



## Investigation of the effect of nanoparticles on the acoustic and flammability behavior of natural kenaf fibers

**Seyed Ehsan Samaei**, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran.

**Somayeh Amininasab**, Department of Acoustic, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.

**Fatemeh Salimi**, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Mohammad Javad Sheikhmozaferi**, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Reza Nadianmehr**, Department of Acoustic, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.

**Ali kazemi Tabrizi**, Department of Wood and Paper Industry, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

✉ **Ebrahim Taban**, (\*Corresponding author), Department of occupational Health engineering, School of health, Social Determinants of Health Research Center, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran. [tabane@mums.ac.ir](mailto:tabane@mums.ac.ir)

### Abstract

**Background and aims:** The use of natural kenaf fibers as a green and sustainable material and due to its remarkable properties is known as a potential alternative to synthetic fibers in the composite industries. One of the effective approaches to improve the properties of these fibers, especially in the face of fire, is creating a nano-coating with inorganic materials on the surface of the fibers. In this regard, this study was conducted with the aim of improving the flammability and acoustic properties of natural kenaf fibers using mineral nanoparticles.

**Methods:** The present study is a cross-sectional experimental study on a laboratory scale. Synthesis of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles was by co-precipitation method, which its properties were determined by using X-ray diffraction (XRD), Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and scanning electron microscopy (SEM) analyzes. In this study, the flame retardant performance by conical calorimeter, and the study of acoustic absorption (at normal angles) in order to investigate the acoustic behavior of natural fibers was tested by impedance tube based on the transfer function method and ISO10534-2 standard.

**Results:** Based on the results, the time to ignition (TTI) in the fibers with ZnO-TiO<sub>2</sub> coating was almost doubled compared to the raw fibers. The total burning time of nanoparticle-coated fibers increases from 471 to 870 seconds, and the amount of carbon dioxide production in raw fibers with ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles has decreased from 0.33 to 0.12. In addition, this type of fiber had a higher sound absorption coefficient than raw fibers.

**Conclusion:** Due to the outstanding benefits of kenaf fibers (economic and environmental benefits) and the increasing use of these fibers as multifunctional composites, the process of coating these fibers with nanoparticles is considered a good approach to improve the thermal and acoustic properties.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** None

### Keywords

Nanoparticles

Acoustic

Flammability

Natural fibers

Received: 2021/04/02

Accepted : 2022/02/05

## INTRODUCTION

Today, noise pollution, as one of the environmental pollutants, has caused severe health risks such as discomfort, tinnitus, sleep disorders, or even ischemic heart disease. Hence, noise control is very important. One of the most effective technical-engineering methods for noise control is the use of sound absorbers. The basis of sound absorption control is that by increasing the absorption coefficient of workplace surfaces, the amount of reflected sound is reduced and as a result, the overall noise is reduced. The use of natural fibers in the fabrication of composites, due to its outstanding properties such as renewability, easy accessibility, low cost, high strength properties, lightweight, low density, low health and environmental hazards as well as optimal properties (mechanical, thermal and acoustics), have led to the increasing use of these fibers as a potential alternative to synthetic fibers in the composite industries. One of the most widely used groups of natural fibers is kenaf fibers. Today, the demand for the use of these fibers in the manufacture of multifunctional hybrid composites has increased. The use of kenaf as a green and sustainable material, with the low environmental impact on industrial pollution, has led to the reuse of natural and recycled materials in the industries. The common principle of natural fibers is their natural origin so that in terms of "energy consumption" and health effects, we can expect much less impact compared to synthetic materials. In addition, natural fibers, such as kenaf fibers, are a type of agricultural product or originated from other production cycles, which have become the subject of research in the field of noise pollution control. Apart from the desirable properties mentioned for this type of fiber, there are still limitations and drawbacks to this group of fibers that limit the possibility of using them as an alternative to synthetic fibers in the fabrication of noise control composites. It should not be overlooked that natural fibers decompose severely in contact with fire or other heat sources. This feature prevents the use of these materials in high-temperature conditions in industrial applications. In this area, flame retardancy and resistance in natural materials to develop and increase the practical applications of natural fibers in sound absorption are very necessary and significant. Currently, many studies have been performed to improve flame resistance in natural materials. One of the reported effective methods is the formation of

surface coatings. Creating nano-coatings with inorganic (mineral) materials on the surface of wood materials is considered a potential and promising method to increase fire resistance due to its economic and practical aspects. Nanotechnology has many applications in the production of various materials that can reduce weight, increase strength, increase surface area, increase longevity, self-cleaning properties and other properties. In recent years, nanomaterials in the manufacture of sound absorbers and insulators have grown exponentially due to their unique properties. The choice of materials plays an important role in the absorption and loss of sound transmission in a structure. It can be expected that the synergistic effects caused by physical or chemical interactions between the mineral coating and the fiber wood substrate will be able to produce properties such as improving thermal, mechanical, and dimensional stability. According to the above-mentioned and the lack of internal studies on the effect of nanoparticle coating on the acoustic and thermal properties of natural fibers, this study aimed to improve the acoustic properties and ignition of natural kenaf fibers using mineral nanoparticles (ZnO-TiO<sub>2</sub>).

## METHODS AND MATERIALS

### *ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles Synthesis and coating on natural kenaf fibers*

The synthesis of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanopowder was by the co-precipitation method. First, Zn (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Merck, and Ti(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> were dissolved in distilled water in the same molar ratio, then the precipitating agent was added dropwise to the NaOH solution at 60 °C and stirred with a magnetic stirrer until the pH reaches 9. In the next step, the solution is stirred under the same conditions for 4 hours. Then a filter was used to separate water and solids and the precipitate was washed with distilled water. After removing the sodium impurities, the precipitate is dried inside the oven at 100 °C for 12 hours. Finally, the precipitate is calcined in a calcination furnace at 500 °C, and ZnO-TiO<sub>2</sub> nanopowder is obtained. In the last stage, natural kenaf fibers are impregnated by ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles with a concentration of 5% and transferred to the laboratory for chemical analysis tests before and after coating.

### *Characterize of compounds*

To record the X-ray diffraction (XRD) in this study, the Philips PW 1800 XRD device was used.

Diffraction patterns were reported using a CuK $\alpha$  lamp with a wavelength ( $\lambda$ ) of 1.554 angstroms in the angle range ( $\theta$ ) of 10-70. The phases in each model were determined by comparing the angle and intensity of diffraction peaks based on the information contained in the standard cards. Furthermore, Energy Diffraction X-Ray Analysis (EDX) and surface morphological examination of nanoparticles were performed by FE-SEM TESCAN MIRA3.

### Cone calorimeter

The cone calorimeter test is one of the most important tests on a laboratory scale to investigate the flame retardant properties of various products. The cone calorimeter test is a device for the ignition test that measures the inherent flammability of a substance by consuming oxygen. In this test, the sample with standard dimensions is placed on a weighing scale so that its mass reduction is recorded during combustion. During the test, the material is under irradiated and an electric spark starts combustion, and the sample is subjected to a specific heat flux (10-100 kW / m<sup>2</sup>). The basis of the work is to measure the rate of reduction of oxygen concentration in fuel gases. The data are recorded in the first 250 seconds and the released heat from the energy consumption during combustion is calculated. Combustion gases are absorbed by the centrifugal fan and hood. Concentrations of oxygen, carbon monoxide, and carbon dioxide as well as the density of the produced smoke in the exhaust are measured. The heat released per unit area and time unit is calculated by the oxygen concentration and gas rate. In this study, a conical calorimeter test was used to perform a fire inhibitory test in both samples of natural kenaf fibers before and after ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles coating with a certain thickness and density (thickness 30 mm and density 200 kg/m<sup>3</sup>). The dimensions of the samples according to the standard were 100\*100 mm<sup>2</sup> and the amount of radiation was 50 kW / m<sup>2</sup> (equivalent to 757 °C).

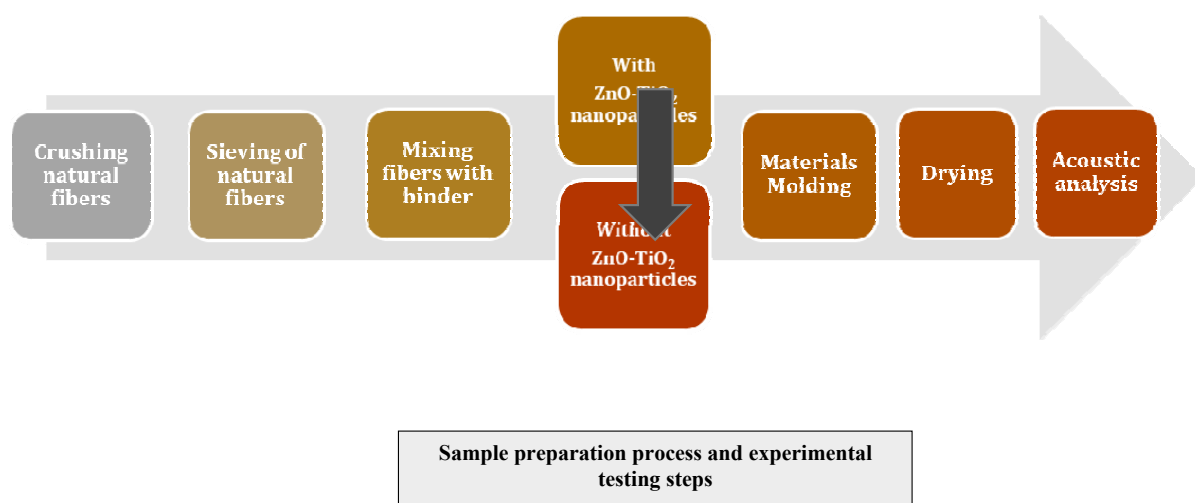
### Sample preparation and determination of sound absorption

The samples were made in an aluminum mold according to the dimensions of the impedance tube (inner diameters of 10 and 3 cm) and thickness of 3 cm and constant density of 200 kg / m<sup>3</sup>. All samples were placed at a laboratory temperature for 72 hours after molding to allow the moisture to dry completely.

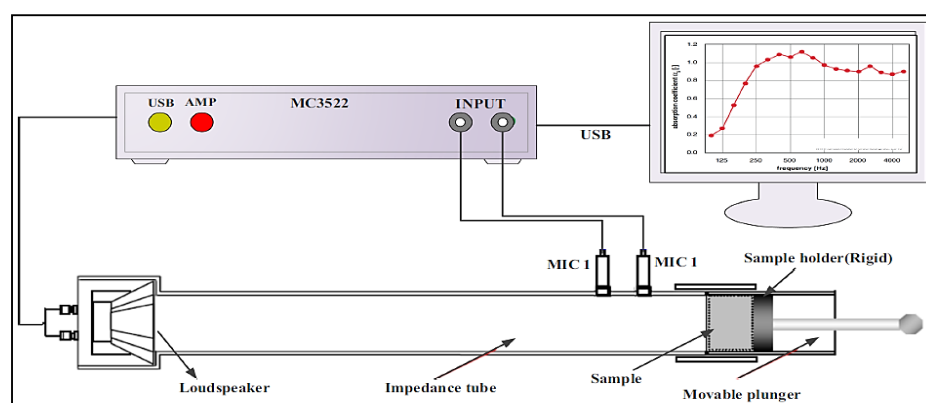
In this study, the sound absorption coefficient at normal incidence angle was measured by impedance tube model 477 based on the transfer function method and ISO10534-2 standard. In this device, sound waves are generated by a sound source in the tube. By measuring the acoustic pressures at two fixed locations using microphones mounted on the tube wall and calculating the mixed acoustic conversion function, the sound absorption in the vertical collision mode and the impedance ratios of the adsorbent material are calculated and measured. Figure 1 illustrates the steps from the sample preparation process along with the experimental testing. Figure 2 shows the experimental setup for the measurement of the sound absorption coefficients.

## RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the SEM cross-section, which was taken from natural fibers before and after the coating, was surveyed. After analyzing the SEM image of the cross-sectional area after coating and comparison with raw fibers (without coated), it is quite clear that the surface of natural fibers including its vessels is densely covered by ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles. It is quite clear that the surface and cavities of natural fibers are completely covered by ZnO-TiO<sub>2</sub> particles. Based on these images, the size of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles is about 80 to 200 nm. The elemental composition of natural fiber panel samples before and after coated with ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles was analyzed based on the EDX spectrum strong peaks of about 0.1, 4.6, and 8.7 kV. The analysis confirms the presence of zinc and titanium, which are related to the mineral element on the natural fiber panel after coating with the Nanoparticle. The Au element is related to the coating that is applied to view the SEM image. In addition, the oxygen and carbon elements are related to the wood panel bed of natural fibers. X-ray analysis is for studying the crystalline phase of natural fiber panel samples without and coated with ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles. In the XRD pattern, new strong diffraction peaks are observed in the fiber coated with ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles compared to raw fibers. According to the standard diffraction peaks of wurtzite ZnO and anatase TiO<sub>2</sub>, all these diffraction peaks can be related to wurtzite ZnO and anatase TiO<sub>2</sub>. This means that the ZnO-TiO<sub>2</sub> coating is successfully coated on the natural fiber panel substrate during the co-deposition method.



**Figure 1.** Kenaf Sample preparation and acoustic absorption testing



**Figure 2.** Schematic diagram of the acoustical measurement system

The cone calorimeter is the most important and acceptable laboratory flame test, the results of this test are also well related to the results of real-scale tests. The measured parameters by the cone calorimeter analysis are given in Table 1 for each optimized acoustic absorber (Thickness 3 cm and density 200 kg / m<sup>3</sup>) taken from natural hemp fibers with and without ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticle coating. The time to ignition (TTI) is one of the most important parameters to assess the fire resistance of wood and cellulose. The longer TTI time, the greater the fire delay power. In natural kenaf fibers, the TTI time before and after ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles was 8 and 17 seconds, respectively (Table 1). The results of this study showed that the TTI time in ZnO-TiO<sub>2</sub> coated fibers is about 2 times in comparison with raw fibers. For raw kenaf fibers (without nanoparticle coating), the Heat Release

Rate (HRR) curve was sharp, which means that the raw natural kenaf fiber sample burns quickly and releases heat. However, the HRR curve of natural fibers coated with ZnO-TiO<sub>2</sub> was much smoother and relatively lower, which indicating that the intensity of combustion and heat release was slowed down. The total burning time of wood with ZnO-TiO<sub>2</sub> coating was twice as long as natural raw kenaf fibers. The total amount of heat released for samples coated with ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles was less than for samples of natural raw fibers. By adding ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles to natural kenaf fibers, it has reduced the total heat release rate by about 50%.

Most lignocellulosic fibers, as organic matter, are very sensitive to fire. Therefore, it is important to improve their flame retardancy to comply with safety requirements. A flame retardant is a compound or mixture of compounds that used

**Table 1.** Natural fiber cone calorimeter test with and without ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles coating

| Parameters                                                 | Kenaf fiber     |              |
|------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|
|                                                            | Without Coating | with coating |
| Initial mass (g)                                           | 56.23           | 56.70        |
| Mass drop at the end of the test (g)                       | 40.12           | 39.15        |
| Final mass at the end of the test (g)                      | 16.11           | 17.09        |
| Sample thickness (mm)                                      | 30              | 30           |
| Sample diameter (mm)                                       | 100             | 100          |
| Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )                          | 200             | 200          |
| The time to ignition (s)                                   | 8               | 17           |
| Flame extinguishing time (s)                               | 471             | 870          |
| Test duration for calculations (s)                         | 471             | 870          |
| Total Heat Release Rate (MJ/m <sup>2</sup> )               | 42.95           | 23.80        |
| Maximum Heat Release Rate intensity (kw / m <sup>2</sup> ) | 158             | 297          |
| Time to reach maximum Heat Release Rate intensity (s)      | 12              | 23           |
| Average carbon monoxide production (g/s)                   | 0.0048          | 0.0017       |
| Average carbon dioxide emissions (g/ )                     | 0.33            | 0.12         |

to prevent fire or fire growth when physically or chemically added to fibers. On the other hand, one of the important features of nanoparticles is their high degree of crystallization due to the removal of amorphous parts, which can act as a barrier against heat transfer. Consequently, the resulting composite begins to melt at higher temperatures. As the crystal structure increases at the surface of natural fibers, more heat is required to melt the samples. Several studies in agreement with the present study results have shown that nanoparticles, due to their nucleating properties, accelerate the crystallization process and thus slow down the heat transfer and increase the melting temperature in composites. Moreover, according to the ASTM C423 standard, after the nanoparticles coated on kenaf fibers, the average sound absorption coefficient of natural

kenaf fibers was increased. Therefore, the fibers coated with nanoparticles have a higher sound absorption coefficient than the raw fibers.

## CONCLUSION

Finally, it can be said that the modification of fibers by nanoparticles has been effective in improving the ignition and acoustic properties of natural kenaf fibers. The results of the present study confirm the effect of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanoparticles in improving the properties of hemp fibers. It is necessary to note that due to the outstanding benefits of natural fibers (economic and environmental benefits) and increasing the use of these fibers as multifunctional acoustic composites, the process of coating fibers with nanoparticles is a good way to improve the overall properties of composites.

## How to cite this article:

Seyed Ehsan Samaei, Somayeh Amininasab, Fatemeh Salimi, Mohammad Javad Sheikhozafari, Reza Nadianmehr, Ali kazemi Tabrizi, Ebrahim Taban. Investigation of the effect of nanoparticles on the acoustic and flammability behavior of natural kenaf fibers. Iran Occupational Health. 2022 (01 June);19:11.

**\*This work is published under CC BY-NC 4.0 licence**



## بررسی تأثیر نانوذرات بر رفتار آکوستیکی و اشتعالپذیری الیاف طبیعی کنف

**سید احسان سمائی:** گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران.  
**سمیه امینی نسب:** گروه مهندسی آکوستیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.  
**فاطمه سلیمی:** گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
**محمدجواد شیخ مظفری:** گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
**رضا نادیان مهر:** گروه مهندسی آکوستیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.  
**علی کاظمی تبریزی:** گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.  
**ابراهیم تابان:** (\*) نویسنده مسئول) گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه ای، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.  
 tabane@iuums.ac.ir

### چکیده

#### کلیدواژه‌ها

نانوذرات  
آکوستیک  
آتش‌گیری  
الیاف طبیعی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

**زمینه و هدف:** استفاده از الیاف طبیعی کنف به عنوان مواد سبز و پایدار، به دلیل دارا بودن ویژگی‌های بارز، به عنوان جایگزینی بالقوه برای الیاف مصنوعی در صنایع کامپوزیتی شناخته می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر در بهبود خواص این الیاف، مخصوصاً در مواجهه با آتش، ایجاد پوشش نانویی با مواد غیرآلی (معدنی) بر روی سطح الیاف است. در این راستا، تحقیق حاضر، با هدف بهبود خواص آکوستیکی و آتش‌گیری الیاف طبیعی کنف با استفاده از نانوذرات معدنی انجام شد.

**روش بررسی:** مطالعه ی حاضر، از نوع مطالعه ی تجربی مقطعی در مقیاس آزمایشگاهی است. سنتز نانوذرات  $\text{ZnO-TiO}_2$  به روش هم‌رسوبی بود و ویژگی‌های آن با استفاده از آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD)، پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شد. در این مطالعه، اثر بازدارندگی شعله به وسیله ی دستگاه گرماسنج مخروطی و مطالعه ی ضریب جذب صوتی (تحت زاویه نرمال) به منظور بررسی رفتار آکوستیکی الیاف طبیعی توسط لوله ی امپدانس و بر اساس روش تابع انتقال و استاندارد ISO10534-2 اندازه‌گیری شد.

**یافته‌ها:** بر اساس نتایج، زمان افروزش (TTI) در الیاف با پوشش  $\text{ZnO-TiO}_2$  در مقایسه با الیاف خام، حدود ۲ برابر شد و زمان کل سوختن در الیاف با پوشش نانو ذرات از ۴۷۱ به ۸۷۰ ثانیه رسیده و میزان تولید دی‌اکسید کربن در الیاف خام و با نانو ذرات  $\text{ZnO-TiO}_2$  از ۰/۳۳ به ۰/۱۲ رسیده است. همچنین این نوع الیاف، از ضریب جذب صوتی بالاتری نسبت به الیاف خام برخوردار بود.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به مزایای برجسته ی الیاف کنف (مزایای اقتصادی و محیط زیستی) و افزایش استفاده از این دسته از الیاف به عنوان کامپوزیت‌های چندمنظوره، فرآیند پوشش‌دهی این الیاف با نانوذرات، روش مناسبی برای بهبود خواص حرارتی و آکوستیکی تلقی می‌شود.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.

**منبع حمایت‌کننده:** ندارد.

### شیوه استناد به این مقاله:

Seyed Ehsan Samaei, Somayeh Amininasab, Fatemeh Salimi, Mohammad Javad Sheikhozafari, Reza Nadianmehr, Ali kazemi Tabrizi, Ebrahim Taban. Investigation of the effect of nanoparticles on the acoustic and flammability behavior of natural kenaf fibers. Iran Occupational Health. 2022 (01 June);19:11.

\*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است

## مقدمه

آلودگی صوتی، به عنوان یکی از آلودگی‌های زیست محیطی، امروزه باعث ایجاد خطرات شدید بهداشتی نظیر ناراحتی، وزوز گوش، اختلال خواب یا حتی بیماری‌های ایسکمیک قلبی شده است؛ از این رو، کنترل سروصدا از اهمیت زیادی برخوردار است (۱). یکی از روش‌های فنی-مهندسی و مؤثر برای کنترل صدا، استفاده از جاذب‌های صوتی است (۲). استفاده از جاذب‌های صوتی به عنوان یک روش کنترلی پسیو، یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کنترل صدای ناشی از انعکاس است. اساس کنترل مبتنی بر جذب، این است که از طریق افزایش ضریب جذب سطوح کارگاه، میزان صدای انعکاسی کم شده و در نتیجه، صدای کلی کاهش یابد (۳).

استفاده از الیاف طبیعی به عنوان ماده‌ی تقویت کننده‌ی سازگار با محیط زیست در ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی به دلیل دارا بودن ویژگی‌های بارزی همچون تجدیدپذیری، دسترسی آسان و کم هزینه بودن، خواص استحکامی بالا، وزن سبک، چگالی کم، خطرات بهداشتی و زیست محیطی کم و همچنین داشتن خواص مکانیکی، حرارتی و آکوستیکی مطلوب، منجر به استفاده یروزافزون از این دسته الیاف به عنوان جایگزینی بالقوه برای الیاف مصنوعی در صنایع کامپوزیتی شده است (۴، ۵)؛ به طوری که استفاده از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده، سبب دگرگونی در کاربردهای فنی مرتبط با صنایع خودرو، بسته بندی، صنایع عایق و صنایع ساختمانی شده است (۶، ۷).

یکی از پرکاربردترین نوع الیاف طبیعی، الیاف کف می باشد که دارای سابقه ی طولانی کشت در برخی مناطق جهان نظیر مناطق شمال ایران است. در سال های گذشته، عمدتاً از این الیاف در تولید طناب، ریسمن، پارچه و کاغذ استفاده می شد؛ اما امروزه تقاضا برای استفاده از این الیاف در ساخت کامپوزیت های هیبریدی چندمنظوره افزایش یافته است (۸). استفاده از الیاف طبیعی کف به عنوان محصولات سبز و پایدار، با تأثیر زیست محیطی کم در آلودگی ناشی از صنایع، باعث افزایش علاقه به استفاده های جایگزین از مواد طبیعی و بازیافتی و ضایعات ناشی از سایر فرآیندهای تولید شده است (۹، ۱۰). عنصر مشترک الیاف طبیعی، منشأ طبیعی آنها است؛ به طوری که از نظر «مصرف انرژی» و اثرات بهداشتی، انتظار تأثیر بسیار کمتری در مقایسه با مواد مصنوعی دارند (۱۱). همچنین الیاف طبیعی مانند الیاف کف، نوعی از فرآورده های کشاورزی هستند و یا از چرخه های تولیدی

دیگر ناشی می شوند و به موضوع تحقیقات در زمینه ی کنترل آلودگی صوتی تبدیل شده است (۱۲، ۱۳).

جدا از خواص مطلوب اشاره شده در این نوع الیاف، هنوز محدودیت ها و اشکالاتی بر این دسته الیاف حاکم است که امکان استفاده از آنها را به عنوان جایگزین برای الیاف مصنوعی در ساخت کامپوزیت های کنترل آلودگی صوتی، محدود می کند. در این راستا، الیاف طبیعی در تماس با آتش یا منبع حرارت، به شدت در معرض تجزیه و احتراق گرمایی قرار می گیرند که مانع استفاده از این مواد در شرایط دمایی بالا می شود. برای توسعه ی کاربردهای عملی الیاف طبیعی در زمینه ی جذب صوتی، بهبود و بازدارندگی شعله در این دست از مواد بسیار ضروری و قابل توجه است. در حال حاضر، مطالعات زیادی جهت بهبود مقاومت در برابر شعله در مواد طبیعی انجام شده است که سه روش کارآمد و امکان پذیر در این مطالعات شامل اشباع<sup>۱</sup>، اختلاط<sup>۲</sup> و تشکیل پوشش های سطحی<sup>۳</sup> گزارش شده است؛ به خصوص ایجاد پوشش نانویی با مواد غیرآلی (معدنی) بر روی سطح مواد چوبی، به دلیل جنبه های اقتصادی و عملی، یک روش بالقوه و امیدوارکننده برای افزایش مقاومت در برابر آتش در نظر گرفته می شود (۱۴، ۱۵). نانو فن آوری، در تولید مصالح مختلف، کاربردهای فراوانی دارد که می تواند باعث کاهش وزن، افزایش مقاومت، افزایش سطح، افزایش طول عمر، خواص خودتمیزشوندگی و ویژگی های دیگر شود. در سال های اخیر، نانو مواد در ساخت جاذب ها و عایق های صوتی، به دلیل ویژگی های منحصر به فرد، رشد فزاینده ای داشته است. انتخاب مواد، نقش مهمی در جذب و افت انتقال صوت در یک ساختار بازی می کند (۱۶-۱۸). می توان انتظار داشت که اثرات هم افزایی ناشی از فعل و انفعالات فیزیکی یا شیمیایی بین پوشش معدنی و بستر چوبی الیاف، قادر به تولید خواصی نظیر بهبود ثبات حرارتی، مکانیکی و ابعادی باشد. به عنوان مثال، طبق تحقیقات Sun، کامپوزیت ساخته شده از مواد چوبی و پوشش سطحی اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ )، پیشرفت زیادی در مقاومت در برابر آتش نشان داد. در همین حال، از پوشش نانوذرات اکسیدروی ( $\text{ZnO}$ ) و مشتقات آن به طور گسترده ای در بازدارنده های آتش استفاده شده است و همچنین استفاده از پوشش نانوذرات، زمینه را جهت انجام تحقیقات و توسعه ی گسترده ی ترکیبات ضد حریق برای انواع مواد طبیعی فراهم کرده است (۱۹، ۲۰).

1 Impregnation

2 Incorporation

3 Formation of surface coating

(EDAX) و بررسی مورفولوژیک<sup>۴</sup> سطحی نانو ذرات، توسط دستگاه FE-SEM TESCAN MIRA3 انجام شد.

### دستگاه گرماسنج مخروطی

آزمون گرماسنج مخروطی،<sup>۵</sup> یکی از مهم‌ترین آزمون‌ها در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی خواص ضد شعله‌ی محصولات مختلف است. آزمون گرماسنج مخروطی، دستگاهی برای آزمون اشتعال است که از روی مصرف اکسیژن، اشتعال‌پذیری ذاتی ماده را اندازه می‌گیرد. در این آزمون، نمونه با ابعاد استاندارد روی وزنه‌ای قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که کاهش جرم آن در طی احتراق ثبت شد. در حین آزمون، ماده تحت تابش قرار گرفت، احتراق به‌وسیله‌ی جرقه‌ی الکتریکی آغاز شد و نمونه تحت شار گرمایی مشخص ( $100-10 \text{ kw/m}^2$ ) قرار گرفت. اساس کار، اندازه‌گیری میزان کاهش غلظت اکسیژن در گازهای سوختی بود. داده‌ها در  $250^\circ\text{C}$  ثانیه‌ی اول ثبت شدند و گرمای آزادشده از مصرف انرژی در حین احتراق محاسبه شد (همچنین در این مطالعه، گازهای تولیدشده از احتراق به‌وسیله‌ی فن و هود سانتریفیوژی جذب شد). غلظت اکسیژن، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن و همچنین دانسیته دود تولیدشده اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، از روی غلظت اکسیژن و نرخ گاز، گرمای آزادشده در واحد سطح و واحد زمان محاسبه شد (۲۱). شکل ۱، تصویر شماتیک دستگاه گرماسنجی مخروطی را نشان می‌دهد. در این پژوهش، از آزمون گرماسنج مخروطی برای انجام تست بازندارندگی آتش در هر دو نمونه الیاف طبیعی کف قبل و بعد از پوشش نانو ذرات  $\text{ZnO-TiO}_2$  با ضخامت و چگالی مشخص (ضخامت  $30 \text{ میلی‌متر}$  و چگالی  $200 \text{ کیلوگرم بر مترمکعب}$ )، در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهران بر اساس استاندارد ملی ۷۲۷۲-۱ و بین‌المللی ۵۶۶۰-۱ ISO انجام گرفت. ابعاد نمونه‌ها، بر طبق استاندارد  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  و میزان تابش  $50 \text{ kw/m}^2$  (معادل  $757^\circ\text{C}$ ) بود.

### آماده‌سازی نمونه و تعیین جذب صوتی

نمونه‌های مورد نظر (به شکل الیاف توده‌شده)، در درون قالبی مطابق با ابعاد لوله‌ی اِمپدانس، یعنی به قطر داخلی  $10$  و  $3$  سانتی‌متری به ضخامت  $3$  سانتی‌متر با چگالی ثابت  $200$  کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شدند. کلیه‌ی نمونه‌ها پس

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا و عدم انجام مطالعات داخلی درخصوص تأثیر پوشش نانوذرات بر خواص صوتی و حرارتی الیاف طبیعی، این مطالعه با هدف بهبود خواص آکوستیکی و آتش‌گیری الیاف طبیعی کف با استفاده از نانوذرات معدنی ( $\text{ZnO-TiO}_2$ ) انجام شد.

### مواد و روش‌ها

#### سنتز نانو ذرات $\text{ZnO-TiO}_2$ و پوشش دهی بر روی الیاف طبیعی کف

نحوه‌ی سنتز نانو پودر  $\text{ZnO-TiO}_2$  به روش هم‌رسوبی<sup>۱</sup> بود. ابتدا نیترات روی ( $\text{Zn(NO}_3)_2$  Merck) و سولفات تیتانیوم ( $\text{Ti(SO}_4)_2$ ) با نسبت مولی یکسان درون آب مقطر حل شد، سپس عامل رسوب‌دهنده به‌صورت قطره‌ای به محلول NaOH در دمای  $60^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد اضافه شد (در این مرحله، برای تعیین و نگهداری محلول در دمای مشخص، از هات پلیت مگنت استیرر IKA مدل RCT basic استفاده شد). سپس توسط هم‌زن مغناطیسی هم زده شد ( $1200$  دور در دقیقه) تا PH آن به مقدار عددی  $9$  برسد. سپس با حفظ شرایط موجود، محلول به مدت چهار ساعت هم زده شد. برای جدا کردن آب و ماده‌ی جامد، از فیلتر استفاده شد و شستشوی رسوب توسط آب مقطر انجام شد. رسوب در داخل آون در دمای  $100^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت  $12$  ساعت خشک گردید؛ و در نهایت رسوب به درون کوره‌ی کلسیناسیون در دمای  $500^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتی‌گراد کلسینه شد و نانو پودر  $\text{ZnO-TiO}_2$  استخراج شد. در مرحله‌ی آخر نیز الیاف طبیعی کف، توسط نانو ذرات  $\text{ZnO-TiO}_2$  با غلظت  $5$  درصد وزنی به‌صورت غوطه‌وری (در حمام اولتراسونیک) آغشته شد و جهت انجام تست‌های آنالیز شیمیایی قبل و بعد از پوشش، به آزمایشگاه منتقل شد.

#### مشخصه‌یابی ترکیبات

جهت ثبت الگوی پراش پرتو ایکس<sup>۲</sup> (XRD)، در این مطالعه از دستگاه XRD مدل Philips PW 1800 استفاده شد. الگوهای پراش با استفاده از لامپ  $\text{CuK}\alpha$  با طول موج  $1.542 \text{ \AA}$  آنکستروم، در گستره‌ی زاویه‌ی  $10-70^\circ$  گزارش شد. فازهای موجود در هر الگو، از طریق مقایسه‌ی زاویه و شدت پیک‌های پراش بر اساس اطلاعات موجود در کارت‌های استاندارد، مشخص و تعیین شد؛ همچنین آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۳</sup>

1 Co-precipitation

2 X-ray Powder Diffraction (XRD)

3 Energy Dispersive X-ray Analysis (EDXA or EDAX)

4 Field Emission Scanning Electron Microscopes (FE-SEM)

5 Cone calorimeter



شکل ۱. تصویر شماتیک و واقعی دستگاه گرماسنج مخروطی

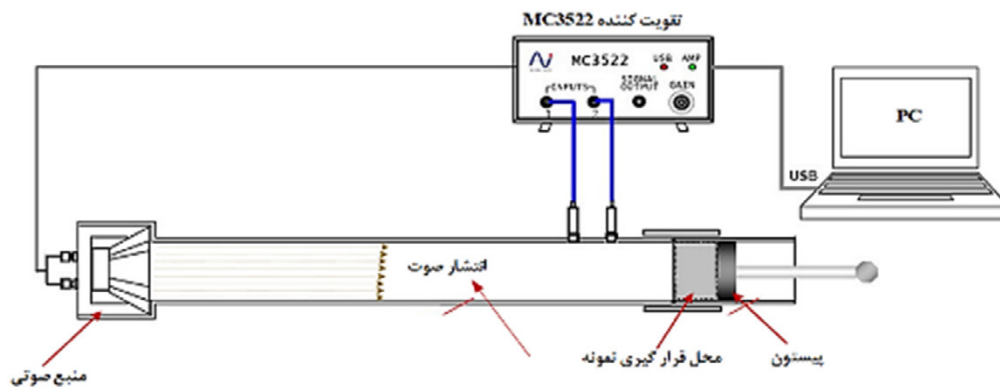


شکل ۲. مراحل ساخت نمونه های جاذب صوتی

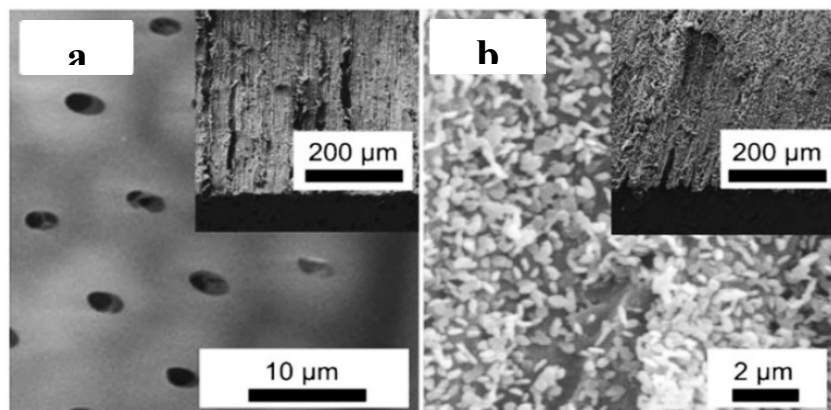
۳). این لوله، برای تعیین ضریب جذب و انتقال صوت در مواد متخلخل و یا برای تعیین امپدانس سطحی استفاده می شود. در این دستگاه، امواج صوتی توسط یک منبع تولید صدا در لوله ایجاد می شوند. از طریق اندازه گیری فشارهای آکوستیکی در دو مکان ثابت با استفاده از میکروفون های نصب شده بر دیواره ی لوله و محاسبه ی تابع تبدیل آکوستیکی مختلط، جذب صوت در حالت برخورد عمود و نسبت های امپدانس ماده ی جاذب محاسبه و اندازه گیری می شود. سیستم لوله ی امپدانس صوتی مجهز به لوله با قطر بزرگ (۱۰ سانتی متر) برای اندازه گیری ضریب جذب و افت انتقال صوت در فرکانس های پایین (۱۶۰۰ - ۶۳ هرتز) و لوله با قطر کوچک (۳ سانتی متر) برای اندازه گیری ضریب جذب و افت انتقال صوت در فرکانس های بالا (۶۳۰۰ - ۱۶۰۰ هرتز) کاربرد دارد.

از قالب گیری، به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه قرار می گرفتند تا رطوبت آنها کاملاً خشک شود. مراحل مختلف ساخت کامپوزیت ساخته شده توسط الیاف طبیعی، در شکل ۲، نشان داده شده است.

به منظور بررسی رفتار آکوستیکی، از روش اندازه گیری ضریب جذب صوتی استفاده شد. به طور کلی، روش های مختلفی برای اندازه گیری ضریب جذب صوتی وجود دارد. در این مطالعه، ضریب جذب صوت در زاویه ی برخورد مستقیم، توسط لوله ی امپدانس واقع در دانشگاه تربیت مدرس (مدل ۴۷۷ ساخت شرکت BSWA کشور چین) و بر اساس روش تابع انتقال و استاندارد ISO10534-2 اندازه گیری شد (۲۲). در یک انتهای این لوله ی استوانه ای شکل و غیرمتخلخل، محل قرارگیری نمونه ها و در انتهای دیگر آن، بلندگوی تولید صدا قرار دارد (شکل



شکل ۳. تصویر شماتیک امپدانس تیوب جهت تعیین جذب صوتی در الیاف کف



شکل ۴. تصاویر SEM الیاف طبیعی (a): الیاف طبیعی خام b: الیاف طبیعی پوشش داده شده با نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub>

عنصر طلا، مربوط به روکشی است که برای مشاهده‌ی تصویر SEM اعمال شده است و عناصر اکسیژن و کربن مربوط به بستر پنبه چوبی الیاف طبیعی می‌باشند.

آنالیز پراش اشعه‌ی X، برای بررسی فاز کریستالی نمونه‌های پنبه الیاف طبیعی بدون و پوشش داده شده با نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> است. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده، الگوی XRD در پنبه الیاف پوشش داده شده به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> (منحنی d) در مقایسه با الیاف طبیعی خام تیمار نشده (منحنی a)، دارای پیک‌های پراش قوی جدیدی مشاهده می‌شود. با توجه به پیک‌های استاندارد پراش ZnO ورتزیت (منحنی b) و TiO<sub>2</sub> آناتاز (منحنی c)، همه‌ی این پیک‌های پراش را می‌توان به ZnO ورتزیت و TiO<sub>2</sub> آناتاز مربوط دانست. این بدان معناست که پوشش ZnO-TiO<sub>2</sub> طی روش هم‌رسوبی با موفقیت روی بستر پنبه الیاف طبیعی پوشش یافته است.

#### آزمون گرماسنج مخروطی

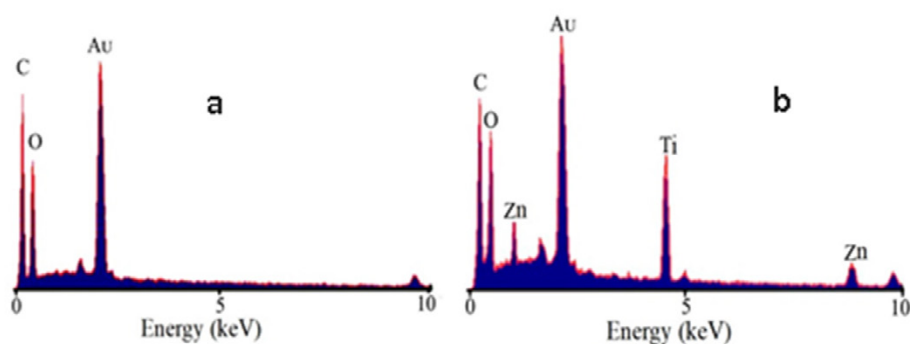
گرماسنج مخروطی، مهم‌ترین و مقبول‌ترین آزمون

#### یافته‌ها

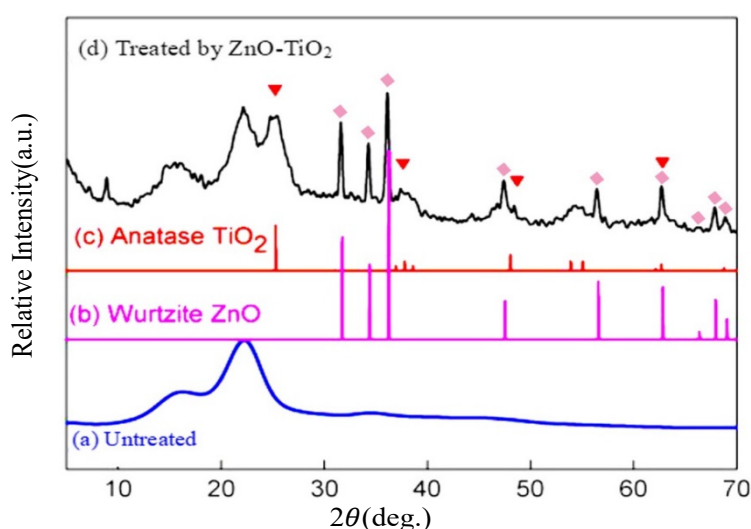
##### بررسی آنالیز ریز ساختار الیاف طبیعی بدون و پوشش داده شده با نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub>

سطح مقطع SEM گرفته شده از الیاف طبیعی قبل و بعد از پوشش دهی نشان داده شده است (شکل ۴). از تصویر SEM سطح مقطع بعد از پوشش دهی (تصویر داخلی b) و مقایسه با تصویر داخلی شکل a، می‌توان به وضوح مشاهده کرد که سطح الیاف طبیعی شامل آوندهای آن توسط نانوذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> به صورت متراکم پوشش یافته است. کاملاً واضح است که سطح و حفرات الیاف طبیعی، کلاً توسط ذرات ترکیب ZnO-TiO<sub>2</sub> پوشش یافته‌اند. بر اساس این تصاویر، اندازه‌ی نانوذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> حدود ۸۰ تا ۲۰۰ nm است.

ترکیب عنصری نمونه‌های پنبه الیاف طبیعی قبل و بعد از پوشش داده شده با نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> بر اساس طیف EDX آنالیز شد. پیک‌های قوی در حدود ۱/۰، ۴/۶ و ۸/۷ کیلوولت (مشخص شده در شکل ۵)، حضور روی و تیتانیوم را تأیید می‌کند و مربوط به عنصر ماده‌ی معدنی روی پنبه الیاف طبیعی بعد از پوشش به نانو ذرات است.



شکل ۵. آنالیز EDX مربوط به نمونه (a): نمونه ی الیاف خام، (b): الیاف طبیعی پوشش داده شده با نانو ذرات (ZnO-TiO<sub>2</sub>)



شکل ۶. تصاویر طیف XRD مربوط به نمونه الیاف طبیعی (a): نمونه الیاف خام، (b): استاندارد ZnO، (c): استاندارد آناتاز و (d): الیاف طبیعی پوشش داده شده با نانو ذرات (ZnO-TiO<sub>2</sub>)

در الیاف پوشش یافته با ZnO-TiO<sub>2</sub> در مقایسه با الیاف خام حدود ۲ برابر است. همان طور که ملاحظه می شود، تأخیر در آتش گیری بستر الیاف طبیعی به طور مؤثری با مواد پوشش داده شده توسط ZnO-TiO<sub>2</sub> تقویت شده است. میزان رهایش گرما<sup>۲</sup> (HRR)، مهم ترین پارامتر در بررسی اشتعال پذیری مواد است؛ زیرا حرارت آزاد شده از سوختن مواد، انرژی گرمایی بیشتری را برای رشد و پخش شعله فراهم می کند. علاوه بر این، پارامترهای دیگری مانند کل رهایش گرما، تولید دود و رهایش CO به مقدار HRR وابسته هستند. پیک HRR در مدت زمان کوتاه و اغلب بعد از افروزش ظاهر می شود و معمولاً معیار خوبی برای ارزیابی اشتعال پذیری مواد است. منحنی های میزان رهایش گرما بر حسب زمان برای الیاف طبیعی کف با و بدون پوشش داده شده به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> در شکل

آزمایشگاهی شعله است که نتایج آن نیز به خوبی با نتایج آزمایش ها مقیاس حقیقی مرتبط است. پارامترهای اندازه گیری شده توسط آنالیز گرماسنج مخروطی، در جدول ۱، برای هر جاذب آکوستیکی بهینه شده (ضخامت ۳ سانتی متر و چگالی ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) برگرفته شده از الیاف طبیعی کف با و بدون پوشش نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> آورده شده است.

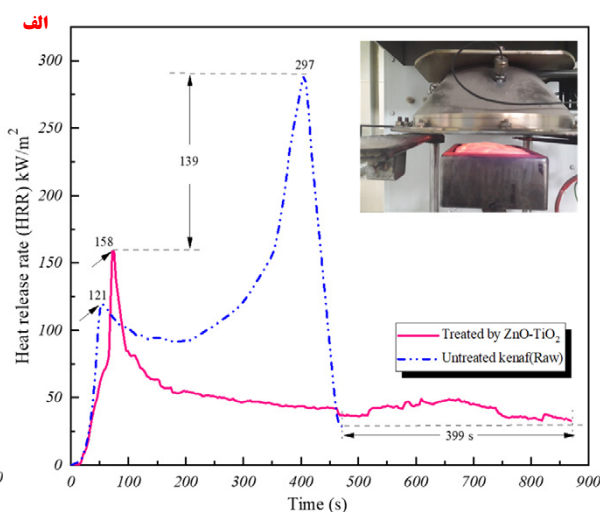
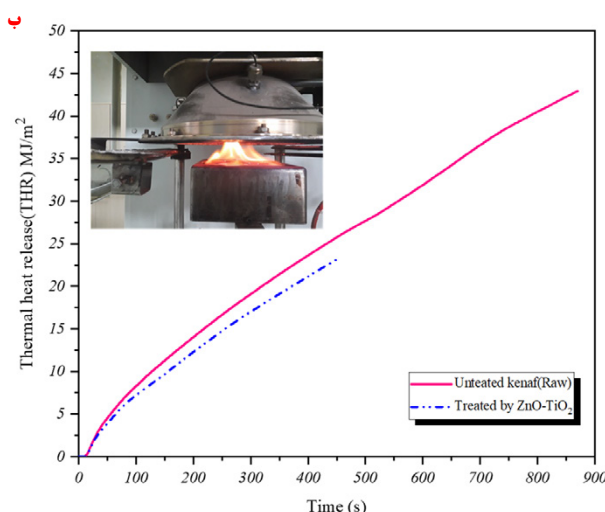
زمان وقوع افروزش<sup>۱</sup> (TTI)، یکی از مهم ترین پارامترها برای ارزیابی توانایی مقاومت ماده ی چوبی و سلولزی در برابر آتش است. هرچه زمان وقوع افروزش بیشتر باشد، قدرت تأخیراندازی آتش بیشتر است؛ همان طور که در جدول ۱ گزارش شد، در الیاف طبیعی کف زمان TTI قبل بعد از نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> به ترتیب ۸ و ۱۷ ثانیه بود. نتایج برگرفته از این مطالعه، نشان داد که زمان TTI

<sup>2</sup> Heat release rate

<sup>1</sup> The time to ignition

جدول ۱. نتایج حاصل از آزمون گرماسنج مخروطی الیاف طبیعی با و بدون پوشش نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> تحت تابش ۲۵۰-kw.m

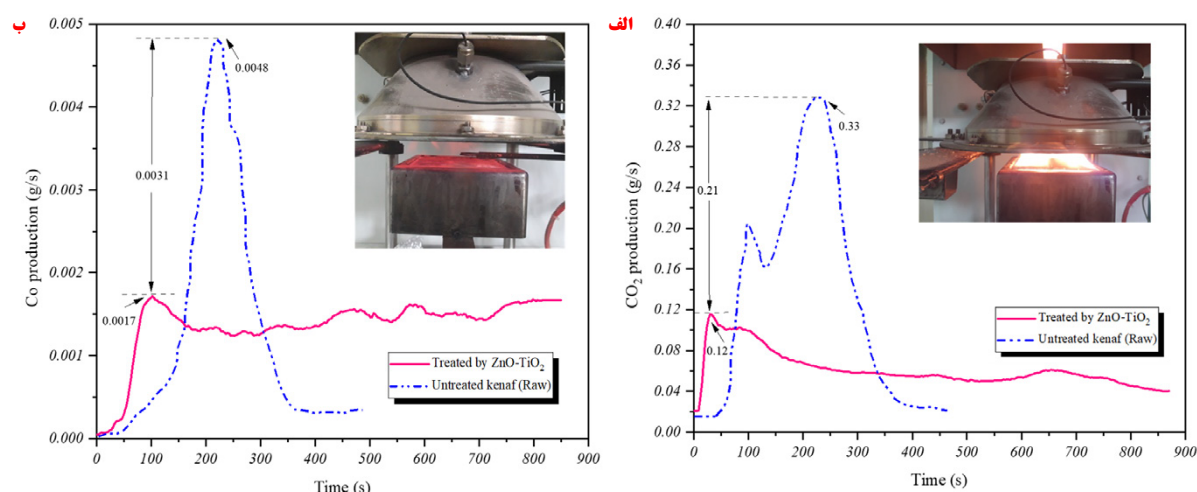
| کف        |         | پارامترهای مورد بررسی                       |
|-----------|---------|---------------------------------------------|
| بدون پوشش | با پوشش |                                             |
| 56/70     | 56/23   | جرم اولیه (g)                               |
| 39/15     | 40/12   | افت جرم در پایان آزمون (g)                  |
| 17/09     | 16/11   | جرم نهایی آزمون در پایان آزمون (g)          |
| 30        | 30      | ضخامت آزمون (mm)                            |
| 100       | 100     | قطر نمونه (mm)                              |
| 200       | 200     | چگالی بالک (kg/m <sup>3</sup> )             |
| 17        | 8       | زمان وقوع افروزش (s)                        |
| 870       | 471     | زمان خاموش شدن شعله (s)                     |
| 870       | 471     | طول مدت آزمون برای محاسبات (s)              |
| 23/80     | 42/95   | کل رهائش گرما (MJ/m <sup>2</sup> )          |
| 297       | 158     | حداکثر شدت رهائش گرما (kw/m <sup>2</sup> )  |
| 23        | 12      | زمان رسیدن به حداکثر شدت رهائش گرما (s)     |
| 5/95      | 6/68    | میانگین سطح تیرگی ویژه (m <sup>2</sup> /kg) |
| 0/0017    | 0/0048  | میانگین تولید منوکسید کربن (g/s)            |
| 0/12      | 0/33    | میانگین تولید دی‌اکسید کربن (g/s)           |

شکل ۷. منحنی شدت رهائش گرما (الف) و کل رهائش گرما (ب) برای الیاف طبیعی کف قبل و بعد از پوشش نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> تحت تابش ۲۵۰-kw.m

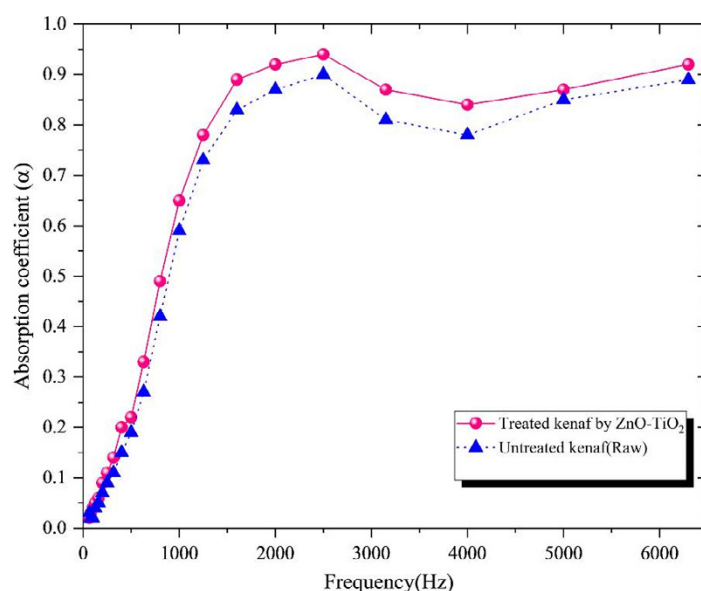
زمان کل سوختن در الیاف طبیعی کف بدون و با پوشش به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> از ۴۷۱ به ۸۷۰ ثانیه می‌رسد؛ این بدان معناست که پوشش ZnO-TiO<sub>2</sub> انتقال گرما به بستر الیاف طبیعی را به تأخیر انداخته و در نتیجه سرعت گازهای فرار اشتعال‌پذیر از پوشش حرارتی الیاف سلولزی را کم کرده است. شکل ۷ (ب)، منحنی کل رهائش گرما<sup>۱</sup> (THR) برحسب زمان برای الیاف طبیعی کف با و بدون پوشش داده شده به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کل گرمای آزاد شده برای نمونه‌های پوشش داده شده به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> در مقایسه با نمونه‌های الیاف طبیعی خام، کمتر است؛

۷ (الف)، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای الیاف طبیعی کف خام (بدون پوشش نانو ذرات)، منحنی HRR شدید و تند بود و این بدان معناست که نمونه‌ی الیاف طبیعی کف خام به سرعت می‌سوزد و گرما را آزاد می‌کند؛ اما منحنی HRR الیاف طبیعی پوشش یافته به ZnO-TiO<sub>2</sub> خیلی ملایم‌تر و نسبتاً پایین‌تر بود که نشان می‌دهد شدت سوختن و رهائش گرما آهسته و کم شده است. به علاوه دو پیک رهائش گرما در خصوص الیاف پوشش‌یافته با ZnO-TiO<sub>2</sub> در مقایسه با الیاف پوشش داده نشده، به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است که نشان می‌دهد الیاف پوشش داده شده، بهتر آتش را به تأخیر می‌اندازد. زمان کلی سوختن چوب با پوشش ZnO-TiO<sub>2</sub> دو برابر بیشتر از الیاف طبیعی کف خام بود؛ به‌طوری که

1 Thermal heat release



شکل ۸. منحنی تولید دی اکسید کربن (الف) و مونواکسید کربن (ب) برای الیاف طبیعی کنف قبل و بعد از پوشش نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> تحت تابش ۲۵۰-۳۵۰ kw.m



شکل ۹. منحنی تولید مقایسه ی ضریب جذب آکوستیکی الیاف طبیعی کنف بدون و با پوشش نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub>

در طول آزمون آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزودن نانو ذرات بر روی الیاف طبیعی کنف، مقادیر تولید منو کسید و دی اکسید کربن کاهش یافته است. نتایج برگرفته از تحقیق، بیانگر آن است که میزان تولید دی اکسید کربن در الیاف طبیعی کنف بدون و با پوشش به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> از ۰/۳۳ به ۰/۱۲ رسیده است؛ همچنین تولید منو کسید کربن در الیاف طبیعی کنف بدون و با پوشش به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> از ۰/۰۴۸ به ۰/۰۱۷ رسیده است. این امر، با نتایج شدت رهائش گرما که به صورت تناسبی با اکسیژن مصرفی برای سوختن محاسبه می شود، در تطابق است. همچنین از مقایسه ی این دو شکل، مشاهده می شود که تولید منو کسید کربن

به طوری که در الیاف طبیعی کنف بدون و با پوشش یافته با ZnO-TiO<sub>2</sub> منحنی کل رهائش گرمای از ۴۲/۹۵ به ۲۳/۸۰ مگاژول بر کیلوگرم رسیده است؛ به عبارت دیگر، افزودن نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> سبب کاهش کل رهائش گرما شده است. هرچه میزان گرمای آزاد شده در هنگام احتراق کمتر باشد، سرعت سوختن پایین تر است. بر طبق جدول ۱ و شکل ۷، می توان نتیجه گرفت که افزودن نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> به الیاف طبیعی کنف، میزان کل رهائش گرما را در حدود ۵۰٪ کاهش داده است.

از دیگر پارامترهای قابل اندازه گیری در آزمون گرماسنج مخروطی، تولید منو کسید کربن و دی اکسید کربن است. در شکل ۸، منحنی های تولید این دو گاز

در مقایسه با دی اکسید کربن در دو حال با و بدون پوشش نانو ذرات کمتر و میزان گاز سمی ناشی از احتراق کاهش یافته است (شکل ۸).

### ضریب جذب صوتی الیاف بدون و با پوشش داده شده با نانو ذرات $ZnO-TiO_2$

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، نمودار ضریب جذب صوتی الیاف طبیعی کف خام و با پوشش نانوذرات  $ZnO-TiO_2$  مشخص است. بر طبق استاندارد ASTM C423، میانگین ضریب جذب آکوستیکی الیاف طبیعی کف در ضخامت ۳۰ میلی متر و چگالی بالک ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بدون و با پوشش نانو ذرات به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۸ است. همان طور که می بینید، الیاف با پوشش نانوذرات نسبت به الیاف خام، از ضریب جذب صوتی بالاتری برخوردار هستند. همچنین الیاف طبیعی بدون و با پوشش داده شده به نانو ذرات نانوذرات  $ZnO-TiO_2$  در دو محدوده ی فرکانس پایین و بالا مورد بررسی قرار گرفت؛ به نحوی که در الیاف طبیعی کف خام و با پوشش نانو ذرات نانوذرات  $ZnO-TiO_2$  ضریب جذب آکوستیکی در فرکانس پایین به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۹ و در محدوده ی فرکانس بالا به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۸۵ است.

### بحث

در حال حاضر، پوشش های معدنی تأخیرانداز آتش گیر چوب و سلولز، فقط از مواد معدنی مونومری همچون  $TiO_2$ ،  $SiO_2$  و  $ZnO$  ساخته شده است (۱۴). در خصوص پوشش معدنی حاوی دو یا چند ماده ی معدنی برای تأخیراندازی آتش در چوب، به ندرت مطالعه صورت گرفته است؛ که علت آن پیچیدگی و مشکل بودن کنترل رشد بلور دو یا چند ماده ی متفاوت است. بر اساس تحقیقات قبلی، مزایای گونه های  $TiO_2$  و  $ZnO$  عبارت است از: غیرسمی، ارزان، دوستدار محیط زیست و دارای پایداری گرمایی بالا (۲۳، ۲۴)؛ از این رو، در این مطالعه از الیاف طبیعی کف با  $ZnO-TiO_2$  استفاده از روش هم رسوبی برای بهبود خاصیت بازدارندگی آتش و جذب صوتی پرداختیم.

بر اساس نتایج، مشخص شد که پوشش الیاف کف توسط نانوذرات  $ZnO-TiO_2$  سبب بهبود پارامترهای مورد بررسی آزمون گرماسنج مخروطی شد؛ به طوری که زمان افروزش (TTI) و زمان کلی سوختن چوب در الیاف پوشش یافته با  $ZnO-TiO_2$  در مقایسه با الیاف خام، حدود ۲ برابر شد. همان طور که ملاحظه می شود، تأخیر در آتش گیری بستر الیاف طبیعی، به طور مؤثری با مواد

پوشش داده شده توسط  $ZnO-TiO_2$  تقویت شده است. بیشتر الیاف لیگنوسلولوزی به عنوان مواد آلی، بسیار به آتش حساس هستند؛ بنابراین، بهبود بازدارندگی شعله ی آن ها برای مطابقت با ملزومات ایمنی، اهمیت دارد. بازدارنده ی شعله، یک ترکیب یا مخلوطی از ترکیب ها است و زمانی که به طور شیمیایی و یا فیزیکی بر روی الیاف اضافه می شود یا شرکت داده می شود، جلوگیری از آتش گرفتن یا رشد آتش را انجام می دهد (۲۵).

از طرف دیگر، یکی از ویژگی های مهم نانو ذرات، درجه ی تبلور بالای آن در اثر حذف بخش های آمورف است که می تواند به عنوان مانع در برابر انتقال گرما عمل کند و در نتیجه کامپوزیت حاصل، در دماهای بالاتر شروع به ذوب کند. با بیشتر شدن ساختار بلوری در سطح الیاف طبیعی، گرمای بیشتری برای ذوب نمونه ها مورد نیاز است (۲۶). مطالعات متعدد هم راستا با نتایج حاضر، مشخص کرده اند که نانو ذرات به دلیل داشتن خاصیت هسته زایی، موجب تسریع در فرآیند بلور سازی شده و در نتیجه موجب کند شدن انتقال گرما و افزایش دمای ذوب در کامپوزیت ها می شود (۲۷-۲۹). پایداری کامپوزیت در برابر آتش گیری، به طور چشمگیری به لایه ی نانوذرات تشکیل شده در سطح آن بستگی دارد. در واقع این لایه با انتشار گازهای فرار اشتعال را از قسمت های داخلی به سطح الیاف، موجب عایق شدن لایه های زیرین و توقف انتشار گازهای فرار ایفا می کند (۲۹-۳۱). کاهش مقدار حرارت آزاد شده در اثر حضور نانوذرات معدنی را می توان به تشکیل لایه ای بر روی سطح الیاف طبیعی نسبت داد که به عنوان محافظی در برابر گرما و انتقال جرم عمل می کند. در واقع پس از شروع تجزیه گرمایی، مقدار ماده سازنده الیاف طبیعی روی سطح کاهش یافته و کسر حجمی نانوذرات به طور موضعی افزایش می یابد. با افزایش دما سپر گرمایی بر روی الیاف تشکیل می شود. این سپر، از لحظه ی تشکیل با کاهش سرعت انتشار گازهای فرار اشتعال را موجب کاهش مقدار حرارت تولید شده و به تأخیر انداختن تخریب گرمایی کامپوزیت ساخته شده می شود (۳۰، ۳۱). البته نباید از نظر دور داشت که نانوذرات با ایجاد شبکه های عرضی با زنجیره های الیاف، نقش مهمی در کند شدن فرآیند سوختن دارد (۳۰، ۳۲-۳۴). در این مطالعه، پوشش  $ZnO-TiO_2$  انتقال گرما به بستر چوب را به تأخیر انداخته و بنابراین میزان مواد فرار قابل اشتعال حاصل از تجزیه ی حرارتی چوب را کاهش می دهد (۳۵)؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که الیاف طبیعی پوشش داده شده

کامپوزیت‌ها تلقی می‌شود.

## سپاسگزاری

نویسندگان، لازم می‌دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه تربیت مدرس که شرایط لازم برای انجام این تحقیق را فراهم آوردند، اعلام نمایند.

## REFERENCES

1. Cao L, Fu Q, Si Y, Ding B, Yu J. Porous materials for sound absorption. *Composites Communications*. 2018;10:25-35.
2. Zhao X-D, Yu Y-J, Wu Y-J. Improving low-frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plate combined with Helmholtz resonators. *Applied Acoustics*. 2016;114:92-8.
3. Jayamani E, Hamdan S, editors. Sound absorption coefficients natural fibre reinforced composites. *Advanced Materials Research*; 2013: Trans Tech Publ.
4. Koronis G, Silva A, Fontul M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*. 2013;44(1):120-7.
5. Taban E, Mirzaei R, Faridan M, Samaei E, Salimi F, Tajpoor A, et al. Morphological, acoustical, mechanical and thermal properties of sustainable green Yucca (Y. gloriosa) fibers: an exploratory investigation. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2020;18(2):883-96.
6. Choe H, Sung G, Kim JH. Chemical treatment of wood fibers to enhance the sound absorption coefficient of flexible polyurethane composite foams. *Composites Science and Technology*. 2018;156:19-27.
7. Taban E, Soltani P, Berardi U, Putra A, Mousavi SM, Faridan M, et al. Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications. *Building and Environment*. 2020;180:107087.
8. Meon MS, Othman MF, Husain H, Remeli MF, Syawal MSM. Improving tensile properties of kenaf fibers treated with sodium hydroxide. *Procedia Engineering*. 2012;41:1587-92.
9. Schiavoni S, Bianchi F, Asdrubali F. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;62:988-1011.
10. Samaei SE, Mahabadi HA, Mousavi SM, Khavanin A, Faridan M, Taban E. The influence of alkaline treatment on acoustical, morphological, tensile and thermal properties of Kenaf natural fibers. *Journal of Industrial Textiles*. 2020:1528083720944240.
11. Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov K. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building*

ZnO-TiO<sub>2</sub> قادر به جلوگیری از انتشار و تولید دود است. این نشان می‌دهد که کامپوزیت معدنی ZnO-TiO<sub>2</sub> می‌تواند به عنوان یک عمل بازدارندگی شعله و آتش‌گیری در ساخت کامپوزیت‌های طبیعی استفاده شود.

تاکنون مواد مختلفی به عنوان جاذب‌های صوتی شناسایی و به صورت منفرد و یا ترکیبی استفاده شده است. با توجه به ورود گسترده ی نانومواد در عرصه‌های مختلف علمی، یکی از کاربردهای آن طراحی و استفاده ی جاذب‌های صوتی محتوای نانومواد می‌باشد. نانوذرات، با توجه به اینکه سطح ویژه ی وسیعی نسبت به مواد متخلخل و سایر مواد مورد استفاده در صنعت دارند، دارای خواص متفاوتی نیز از نظر جذب صوتی هستند (۱۷، ۱)؛ که احتیاج به تحقیقات گسترده دارد و می‌تواند مورد توجه محققان قرار گیرد. در این راستا، ضریب جذب آکوستیکی الیاف طبیعی کف با و بدون پوشش نانوذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> با استفاده از لوله ی امپدانس مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همان‌طور که بیان شد، الیاف خام نسبت به الیاف طبیعی پوشش داده شده به نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> از ضریب جذب صوتی کمتری برخوردار بودند؛ که این می‌تواند به دلیل غوطه‌ورسازی الیاف طبیعی در داخل نانوموادها باشد؛ که باعث شده است منافذ باز در مواد متخلخل بسته شود. از طرف دیگر، بهبود مکانیسم جذب صوتی در کامپوزیت‌های آکوستیکی پوشش داده شده با نانوذرات، مبتنی بر این واقعیت است که محدوده ی جذب کامپوزیت، به دلیل افزایش سطح تماس موج صوتی با بستر کامپوزیت و همچنین افزایش تعداد زیادی نانو منفذهای ایجاد شده در سطح کامپوزیت، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (۱۸). با توجه به نانوذرات قرارگرفته در سطح کامپوزیت‌های آکوستیکی و محل قرارگیری هنگام برخورد موج صوتی، این مواد با پراکند کردن انرژی برخوردی به شکل کانال‌های مجزا و تبدیل آن به گرما، سبب میرایی موج صوتی و افزایش جذب صوتی خواهند شد (۳۶، ۳۷).

درنهایت می‌توان بیان داشت که اصلاح الیاف توسط نانوذرات، جهت بهبود خواص آتش‌گیری و آکوستیکی الیاف طبیعی کف مؤثر واقع شده است. نتایج مطالعه ی حاضر، مؤید تأثیر نانو ذرات ZnO-TiO<sub>2</sub> در بهبود خواص الیاف کف است و با توجه به مزایای برجسته ی الیاف طبیعی (مزایای اقتصادی و محیط زیستی) و افزایش استفاده از این دسته از الیاف به عنوان کامپوزیت‌های آکوستیکی چندمنظوره، فرآیند پوشش‌دهی الیاف با نانوذرات، روش مناسبی برای بهبود خواص کلی

- and photocatalytic properties of cellulosic fabric coated by nano-sized titanium dioxide. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2011;104(2):717-24.
26. Roohani M, Habibi Y, Belgacem NM, Ebrahim G, Karimi AN, Dufresne A. Cellulose whiskers reinforced polyvinyl alcohol copolymers nanocomposites. *European polymer journal*. 2008;44(8):2489-98.
  27. Guo J, Xu Y, Chen X, Hu S, He M, Qin S. Influences of organic montmorillonite on the combustion behaviors and thermal stability of polyamide 6/polystyrene blends. *High Performance Polymers*. 2015;27(4):392-401.
  28. Kord B. Thermal properties and fire behavior of PLA nanocomposite films. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*. 2017;23(ویژهنامه 2):202-185.
  29. Lee S, Kang I, Doh G, Kim W, Kim J, Yoon HG, et al. Thermal, mechanical and morphological properties of polypropylene/clay/wood flour nanocomposites. *Express Polym Lett*. 2008;2(2):78-87.
  30. Wang D-Y, Leuteritz A, Wang Y-Z, Wagenknecht U, Heinrich G. Preparation and burning behaviors of flame retarding biodegradable poly (lactic acid) nanocomposite based on zinc aluminum layered double hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*. 2010;95(12):2474-80.
  31. González A, Dasari A, Herrero B, Plancher E, Santarén J, Esteban A, et al. Fire retardancy behavior of PLA based nanocomposites. *Polymer degradation and stability*. 2012;97(3):248-56.
  32. LeBaron PC, Wang Z, Pinnavaia TJ. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied clay science*. 1999;15(1-2):11-29.
  33. Younis A. Flammability properties of polypropylene containing montmorillonite and some of silicon compounds. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2017;26(1):1-7.
  34. Qin H, Zhang S, Zhao C, Hu G, Yang M. Flame retardant mechanism of polymer/clay nanocomposites based on polypropylene. *Polymer*. 2005;46(19):8386-95.
  35. Yang D, Sarina S, Zhu H, Liu H, Zheng Z, Xie M, et al. Capture of radioactive cesium and iodide ions from water by using titanate nanofibers and nanotubes. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011;50(45):10594-8.
  36. Asadi Khanouki M, Ohadi A. Improved acoustic damping in polyurethane foams by the inclusion of silicon dioxide nanoparticles. *Advances in Polymer Technology*. 2018;37(8):2799-810.
  37. Yıldırım B, Sancak A, Navidfar A, Trabzon L, Orfali W. Acoustic properties of polyurethane compositions enhanced with multi-walled carbon nanotubes and silica nanoparticles: Akustische Eigenschaften von durch mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhren und Silizium-Nanopartikel verstärkten Polyurethan-Verbundwerkstoffen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2018;49(8):978-85.
  - Acoustics. 2012;19(4):283-311.
  12. Martellotta F, Cannavale A, De Matteis V, Ayr U. Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder. *Applied Acoustics*. 2018;141:71-8.
  13. Taban E, Valipour F, Abdi DD, Amininasab S. Mathematical and experimental investigation of sound absorption behavior of sustainable kenaf fiber at low frequency. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020.
  14. Bourbigot S, Duquesne S. Fire retardant polymers: recent developments and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*. 2007;17(22):2283-300.
  15. Li J, Yu H, Sun Q, Liu Y, Cui Y, Lu Y. Growth of TiO<sub>2</sub> coating on wood surface using controlled hydrothermal method at low temperatures. *Applied Surface Science*. 2010;256(16):5046-50.
  16. Mathew J, Joy J, George SC. Potential applications of nanotechnology in transportation: A review. *Journal of King Saud University-Science*. 2019;31(4):586-94.
  17. Madushika JWA, Lanarolle WDG. A review on novel approaches to enhance sound absorbing performance using textile fibers. *The Journal of The Textile Institute*. 2021:1-8.
  18. Bahrmbeygi H, Sabetzadeh N, Rabbi A, Nasouri K, Shoushtari AM, Babaei MR. Nanofibers (PU and PAN) and nanoparticles (Nanoclay and MWNTs) simultaneous effects on polyurethane foam sound absorption. *Journal of Polymer Research*. 2013;20(2):1-10.
  19. Sun Q, Yu H, Liu Y, Li J, Cui Y, Lu Y. Prolonging the combustion duration of wood by TiO<sub>2</sub> coating synthesized using cosolvent-controlled hydrothermal method. *Journal of Materials Science*. 2010;45(24):6661-7.
  20. Zhou L, Fu Y. Flame-retardant wood composites based on immobilizing with chitosan/sodium phytate/nano-TiO<sub>2</sub>-ZnO coatings via layer-by-layer self-assembly. *Coatings*. 2020;10(3):296.
  21. Morgan AB, Gagliardi NA, Price WA, Galaska ML. Cone calorimeter testing of S2 glass reinforced polymer composites. *Fire and Materials: An International Journal*. 2009;33(7):323-44.
  22. Standard B. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes—part 2: Transfer-function method. *BS EN ISO*. 2001:10534-2.
  23. Sun Q, Lu Y, Xia Y, Yang D, Li J, Liu Y. Flame retardancy of wood treated by TiO<sub>2</sub>/ZnO coating. *Surface Engineering*. 2012;28(8):555-9.
  24. Özgür Ü, Alivov YI, Liu C, Teke A, Reshchikov M, Doğan S, et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of applied physics*. 2005;98(4):11.
  25. Moafi HF, Shojaie AF, Zanjanchi MA. Flame-retardancy