهد داشت [۱۳-۱۵، ۳].

۴- مدل کامپوزیت فیبری طبیعی بی بافت

در این پژوهش، مدلی از یک کامپوزیت بی‌بافت با الیاف طبیعی و ماده اتصال‌دهنده سرسین پیله ابریشمی پیشنهاد می‌گردد که ساختار آن، بر اساس روندی پیشرو شرح داده خواهد شد. استفاده از الیاف طبیعی به دلیل خواص مناسب حرارتی و مقاومت مطلوب، سبکی، قابلیت بازیافت و دسترسی آسان به آن در بسیاری از مناطق و کشورها است. استفاده از این الیاف از گذشته در ساخت مصالح ساختمانی کاربرد داشته و امروزه نیز، با افزایش نگرانی‌های مربوط به زیست محیطی، در پژوهش‌های بسیاری در تهیه بیوکامپوزیت‌ها به کار گرفته شده است. برای شناخت و انتخاب الیاف طبیعی لازم است ابتدا، بر اساس نیازهای طراحی آن‌ها را مورد بررسی قرار داده و نقاط ضعف و قوتشان را با یکدیگر مقایسه کنیم. جدول ۱ ویژگی‌های برخی از فیبرهای طبیعی مورد استفاده در مصالح آورده شده است.

جدول ۱ مقایسه ویژگی‌های فیبرهای طبیعی با یکدیگر به‌عنوان فیبرهای مورد استفاده در کامپوزیت فیبری نیافته

الیاف	چگالی (گرم بر سانتی‌مترمربع)	مدول یانگ (یگا پاسکال)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	جذب رطوبت (درصد)	ازدواج طول در نقطه شکست (درصد طولی)	هدایت حرارتی* (وات بر متر در کلوین)	مقاومت متوسط الیاف (میکرو هلتن)
جوت ۲ [۷، ۱۶، ۱۷]	۱۴-۱۳	۲۴۵	۴۰۰-۸۰۰	۹۳	۱۸-۱۵	۰۰۰۵۸۰	۹۴۲
کتان [۷، ۱۷]	۱۵	۲۷۶-۴۶۹	۳۰۰-۱۰۰۰	-	۲۷-۳۲	۰۰۰۵۵۰	۱۱۱۱
کنف [۷، ۱۸]	۱۴	-	۵۵۰-۹۰۰	۱۳	-	۰۰۰۶۳۰	۱۵۵۲
سیزال ۳ [۱۶، ۱۷]	۱۵	۹۴-۱۲	۳۰۰-۶۰۰	۱۱۰	۲-۲۵	-	-
کویر ۴ [۷، ۱۸]	۱۱	۲-۶	۹۵-۱۰	>	۶۷	-	-

(*) در شرایط دمایی ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد

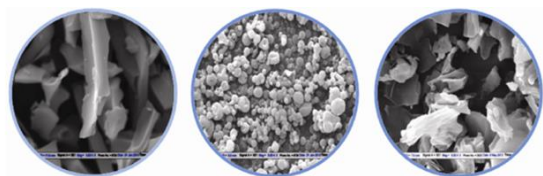
با توجه به جدول بالا و مقایسه الیاف طبیعی ذکر شده در آن، می‌توان دریافت که الیاف جوت معمولاً در برابر پوسیدگی و گرما به‌خوبی مقاومت می‌کند و از مقاومت کششی بالایی بعد از الیاف کتان و کنف برخوردار است. الیاف کویر از تمامی الیاف‌ها چگالی و جذب رطوبت کمتری دارد و می‌تواند تا مدتی طولانی روی آب شناور بماند. از تمامی این الیاف امروزه به‌عنوان پرکننده یا تقویت‌کننده مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود و می‌توانند جایگزینی مناسب برای الیاف مصنوعی باشند. در این مدل جوت به‌عنوان الیاف طبیعی به دلیل ضریب هدایت حرارتی کمتر نسبت به کنف و کتان و فراوانی این الیاف و قابلیت کشت در تمامی مناطق، در تهیه بیوکامپوزیت

یکی از مهم‌ترین موضوعات بررسی شده در منابع که می‌تواند کاربرد این مصالح را در ساختمان مهیا کند، ساختار آن به‌عنوان کامپوزیتی بیولوژیکی است که عایق حرارتی و رطوبتی است.

۳- صنعت پرورش ابریشم (نوغداری) و پیله ابریشم

صنعت پرورش ابریشم، از گذشته به دلیل تجارت ابریشم با اروپا و چین از طریق مسیر جاده ابریشم، در بسیاری از شهرهای ایران رواج داشته و کشور ما از جمله کشورهای دارای شهرت جهانی در زمینه تولید پیله و ابریشم بوده است. از مراکز مهم پرورش ابریشم می‌توان به گیلان، مازندران، یزد، کرمان، اصفهان و کاشان اشاره نمود. امروزه نیز امکان پرورش پیله ابریشم، در کنار باغداری و کشاورزی در بسیاری از روستاهای ایران از جمله کاشان، صنعتی پرسود محسوب می‌شود. حداقل فضای مورد نیاز برای پرورش پیله ابریشم، نیاز به سرمایه و امکانات اولیه کم، بازدهی سریع و بالا در تولید از جمله مزیت‌های منحصر به فرد این صنعت به شمار می‌رود.

پیله ابریشم دارای ساختاری لایه‌لایه، بدون بافت و از دو جز سازنده پروتئینی، سرسین و الیاف ابریشم (فیبروئین) است. ماده‌ی سرسین یک‌چهارم وزن کل پیله را تشکیل می‌دهد و مقدارش از لایه‌های بیرونی به سمت لایه‌های درونی کاهش یافته و در نهایت منجر به شکل‌گیری یک شبکه بسیار پیوند یافته از الیاف می‌شود. ساختار متخلخل پیله و خاصیت آئرو دینامیکی آن در سرعت جریان هوا تأثیر می‌گذارد. سرعت هوا در شکاف‌های کوچک‌تر دیواره‌ی پیله بیشتر و در نزدیکی سطح الیاف ابریشم، به دلیل خاصیت چسبندگی سرسین، بسیار کندتر است. علاوه بر این، تعدادی از خطوط جریان هوا در دیواره پیله، به دلیل از دست دادن انرژی جنبشی ناشی از اصطکاک بین الیاف ابریشم و هوا و ایجاد آشفته‌گی هوا از طریق پیله پایان می‌یابد. پیله‌های گرم‌ابریشم در برابر تغییر دما در محیط مقاوم‌اند و نوسانات دما در داخل پیله، در صورت تغییر درجه حرارت در محیط اطراف، پایین است. پیله ابریشم لایه‌ی محافظ یووی^۱ را برای شفیبه گرم فراهم می‌کند که سرسین مسئول جذب آن است [۹-۱۲]. شکل ۱، نمونه‌های سرسین با بزرگنمایی پنج هزار برابر نشان داده شده است.



شکل ۱ تصاویر اس‌ای‌ام از نمونه‌های سرسین (بزرگنمایی ۵ × هزار برابر)، به ترتیب از چپ به راست: نمونه استاندارد، نمونه خشک‌شده با اسپری، نمونه خشک‌شده با یخ [۳].

سرسین هم‌چنین دارای ویژگی‌های بیولوژیکی مهمی مانند مقاومت در برابر خوردگی، ضد فعالیت میکروبی (آنتی‌بیوتیک)، جذب آسان رطوبت و غیره است و به‌عنوان ماده‌ای سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر شناخته می‌شود. در صنعت نساجی، سرسین از محصولات جانبی تولید الیاف ابریشم محسوب شده و همواره در کارهای تحقیقاتی زیادی، به دنبال کاربردهای جدیدی از این پروتئین هستند. به دلیل آمورف بودن، این ماده به‌راحتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آب حل می‌شود و با خنک شدن دوباره به حالت ژل

2.Jute
3.Sisal
4.Coir

1.UV

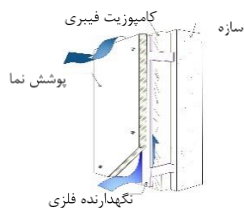
جدول ۲ مزیت‌های استفاده از کامپوزیت‌های بی بافت فیبری

مزایای مصالح بیونیک نوین (کامپوزیت بی بافت الیاف طبیعی)	
ایجاد کارایی بالا	پایداری در محیط‌های مرطوب
امکان بازیافت	سبک‌سازی سازه‌ها
پیوند مصالح و سازه	مقاومت فیزیکی مطلوب
انعطاف‌پذیری و امکان پیش ساختگی	عدم آسیب به محیط‌زیست
حل بخشی از عملکرد (با توجه به نوع کاربرد)	اقتصادی بودن (رسیدن به حداقل در مصالح و انرژی)

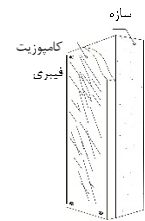
در جدول ۳، با توجه به ویژگی‌های مطرح‌شده برای مصالح فیبری کامپوزیتی بی بافت، شش طراحی پیشنهادی برای کاربرد استفاده از آن‌ها در ساختمان آورده شده است.

جدول ۳ کاربردهای پیشنهادی کامپوزیت بی بافت نوین در معماری

کاربردهای پیشنهادی ماده بیونیک نوین در معماری	نمایش کاربرد پیشنهادی ماده بیوکامپوزیتی نوین در معماری
---	--

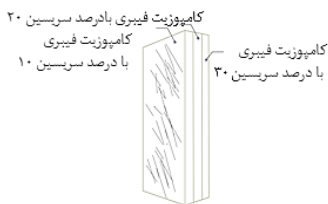


۱. نمای دوپوسته (به‌عنوان عایق رطوبت و حرارت)

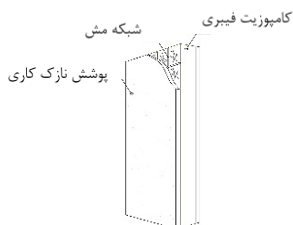


۲. پوشش تقویت رطوبتی سازه

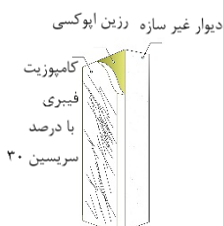
۳. مصالح نوین جایگزین چوب - پارتیشن‌بندی



۴. تولید کامپوزیت فیبری لایه‌ای



۵. کامپوزیت به‌عنوان سازه دیوارهای سبک و عایق



۶. پوشش تقویتی دیوار غیر باربر

فیبری در نظر گرفته شد. پس از انتخاب الیاف، باید ماده‌ای به‌عنوان اتصال‌دهنده بین الیاف در نظر گرفت، زیرا در کامپوزیت فیبری طبیعی با ساختار متخلخل بدون بافت، اتصال‌دهنده بین الیاف است که منجر به شکل‌گیری استحکام و تقویت ویژگی‌های مکانیکی خواهد شد.

طبق پژوهش‌ها، اتصال‌دهنده‌های مصنوعی مبتنی بر فرمالدئید معایب مهمی مانند جذب آب دارند که می‌تواند به‌شدت عمر ماده کامپوزیت را کاهش دهد و انرژی بیشتری به دلیل دمای فرآیند موردنیاز برای پلیمریزاسیون اتصال‌دهنده مصنوعی مصرف می‌شود [۱۹-۲۱]. علاوه بر این، اتصال‌دهنده‌های شیمیایی مبتنی بر فرمالدئید به‌عنوان مواد سمی، می‌توانند عوارض جانبی ایجاد کنند [۲۲].

با توجه به این موضوع و بر اساس تأثیر سربسین بر پیله کرم ابریشم به‌عنوان اتصال‌دهنده طبیعی، می‌توان از آن به‌عنوان جایگزین مناسب برای اتصال‌دهنده‌های مصنوعی در تولید کامپوزیت‌های الیاف طبیعی استفاده کرد. در این پژوهش، سربسین به‌عنوان اتصال‌دهنده بین الیاف انتخابی جوت برای تولید مصالح بیوکامپوزیت بی بافت در نظر گرفته شد. مقدار سربسین با توجه به میزان آن در پیله کرم ابریشم، در ساخت بیوکامپوزیت فیبری طبیعی می‌تواند تا ۳۰ درصد حجمی به کار رود و مابقی آن را باید الیاف طبیعی تشکیل دهد. فرآیند تولید مصالح پیشنهادی که باید در کارگاه انجام گیرد و به‌صورت پیش‌ساخته امکان‌پذیر است، با برش الیاف جوت به طول‌های ۱ سانتی‌متر آغاز می‌شود. الیاف طبیعی در ظرفی ریخته شده و پس از آن محلول سربسین به آن اضافه می‌شود. در ادامه باید محلول به آرامی هم زده شود تا پراکندگی همگن الیاف در محلول حاصل شود. پس از آن ماده تهیه‌شده در قالب فلزی مطابق با اندازه‌های استاندارد موردنظر ریخته می‌شود. برای حذف رطوبت، ایجاد فشردگی بین الیاف و تولید محصول نهایی باید مخلوط داخل دستگاه پرس داغ قرار داده شود و پنل کامپوزیتی تحت فشار و دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ده دقیقه تولید شود. شکل ۲، این فرآیند قابل مشاهده است.



شکل ۲ روش تولید کامپوزیت نفاخته الیاف طبیعی و سربسین

۵- کاربردهای پیشنهادی برای ماده کامپوزیت بی بافت در معماری

قدرت جذب آب کم، حفظ مقاومت در محیط‌های مرطوب، استحکام و قدرت باربری، سبک بودن، دوستانه محیط‌زیست و عدم آلودگی محیطی، از جمله مزایایی است که می‌توان برای کامپوزیت بی بافت الیاف طبیعی پیشنهادی نام برد. به همین منظور، در نظر گرفته می‌شود که این مصالح نوین بیونیک برای استفاده در پوسته‌ی خارجی ساختمانی، سیستم‌های کف یا سقف، بام سبز، پارتیشن‌بندی، سقف کاذب، ایجاد دیوارهایی سبک و عایق در فضاهای مرطوب، سبک‌سازی، سیستم‌های تهویه و خنک‌سازی مناسب خواهد بود.

جدول ۲، برخی مزایای استفاده از بیوکامپوزیت‌های طبیعی آورده شده است.

خارجی نما ساختمان قرار می‌گیرند، بین پوشش نما و کامپوزیت باید فضای خالی برای تهویه هوا در نظر گرفته شود.

در شکل ۳، شماتیک نمای دوپوسته پیشنهادی همراه با اجزای آن و در جدول ۴، مشخصات مصالح به‌کاررفته در طراحی این نما به ترتیب قرارگیری از جداره‌ی داخلی به بیرونی آورده شده است.

جدول ۴ مصالح به‌کاررفته در طراحی نمای دوپوسته

لایه از جداره داخلی به خارجی	مصالح	ضخامت (برحسب سانتی‌متر)	هدایت حرارتی (وات بر متر در کلونین) در شرایط دمایی ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد
۱	آجر	۲۲	۰.۹
۲	بیوکامپوزیت بی‌بافت جوت	۵	۰.۰۷
۳	آلومینیوم (دستک‌نگه‌دارنده)	-	۲۳.۰
۴	هوا	۵	۰.۰۲۶
۵	آجر	۳	۰.۹

در این شبیه‌سازی، شرایط اقلیمی گرم و خشک شهر کاشان در نظر گرفته شده است. آب و هوای شهر کاشان درنه ماه از سال گرم و فقط سه ماه از سال سرد است. به همین منظور، شبیه‌سازی و بررسی عملکرد برای فصول تابستان و ماه‌های گرم سال در اولویت قرار گرفته است. طبق آمار ایستگاه هواشناسی شهر کاشان، مرداد و تیرماه با متوسط دمای ۳۷ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، گرم‌ترین ماه‌های سال و دی‌ماه سردترین ماه سال با میانگین دمایی حدوداً ۲- درجه سانتی‌گراد است. میانگین حداکثر دمای هوا ۲۴.۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل دمای آن ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. به همین دلیل شرایط دمایی خارجی بنا مطابق با آمار هواشناسی و برای متوسط دمایی آن در فصول گرم سال (+۴۰) درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. با تعیین شرایط مرزی محیط درون و بیرون مقدار دمای فرضی در داخل ۲۴ (برابر شرایط آسایش حرارتی) مشخص گردید.

شبیه‌سازی حرارتی پوسته‌ی خارجی در راینو و در محیط گرس‌هاپر بوده و تحلیل انرژی آن توسط پلاگین هانی‌پی انجام شده است. دو حالت برای پوسته ساختمانی در نظر گرفته شد، در ابتدا پوسته ساختمان بدون در نظر گرفتن مصالح کامپوزیتی بی‌بافت جوت-سریسین به‌عنوان عایق حرارتی در محیط نرم‌افزار طراحی شد.

در حالت دوم مصالح پیشنهادی مطابق با جزئیات معماری شکل ۳ به‌عنوان عایق در پوسته ساختمان و بین مصالح پوشش نما و دیوار بنا قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی پوسته‌های ذکر شده در شکل ۴ قابل مشاهده است. بر اساس داده‌های خروجی از این فرآیند شبیه‌سازی می‌توان میزان تفاوت دما در مصالح در سمت خارجی و داخلی ساختمان و همچنین میزان انتقال حرارت از طریق سطوح برحسب وات بر مترمربع در کلونین را به دست آورد. با مقایسه بین دو حالت پوسته ساختمان با در نظر گرفتن عایق بیوکامپوزیت بی‌بافت جوت به‌عنوان عایق حرارتی بین جداره داخلی و خارجی و بدون در نظر گرفتن آن، می‌توان میزان عملکرد مصالح پیشنهادی در کاهش انتقال حرارت در ساختمان را به دست آورد.

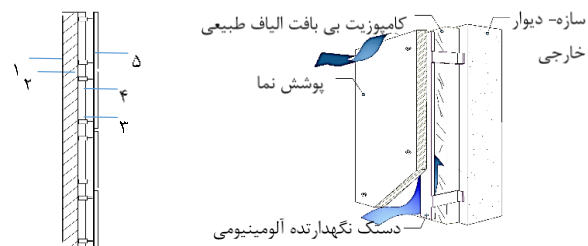
یکی از کاربردهای مطرح شده در این طراحی‌ها، به‌کارگیری مصالح بی‌بافت کامپوزیتی به‌عنوان عایق حرارتی و رطوبتی در ایجاد نمای دوپوسته در ساختمان است. در ادامه این پژوهش با شبیه‌سازی این طرح، در نرم‌افزار انرژی به بررسی رفتار حرارتی کامپوزیت فیبری طبیعی بی‌بافت پیشنهاد شده پرداخته می‌شود.

۶- شبیه‌سازی رفتار حرارتی کامپوزیت فیبری طبیعی بی‌بافت

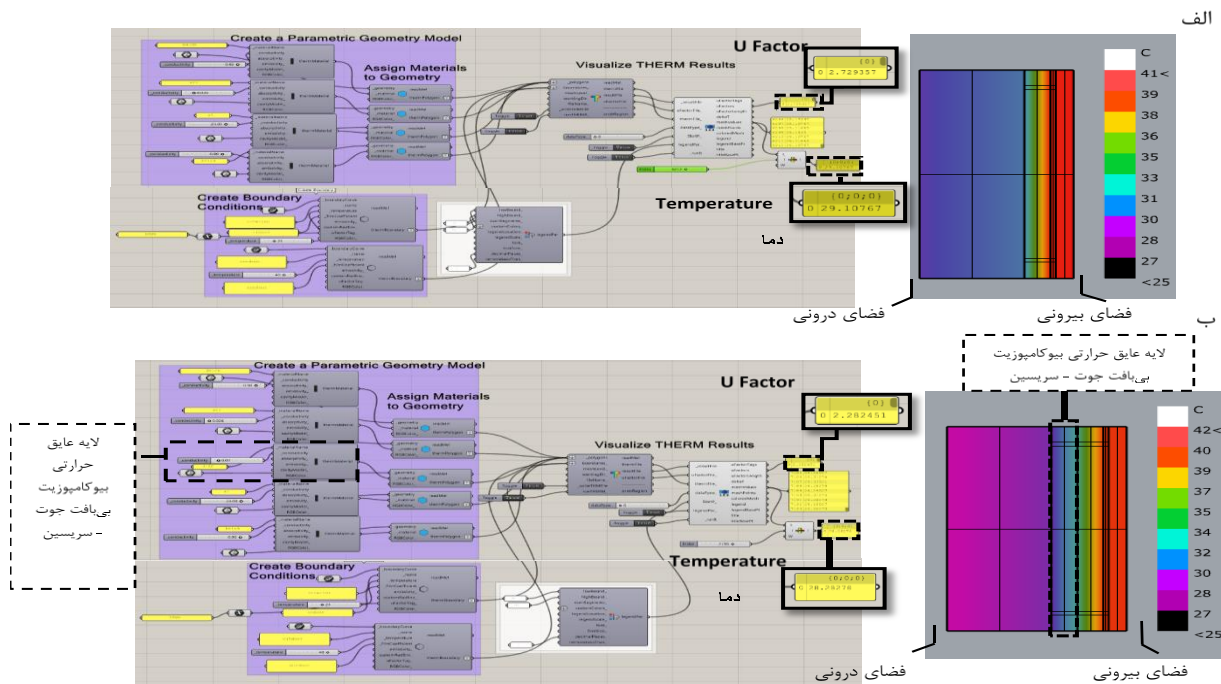
برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی کامپوزیت بی‌بافت جوت-سریسین، به‌عنوان یک عایق رطوبتی و حرارتی، ابتدا یک نمای پوسته‌ای ساختمان مطابق با جدول ۲ و در شکل ۲ ارائه شد. این لایه به‌عنوان عایق حرارتی در سمت بیرونی دیوار ساختمان قرار گرفته و دیواره خارجی ساختمان در جبهه جنوبی بنا فرض شده است. جزئیات معماری پوسته‌ی ساختمان بدون تحمل بار وارده و تقویت عناصر برای محاسبه سازه انتخاب شده است. برای اختصاص دادن مصالح به اجزای پوسته طراحی شده ساختمان، آجر توپر ۲۲ سانتی‌متری برای دیوار خارجی ساختمان و آجر پلاک سه سانتی‌متری برای پوشش نما در نظر گرفته شد. ضریب هدایت حرارتی مصالح آجر، ۰.۹ و ضریب هدایت حرارتی لایه هوا مابین عایق حرارتی بیوکامپوزیت بی‌بافت و پوشش نما، ۰.۰۲۶، مطابق با اعداد آورده شده در میحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و ضریب هدایتی بیوکامپوزیت بی‌بافت جوت به‌عنوان مصالح پیشنهادی عایق به‌صورت تقریبی بر اساس مدل نظری ماکسول (۱) که در زیر آورده شده است، محاسبه گردید و ضخامت پیشنهادی برای آن ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

$$K_c = \frac{K_m(K_f + 2K_m - 2V_f(K_m - K_f))}{K_f + 2K_m + V_f(K_m - K_f)} \quad (1)$$

در این رابطه، V_f کسر حجمی فیبر است. K_c ، K_f و K_m به ترتیب ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت، الیاف و ماتریس است. بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته، مشاهده شده است که در اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت فیبری، نتایج تجربی و نتایج حاصل از مدل نظری ماکسول در محتوای بالای فیبر با درصد خطای ۴.۸ به یکدیگر نزدیک هستند و ضریب هدایت حرارتی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کامپوزیت‌های الیاف جوت به‌عنوان تابعی از محتوای فیبر ارائه می‌شود [۲۳].



شکل ۳ از چپ به راست: مقطع، ۱. دیوار داخلی از آجر ۲۲ سانتی توپر، ۲. کامپوزیت بی بافت الیاف طبیعی، ۳. دستک آلومینیومی، اتصال دهنده پوشش نما به دیوار داخلی، ۴. لایه هوا، ۵. پوشش نما. ب) مدل پیشنهادی نمای پوسته‌ای - پنل‌های کامپوزیتی فیبری با الیاف طبیعی به‌عنوان حائل رطوبتی و حرارتی در سمت پوسته



شکل ۴ الف) شبیه‌سازی رفتار حرارتی نمای دوپوسته ساختمان بدون در نظر گرفتن لایه عایق حرارتی کامپوزیت بی‌بافت در سمت خارجی جداره دیوار اصلی ساختمان، سمت چپ الگوریتم آنالیز حرارتی در پلاگین هانی‌بی در محیط گرس‌هاپر و سمت راست نمایش آنالیز حرارتی، ب) شبیه‌سازی رفتار حرارتی نمای دوپوسته ساختمان با در نظر گرفتن لایه عایق حرارتی کامپوزیت بی‌بافت در سمت خارجی جداره دیوار اصلی ساختمان، سمت چپ الگوریتم آنالیز حرارتی در پلاگین هانی‌بی در محیط گرس‌هاپر و سمت راست نمایش آنالیز حرارتی.

میزان اختلاف دما در فضای داخل و بیرون بنا و انتقال حرارتی سطح دیوار، در دو حالت شبیه‌سازی حرارتی پوسته بنا که در نرم‌افزار انجام شد، از خروجی‌های عددی الگوریتم آنالیز حرارتی به دست آمد و در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ بررسی خروجی‌های عددی از شبیه‌سازی حرارتی پوسته ساختمان

پوسته ساختمان	دما داخلی‌ترین لایه (سانتی‌گراد)	دما خارجی‌ترین لایه (سانتی‌گراد)	اختلاف دمای لایه‌های داخل و خارج (وات بر مترمربع در کلوبین)	انتقال حرارتی
الف	۲۹.۲	۳۸.۶	۲.۷۲	۹.۴
ب	۲۸.۲	۳۸.۸	۲.۲۸	۱۰.۶

گرفته‌شده است، کمک خواهد کرد. طبق آنالیز حرارتی به‌دست‌آمده و بررسی مقادیر عددی در این تحلیل، وجود کامپوزیت بی‌بافت با الیاف طبیعی به‌عنوان عایق حرارتی در پوسته‌ی خارجی عملکرد مناسبی را به همراه دارد و نفوذ حرارت را به داخل ساختمان کاهش می‌دهد. نکته دیگر بررسی‌شده برای استفاده از این ماده بیوکامپوزیت در جایگاه عایق حرارتی در ساختمان، مقایسه آن از نظر عملکردی با عایق‌های معدنی پرکاربردی چون پشم‌شیشه و پشم سنگ و عایق حرارتی پلیمری پلی استایرن منبسط‌شده است. جدول ۶ مشخصات عایق‌های معدنی پلی استایرن منبسط‌شده، پشم شیشه و پشم سنگ در مقایسه با بیوکامپوزیت بی‌بافت جوت-سریسین آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده‌شده و در جدول بالا آورده شده است، تفاوت اختلاف دما بین فضای بیرون و درون ساختمان زمانی که لایه عایق کامپوزیت بی‌بافت الیاف طبیعی جوت-سریسین در مابین پوسته نما و دیوار ساختمان قرار داده شود، بیشتر خواهد بود. دما در سطح جداره‌ی داخلی در این حالت حدوداً ۲۸.۲ درجه سانتی‌گراد و زمانی که پوسته ساختمان بدون عایق در نظر گرفته شود ۲۹.۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. این بدین معنی است که مصالح بیوکامپوزیتی بی‌بافت پیشنهادی می‌تواند تا ۱.۲ درجه سانتی‌گراد در بهبود عملکرد گرمایی مؤثر باشد و هم‌چنین با بررسی میزان عددی انتقال حرارت برحسب وات از سطح جداره‌ها در هر مترمربع، مقدار ۲.۷۲ برای حالتی که پوسته بدون عایق کامپوزیت بی‌بافت با الیاف طبیعی جوت و ۲.۲۸ وات بر مترمربع در کلوبین حالتی که پوسته دارای عایق حرارتی کامپوزیت بی‌بافت است، حاصل می‌شود؛ بنابراین، وجود

جدول ۶ مقایسه مصالح عایق حرارتی از نظر ضریب هدایت حرارتی

مصالح	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر در کلوبین)
پلی استایرن منبسط	۰.۰۴۳
پشم سنگ	۰.۰۴۵
پشم‌شیشه	۰.۰۴۰
بیوکامپوزیت سریسین- جوت	۰.۰۶۷

مطابق جدول ۶، پشم سنگ و پشم‌شیشه به ترتیب به‌طور میانگین، دارای ضریب هدایت حرارتی ۰.۰۴۵ و ۰.۰۴۰ (وات بر متر در کلوبین) هستند.

۸- فهرست علائم

$(w/m.k)$ ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت	K_c
$(w/m.k)$ ضریب هدایت حرارتی فیبر	K_f
$(w/m.k)$ ضریب هدایت حرارتی ماتریس	K_m
کسر حجمی فیبر	V_f
ضریب تبادل حرارتی	$U \text{ factor}$ $U \text{ value}$

۹- مراجع

- [19] S. Rwawiire, B. Tomkova, J. Militky, L. Hes, and B. M. Kale, Acoustic and thermal properties of a cellulose nonwoven natural fabric (barkcloth), *Applied acoustics*, Vol. 116, pp. 177-183, 2017.
- [20] E. Y. Nakanishi, M. R. Cabral, P. de Souza Gonçalves, V. dos Santos, and H. S. Junior, Formaldehyde-free particleboards using natural latex as the polymeric binder, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 195, pp. 1259-1269, 2018.
- [21] D. A. L. Silva, F. A. R. Lahr, L. D. Varanda, A. L. Christoforo, and A. R. Ometto, Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) re-sin manufacture: a case study in Brazil, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 96, pp. 299-307, 2015.
- [22] T. Salthammer, S. Mentese, and R. Marutzky, Formaldehyde in the indoor environment, *Chemical reviews*, Vol. 110, No. 4, pp. 2536-2572, 2010.
- [23] S. Pujari, A. Ramakrishna, and K. T. Balaram Padal, Investigations on thermal conductivities of jute and banana fiber reinforced epoxy composites, *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, Vol. 98, No. 1, pp. 79-83, 2017.
- [1] M. Bechthold, and J. C. Weaver, Materials science and architecture, *Nature Reviews Materials*, Vol. 12, No.2, pp. 1-19, 2017.
- [2] F. Chen, D. Porter, and F. Vollrath, Silkworm cocoons inspire models for random fiber and particulate composites, *The American Physical Society, Physical Review*, Vol. 82, No. 4, pp. 041911, 2010.
- [3] D. Gupta, A. Agrawal, and A. Rangi, Extraction and characterization of silk sericin, *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, Vol. 39, No. 4, pp. 364-372, 2014.
- [4] F. Chen, *Silk cocoons as composites Doctoral dissertation*, Oxford University, UK. , 2011.
- [5] B. Blossman-Myer, and W. W. Burggren, The silk cocoon of the silkworm, *Bombyx mori*: Macro structure and its influence on Tran's mural diffusion of oxygen and water vapor, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, Vol. 155, No. 2, pp.259-263, 2010.
- [6] H. W. Kwak, J. Eom, S. Y. Cho, M. E. Lee, and H. J. Jin, High-toughness natural polymer nonwoven preforms inspired by silkworm cocoon structure, *International journal of biological macromolecules*, Vol. 127, pp. 146-152, 2019.
- [7] A. Korjenic, J. Zach, and J. Hroudová, The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions, *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 45-58, 2016.
- [8] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh, New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 1, pp. 65-70, 2001.
- [9] X. Jin, J. Zhang, W. Gao, J. Li, and X. Wang, Interfacial heat transfer through a natural protective fibrous architecture: a wild silkworm cocoon wall, *Textile research journal*, Vol. 85, No. 10, pp. 1035-1044, 2015.
- [10] J. Zhang, J. Li, X. Jin, S. Du, J. Kaur, and X. Wang, Natural and highly protective composite structures-wild silkworm cocoons, *Composites Communications*, Vol. 4, pp. 1-4, 2017.
- [11] F. Chen, D. Porter, and F. Vollrath, Silk cocoon (*Bombyx mori*): multi-layer structure and mechanical properties, *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, No. 8, pp. 2620-2627, 2012.
- [12] A. De Lima, S. Farias Neto, and W. Silva, Heat and mass transfer in porous materials with complex geometry: fundamentals and applications, *In Heat and mass transfer in porous media*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 161-185, 2012.
- [13] D. C. C. Martínez, C. L. Zuluaga, A. Restrepo-Osorio, and C. Álvarez-López, Characterization of sericin obtained from cocoons and silk yarns, *Procedia engineering*, Vol.200, pp. 377-383, 2017.
- [14] M. Mondal, K. Trivedy, and K. S. NIRMAL, The silk proteins, sericin and fibroin in silkworm, *Bombyx mori Linn,a review*, 2007.
- [15] M. Padamwar, and A. Pawar, Silk sericin and its applications: A review, 2004.
- [16] T. Sen, and H. J. Reddy, Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp.186,2011.
- [17] D. Gon, K. Das, P. Paul, and S. Maity, Jute composites as wood substitute, *International Journal of Textile Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 84-93, 2012.
- [18] P. V. Domke, and V. D. Mude, Natural fiber reinforced building materials, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 2320-2334, 2015.