



## Original Research Article - Extended Abstract

# Hydroxyapatite Bioceramic Heat Transfer Comparison in Water and Simulated Body Fluid after Addition of Carbon Nanotube

Omid Malekhamadi <sup>1</sup>, Mahdi Kalantar <sup>2\*</sup>, Mohsen Nouri Khezrabad <sup>3</sup><sup>1</sup> M. Sc. Student, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Yazd, Iran<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Yazd, Iran<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Yazd, Iran\*Corresponding Author's Email: [mkalantar@yazd.ac.ir](mailto:mkalantar@yazd.ac.ir) (M. Kalantar)**Paper History:**

Received: 2021-07-04

Revised in revised form: 2021-08-30

Scientific Accepted: 2021-09-14

**Keywords:**Thermal Conductivity,  
Hydroxyapatite,  
Carbon Nanotube,  
Dental Coating,  
Nanofluid

**Abstract** Although Hydroxyapatite (HA) is one of the biocompatible and insulating ceramics, Carbon Nanotube (CNT) is superior due to its high thermal conductivity. This research aims to compare the thermal conductivity of HA/CNT composite in two fluids, i.e., water and Simulated Body Fluid (SBF), to achieve simultaneous biocompatibility and thermal conductivity for dental coatings. To this end, followed by synthesizing the hydroxyapatite, the HA nanofluid was made, and the prepared carbon nanotube was added to the HA nanofluid (volume ratio of HA:CNT was 1:1) to achieve the hybrid nanofluid with different volume fractions (0.2 to 1.0 Vol %). The thermal conductivity was then measured for the two water and SBF fluids in the temperature range of 20 to 50 °C. The results showed that 1.0 Vol % sample of the hybrid nanofluid had the maximum thermal conductivity enhancement compared to the SBF-based hybrid and water-based hybrid nanofluids with 32 % and 20 % enhancement, respectively, at 50 °C.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.293503.1181>URL: [https://www.jamt.ir/article\\_160874.html](https://www.jamt.ir/article_160874.html)

## 1. INTRODUCTION

Dispersion of solid nanoparticles in a liquid is called "nanofluid" [1]. In medical or industrial applications, solid nanoparticles can be carbon-based materials, polymers, ceramics, etc., and the fluid can be water, ethylene glycol, blood, etc. [2]. To achieve the desired properties, hybrid nanofluid with more than one type of nanomaterials [3] is more commonly used. For instance, Hydroxyapatite (HA) nanopowder is characterized by good biocompatibility properties, yet it is insulated. On the contrary, carbon-based materials such as Carbon Nanotubes (CNTs) have excellent thermal conductivity but they lack biocompatibility [4]. Therefore, a mixture of these two nanomaterials will ensure both biocompatibility and thermal conductivity [5]. With the rapid progress in modern dentistry, high-energy tools such as dental lasers and optical deposition devices are increasingly used in dental surgeries such as laser tooth whitening and restoration, hypersensitivity treatment, and deposition of dental restorative materials. During these treatments, quite high temperature is applied on the surface and inside of the tooth which may cause Tooth Thermal Pain (TTP). Although these dental treatment methods are widely used, the basic mechanisms are not completely clear. Therefore, a comprehensive study should be carried out to better elaborate the process of heat transfer and the consequent thermal damages to teeth. This will in turn improve the design and optimization of clinical treatment strategies.

Malekhamadi et al. [6] in their research calculated the values of TCE of HA nanofluid in water and Simulated Body Fluid (SBF) as -6.0 % and -9.0 %, respectively. Li et al. [7] in their study added the CNT to titanium dioxide in water/ethylene glycol and then discovered an increase in the thermal conductivity of the hybrid nanofluid up to +56.48 %. Du et al. [8] found that followed by adding CNT to iron oxide in water, the thermal conductivity of the hybrid nanofluid increased up to +23.33 %.

This research made a comparison of the thermal conductivity of the HA/CNT composite in two fluids, i.e., water and SBF, to achieve simultaneous biocompatibility and thermal conductivity for dental coatings. In this regard, followed by synthesizing the hydroxyapatite, the HA nanofluid was made, and the prepared carbon nanotube was added to the HA nanofluid (volume ratio of HA:CNT was 1:1) to achieve the hybrid nanofluid with different volume fractions ranging from 0.2 to 1.0 Vol %. The thermal conductivity was then measured for the two fluids under study at temperatures of 20, 25, 30, 35, 40, 45, and 50 °C. The current study primarily aimed to determine the permissible temperature range for HA/CNT dental coatings to prevent TTP and improve the design and optimization of the clinical treatment strategies.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Nanofluid preparation

Please cite this article as: Malekhamadi, O., Kalantar, M., Nouri Khezrabad, M., "Hydroxyapatite bioceramic heat transfer comparison in water and simulated body fluid after addition of carbon nanotube", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 11, No. 1, (2022), 95-105. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.293503.1181>).



To prepare the nanofluid, different Vol % of composite powder (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1) were added to the water fluid or SBF and stirred for two hours using a magnetic stirrer. Then, homogenization was done using an ultrasonic device for 10 minutes, and carboxyl methyl cellulose was added to the nanofluids for more stability.

## 2.2. Thermal conductivity measurements

The thermal conductivity of the HA-CNT nanofluids with different volume fractions was measured using KD2 PRO device equipped with a KS1 sensor made of stainless steel at temperatures of 20, 25, 30, 35, 40, 45, and 50 °C. To evaluate the uncertainty of the obtained results, each sample test was repeated three times at a certain temperature. The value of Thermal Conductivity Enhancement (TCE) can be calculated through the following equation [6]:

$$\text{TCE (\%)} = \frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} * 100 \quad (1)$$

where  $k_{nf}$  is the thermal conductivity of the nanofluid, and  $k_{bf}$  the thermal conductivity of the base fluid. Laboratory equipment for thermal conductivity

measurement included water bath, KD2 PRO device, and different fluid content samples.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Thermal conductivity

The thermal conductivity of the two nanofluids was measured for the volume fractions of 0.2 to 1 Vol % in the temperature range of 25 to 50 °C. The thermal conductivity increased upon increasing either temperature or volume fraction. The reason behind the greater effect of temperature on an increase in the conductivity of nanofluids with a higher volume fraction was the Brownian motion at higher temperatures [6]. The results showed that an increase in either temperature or volume fraction does not similarly increase the thermal conductivity of nanofluids due to the non-uniformity of the increasing slope. Figure 1 makes a comparison of the TCE in water and SBF fluids with an increase in the volume fraction. In addition, Figure 2 makes a 3D comparison of TCE in water and SBF fluids. The results of Figure 1 revealed that the TCE of nonaqueous-based nanofluid (SBF nanofluid) was higher than that of aqueous-based nanofluid. In fact, addition of CNT to the HA SBF-based nanofluid has a greater effect on the TCE compared to the addition of CNT to the HA water-based nanofluid.

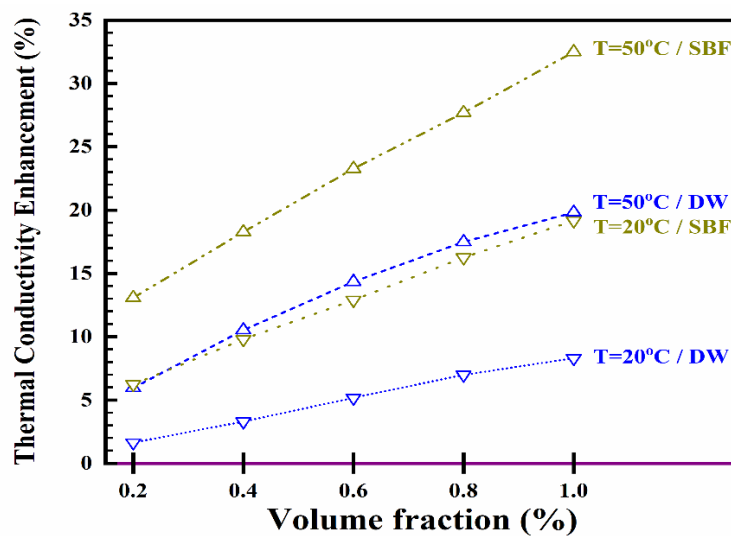


Figure 1. Comparison of the TCE in water and SBF fluids

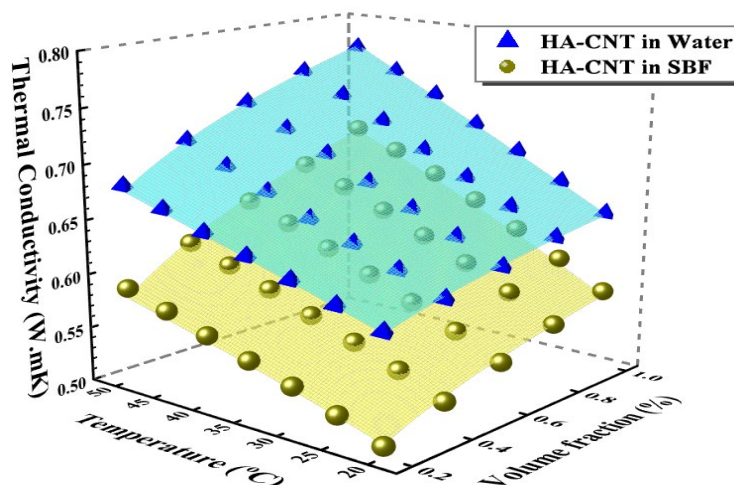


Figure 2. 3D comparison of thermal conductivity in two fluids, water and SBF

#### 4. CONCLUSION

For both water and SBF, with an increase in the HA-CNT Vol % and temperature, the thermal conductivity of the mentioned nanofluids would considerably increase. The highest TCE value of 32 % was measured for the SBF-based nanofluid with 1 Vol % of HA-CNT at the temperature of 50 °C while in similar conditions, the TCE value for water-based nanofluid was obtained as 20 %. For future research works, HA-Graphene (and its Oxide) can be substituted by HA-CNT.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful for the support of the Mining and Metallurgy Laboratory at Yazd University and Advanced Materials Research Institute at Islamic Azad University, Najafabad branch.

#### REFERENCES

1. Ganvir, R. B., Walke, P. V., Kriplani, V. M., "Heat transfer characteristics in nanofluid—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, (2017), 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.010>
2. Sheikholeslami, M., Rokni, H. B., "Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, Part B, (2017), 1203-1233. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.108>
3. Bakthavatchalam, B., Habib, K., Saidur, R., Saha, B. B., Irshad, K., "Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 305, (2020), 112787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>
4. Bhattacharya, M., Seong, W. J., "Carbon nanotube-based materials—Preparation, biocompatibility, and applications in dentistry", *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry*, (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815886-9.00003-6>
5. Janković, A., Eraković, S., Mitrić, M., Matić, I. Z., Juranić, Z. D., Tsui, G. C., Tang, C. Y., Mišković-Stanković, V., Rhee, K. Y., Park, S. J., "Bioactive hydroxyapatite/graphene composite coating and its corrosion stability in simulated body fluid", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 624, (2015), 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.078>
6. Malekahmadi, O., Kalantar, M., Nouri-Khezrabad, M., "Effect of carbon nanotubes on the thermal conductivity enhancement of synthesized hydroxyapatite filled with water for dental applications: Experimental characterization and numerical study", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, No. 6, (2021), 2109-2126. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10593-w>
7. Li, Y., Moradi, I., Kalantar, M., Babadi, E., Malekahmadi, O., Mosavi, A., "Synthesis of new dihybrid nanofluid of TiO<sub>2</sub>/MWCNT in water–ethylene glycol to improve mixture thermal performance: Preparation, characterization, and a novel correlation via ANN based on orthogonal distance regression algorithm", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, No. 6, (2021), 2587-2603. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10392-9>
8. Du, C., Nguyen, Q., Malekahmadi, O., Mardani, A., Jokar, Z., Babadi, E., D'Orazio, A., Karimipour, A., Li, Z., Bach, Q. V., "Thermal conductivity enhancement of nanofluid by adding multiwalled carbon nanotubes: Characterization and numerical modeling patterns", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, (2020). <https://doi.org/10.1002/mma.6466>



مقاله کامل پژوهشی

## مقایسه انتقال حرارت زی‌سرامیک هیدروکسی‌آپاتیت در آب و مایع شبیه‌ساز بدن پس از اضافه کردن نانولوله‌های کربنی

امید ملک‌احمدی<sup>۱</sup>، مهدی کلانتر<sup>۲\*</sup>، محسن نوری خضرآباد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

پذیرش علمی: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

### کلیدواژه‌ها:

هدایت حرارتی،

هیدروکسی‌آپاتیت،

نانولوله‌های کربنی،

پوشش‌دهی دندانی،

نانوسیال

**چکیده** درحالی‌که هیدروکسی‌آپاتیت، یکی از زی‌سرامیک‌های زیست‌سازگار و عایق است، نانولوله‌های کربنی از قابلیت هدایت حرارتی بالایی برخوردارند. این پژوهش با هدف مقایسه هدایت حرارتی چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله کربنی، در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن به منظور دستیابی هم‌زمان به زیست‌سازگاری و هدایت حرارتی برای پوشش‌دهی دندانی انجام شد. در این مطالعه، پس از سنتز هیدروکسی‌آپاتیت، نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت ساخته و نانولوله‌های کربنی آماده‌سازی شده (با نسبت حجمی هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله کربنی معادل ۱) به آن اضافه شد تا نانوسیال با درصدهای حجمی مختلف (۰/۲ تا ۱) از ماده چندسازه‌ای به دست آید. آزمون‌های پراش پرتوی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) برای مشخصه‌یابی نانومواد و مواد چندسازه‌ای انجام شد. اندازه‌گیری هدایت حرارتی برای هر دو نانوسیال چندسازه‌ای بر پایه آب و مایع شبیه‌ساز بدن در بازه دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نشان داد که بالاترین درصد افزایش هدایت حرارتی در نانوسیال چندسازه‌ای، مربوط به نمونه یک درصد حجمی است؛ به‌طوری‌که برای نانوسیال چندسازه‌ای بر پایه آب، افزایش ۲۰ درصدی و برای نانوسیال چندسازه‌ای بر پایه مایع شبیه‌ساز بدن، افزایش ۳۲ درصدی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس حاصل می‌شود.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.293503.1181> URL: [https://www.jamt.ir/article\\_160874.html](https://www.jamt.ir/article_160874.html)

### ۱- مقدمه

پراکندگی نانوذرات جامد در یک مایع را «نانوسیال» می‌نامند [۱ و ۲]. در کاربردهای پزشکی یا صنعتی، نانوذرات جامد می‌توانند مواد مبتنی بر کربن، پلیمرها، سرامیک‌ها و غیره باشند و سیال نیز می‌تواند آب، اتیلن گلیکول، خون و غیره باشد [۳-۶]. از کاربردهای صنعتی نانوسیال، می‌توان به موارد انتقال حرارت، مبدل‌های حرارتی در دستگاه‌های خنک‌کننده،

جمع‌کننده‌های خورشیدی و غیره اشاره کرد [۷-۹]. برای کاربردهای پزشکی نیز می‌توان دارورسانی هوشمند، تأثیر گرانش در صنایع غذایی، کاشتینه‌های دندانی و غیره را نام برد. برای دستیابی به خواص مطلوب، نانوسیال ترکیبی (بیش از یک نوع نانومواد) [۱۰] کاربردهای بیشتری دارد. به‌عنوان مثال، نانوپودر هیدروکسی‌آپاتیت خاصیت زیست‌سازگاری خوبی دارد؛ اما عایق است؛ درحالی‌که، مواد مبتنی بر کربن<sup>۳</sup> از هدایت

<sup>۱</sup> Nanofluid

<sup>۲</sup> Implant

<sup>۳</sup> Carbon-Based Materials

لمینت دندانانی مانند مقاومت در برابر سایش و خوردگی، ترشوندگی، چسبندگی و زیست‌سازگاری را اصلاح کند [۲۰-۲۳].

ملک‌احمدی و همکاران [۲۴] در پژوهش خود، افزایش هدایت حرارتی نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت در آب و مایع شبیه‌ساز بدن را به ترتیب ۶- درصد و ۹- درصد محاسبه کردند. لی<sup>۸</sup> و همکاران [۲۵] در پژوهش خود، پس از افزودن نانولوله‌های کربنی به دی‌اکسید تیتانیم در آب/اتیلن گلیکول، افزایش هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی را ۵۶/۴۸+ درصد ذکر کردند. دو<sup>۹</sup> و همکاران [۲۶] در پژوهش خود، پس از افزودن نانولوله‌های کربنی به اکسید آهن<sup>۱۰</sup> در آب، افزایش هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی را ۳۳/۲۳ درصد ارزیابی کردند.

این مطالعه با هدف مقایسه هدایت حرارتی چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن به منظور دستیابی هم‌زمان به زیست‌سازگاری و هدایت حرارتی برای پوشش‌دهی کاشتینه دندانانی انجام شد. در این پژوهش پس از سنتز هیدروکسی‌آپاتیت، نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت ساخته و نانولوله‌های کربنی آماده‌سازی شده با نسبت حجمی هیدروکسی‌آپاتیت-نانولوله‌های کربنی معادل ۱ به آن اضافه شد تا نانوسیال با درصدهای حجمی مختلف (۰/۲ تا ۱) از ماده چندسازه‌ای حاصل شود. آزمون‌های پراش پرتوی ایکس<sup>۱۱</sup> (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۱۲</sup> (FESEM) به منظور مشخصه‌یابی نانومواد و مواد چندسازه‌ای انجام شد. اندازه‌گیری هدایت حرارتی چندسازه برای دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن در دماهای ۲۰، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس انجام شد. هدف اصلی این پژوهش، تعیین محدوده اعمال دمای مجاز برای پوشش دندانانی هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی جهت جلوگیری از احساس درد حرارتی دندان و همچنین بهبود طراحی و بهینه‌سازی راهبردهای درمان بالینی بود.

حرارتی عالی برخوردارند، در عوض، زیست‌سازگاری مناسبی ندارند [۱۱]. بنابراین، با مخلوط این دو نوع نانومواد، می‌توان به هر دو ویژگی زیست‌سازگاری و هدایت حرارتی دست یافت [۱۲ و ۱۳].

در بسیاری از کاربردهای زیست‌پزشکی، انتقال حرارت نقش مهمی در درمان‌های زم‌زیست‌شناسی<sup>۱</sup> و زیست‌شناسی بیش‌گرمایی<sup>۲</sup> دارد. در این کاربردها، از انحراف حرارتی<sup>۳</sup> به‌طور انتخابی برای حفظ یا تخریب سلول‌ها و بافت‌ها استفاده می‌شود. با پیشرفت سریع در دندانپزشکی نوین، ابزارهای پُر انرژی<sup>۴</sup> مانند لیزرهای دندانانی و دستگاه‌های بسپارش نوری<sup>۵</sup> به‌طور فزاینده‌ای در جراحی دندان مانند ترمیم و سفیدسازی دندان با لیزر، درمان بیش‌حساسی<sup>۶</sup> و بسپارش مواد ترمیم‌کننده دندانانی استفاده می‌شوند. در طی این درمان‌ها، بر سطح و داخل دندان، دمای بسیار بالایی اعمال می‌شود که ممکن است احساس درد حرارتی دندان<sup>۷</sup> را ایجاد کند. با اینکه این روش‌های درمانی دندانپزشکی، کاربرد گسترده‌ای دارند، سازوکارهای اساسی، کاملاً مشخص نیستند. بنابراین، برای درک بهتر روند انتقال حرارت در دندان و آسیب حرارتی دندان، به مطالعه‌ای جامع نیاز است. این امر باعث بهبود طراحی و بهینه‌سازی راهبردهای درمان بالینی می‌شود.

هیدروکسی‌آپاتیت، یکی از زی‌سرامیک‌هایی است که در دهه گذشته به دلیل زیست‌سازگاری بالا و استخوان‌سازی در دندانپزشکی به‌کار رفته است [۱۴ و ۱۵]. با ادامه پیشرفت در روش‌های پوشش‌دهی کاشتینه دندانانی، تقاضای فزاینده‌ای برای مواد مصنوعی دندانانی مانند زی‌سرامیک‌های هیدروکسی‌آپاتیت وجود دارد [۱۶-۱۹]. همچنین، نانولوله‌های کربنی، یکی از مواد مبتنی بر کربن است که به دلیل هدایت گرمایی/الکتریکی بالا در دهه گذشته در کاربردهای پزشکی در نظر گرفته شده است [۱۱]. خواص زیستی کاشتینه دندانانی (آلیاژ Ti-6Al-4V) و لمینت‌های دندانانی را می‌توان با پوشش‌های چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت بهبود بخشید. یکی از این پوشش‌های چندسازه‌ای، هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی است که می‌تواند ویژگی‌های سطحی و زیستی کاشتینه دندانانی و پوشش

<sup>7</sup> Tooth Thermal Pain

<sup>8</sup> Yicheng Li

<sup>9</sup> Congcong Du

<sup>10</sup> Iron (II, III) Oxide

<sup>11</sup> X-Ray Powder Diffraction

<sup>12</sup> Field Emission Scanning Electron Microscope

<sup>1</sup> Cryobiology

<sup>2</sup> Hyperthermic Biology

<sup>3</sup> Thermal Excursions

<sup>4</sup> High-Energy

<sup>5</sup> Light Polymerizing Units

<sup>6</sup> Hypersensitivity Treatment

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- آماده‌سازی مواد

در ابتدا، هیدروکسی‌آپاتیت با فرمول شیمیایی  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ، به روش حرارتی- مکانیکی ستر شد [۲۷]. استخوان ران گاو به مدت ۴ ساعت در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، در کوره مافلی حرارت داده شد. سپس، خردایش آن به مدت ۶ ساعت در آسیاب گلوله‌ای با محفظه و گلوله‌های زیرکونیایی انجام شد. به‌منظور تولید پودر همگن چندسازه‌ای، مخلوط هیدروکسی‌آپاتیت سترشده و نانولوله‌های کربنی (به نسبت حجمی مساوی) در آسیاب گلوله‌ای به مدت ۲۰ ساعت مورد آسیاکاری قرار گرفت.

### ۲-۲- آماده‌سازی نانوسیال

برای تهیه نانوسیال چندسازه‌ای، درصدهای حجمی مختلفی از پودر چندسازه‌ای (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱) به سیال آب یا مایع شبیه‌ساز بدن اضافه شد و به مدت ۲ ساعت توسط دستگاه همزن مغناطیسی<sup>۱</sup> هم‌زده شد. سپس، همگن‌سازی توسط یک دستگاه فراصوت<sup>۲</sup> به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد و برای پایداری بیشتر نانوسیال‌ها، کربوکسیل متیل سلولز<sup>۳</sup> به آن‌ها اضافه شد.

به‌منظور ساخت مایع شبیه‌سازی‌شده بدن (SBF)، ابتدا دو محلول A و B (جدول ۱) به‌صورت مجزا تهیه شدند؛ برای این امر، درون دو بشر به‌صورت مجزا، ۸۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر ریخته، دمای آن‌ها به ۳۷ درجه سلسیوس رسانده و روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. ۰/۹۳۴ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۱ مولار به هریک از دو بشر اضافه شد و فرصت داده شد تا کاملاً در آب حل شود. مجدداً ۲۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر دیگر به هریک از دو بشر اضافه شد. در ادامه به‌ترتیب، نمک‌های نام‌برده و با مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱ به‌منظور تهیه محلول‌های A و B به دو بشر افزوده شدند. لازم‌به‌ذکر است که بعد از اضافه کردن هر نمک، زمان کافی داده شد تا نمک به‌طور کامل در محلول حل شود. با مخلوط کردن محلول A و B با مقادیر مساوی و رساندن دمای آن به ۳۷ درجه سلسیوس، مایع شبیه‌سازی‌شده بدن حاصل شد.

این دو محلول از لحاظ ترمودینامیکی پایدارند و می‌توان

آن‌ها را در دمای محیط نگهداری کرد؛ البته ظروف پلی‌پروپیلن برای نگهداری ارجحیت دارند. لازم به ذکر است، در رابطه با تکثیر زیستی در محلول A باید مراقب بود و آن را در یک محل تاریک نگهداری کرد و یا مقادیر جزئی فرمالدهید یا سدیم آزید<sup>۴</sup> به آن افزود. در این مقاله از روش نگهداری محلول در محیط تاریک استفاده شد.

جدول ۱. مواد تشکیل‌دهنده مایع شبیه‌ساز بدن [۲۴]

| محلول |       | اسید/نمک                                                     |
|-------|-------|--------------------------------------------------------------|
| B     | A     |                                                              |
| ۰/۹۳۴ | ۰/۹۳۴ | HCl<br>یک مول (میلی‌لیتر)                                    |
| ۶/۱۲۹ | ۶/۱۲۹ | NaCl<br>(گرم)                                                |
| --    | ۵/۸۹۰ | NaHCO <sub>3</sub><br>(گرم)                                  |
| --    | ۰/۴۹۸ | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O<br>(گرم) |
| ۰/۵۴۰ | --    | CaCl <sub>2</sub><br>(گرم)                                   |

### ۲-۳- اندازه‌گیری هدایت حرارتی

هدایت حرارتی نانوسیال‌های چندسازه‌ای هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی با کسر حجمی متفاوت، توسط دستگاه KD2 PRO با حسگر KS1، ساخته‌شده از فولاد ضدزنگ، در دماهای ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. برای یافتن عدم قطعیت نتایج، آزمایش هر نمونه در دمای مشخص، سه بار تکرار شد. درصد افزایش هدایت حرارتی از معادله زیر به‌دست آمد [۲۴]:

$$\text{TCE (\%)} = \frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} * 100 \quad (۱)$$

که در آن TCE، افزایش هدایت حرارتی،  $k_{nf}$ ، هدایت حرارتی نانوسیال چندسازه‌ای و  $k_{bf}$ ، هدایت حرارتی سیال پایه است. تجهیز آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی شامل: حمام آب<sup>۵</sup>، دستگاه KD2 PRO و نمونه‌های محتوی سیال

<sup>۴</sup> Sodium Azide

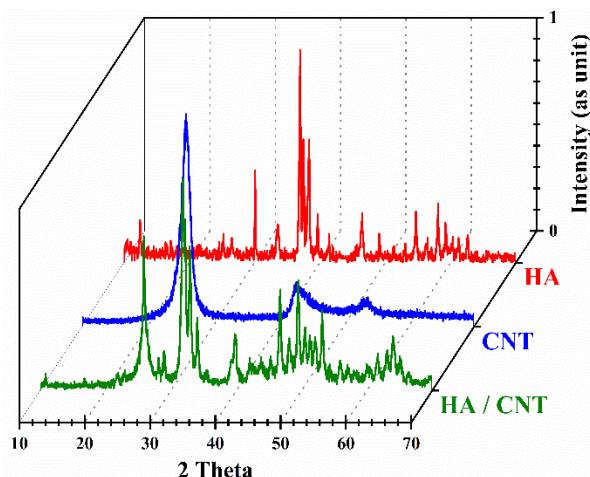
<sup>۵</sup> Water Bath

<sup>۱</sup> Magnetic-Stirrer

<sup>۲</sup> Sonicator

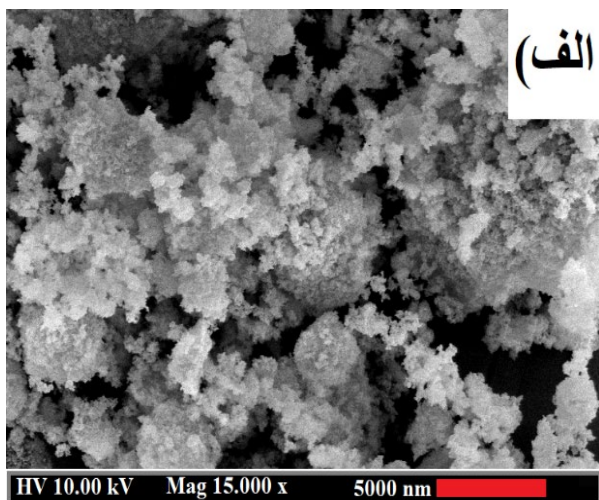
<sup>۳</sup> Carboxyl Methyl Cellulose

وجود قله‌های  $2\theta = 31/82$  و  $2\theta = 25/86$  درجه به ترتیب با فاصله بین‌لایه‌ای  $3/4418$  و  $2/8101$  آنگستروم که قله‌های مشخصه هیدروکسی‌آپاتیت و نانولوله‌های کربنی هستند، ترکیب این دو ماده را تأیید می‌کنند.



شکل ۱. الگوی XRD هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده، نانولوله‌های کربنی و چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی بر مبنای واحد

در شکل ۲، تصاویر میکروسکوپی هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده در مقیاس ۵ میکرومتر و ۵۰۰ نانومتر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ریخت‌شناسی سطح هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده دارای ساختار صفر بُعدی است؛ به این معنی که ذرات، دارای ریخت‌شناسی کروی و در ابعاد نانو هستند. ابعاد این ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر است.



متفاوت بود. برای هر کسر حجمی، اندازه‌گیری هدایت حرارتی به ترتیب از دمای ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس، با گام پنج درجه سلسیوس، انجام شد.

## ۲-۴-۲- مشخصه‌یابی پودر

### ۲-۴-۲-۱- فاز یابی

برای شناسایی فازهای موجود در نانوپودر سنتز شده هیدروکسی‌آپاتیت و همچنین نانوپودر چندسازه‌ای، از آزمون XRD، با دستگاه D8ADVANCE، استفاده شد. این آزمون، به وسیله پرتوی ایکس Cu-K $\alpha$ ، طول موج  $1/54$  آنگستروم، با نرخ رویش  $0/02$  درجه و زمان توقف هر گام ۱ ثانیه، در محدوده زاویه  $2\theta$  برابر ۱۰ تا ۷۰ درجه، انجام شد.

### ۲-۴-۲-۲- ریز ساختار

مطالعه ریز ساختار نانوپودرها و نانوپودر چندسازه‌ای پس از فلزنگاری<sup>۱</sup> نمونه‌ها، با استفاده از FESEM، مدل FEI NOVA NanoSEM450، با ولتاژ ۱۰ کیلوولت، انجام شد. قبل از آن، سطح نمونه، با روکشی از طلا پوشش داده شد تا با ایجاد رسانایی، از تجمع بار الکتریکی روی سطح، جلوگیری شود.

## ۳- نتایج و بحث

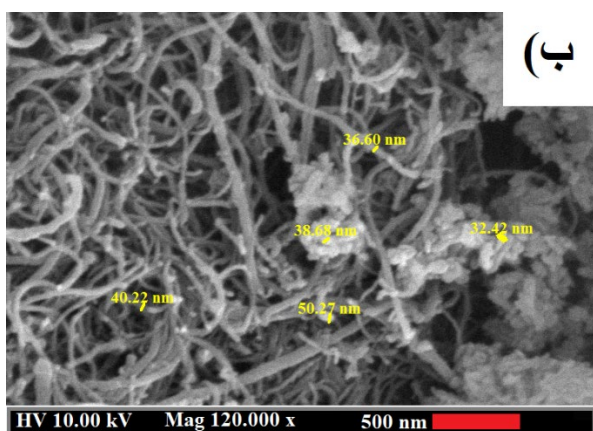
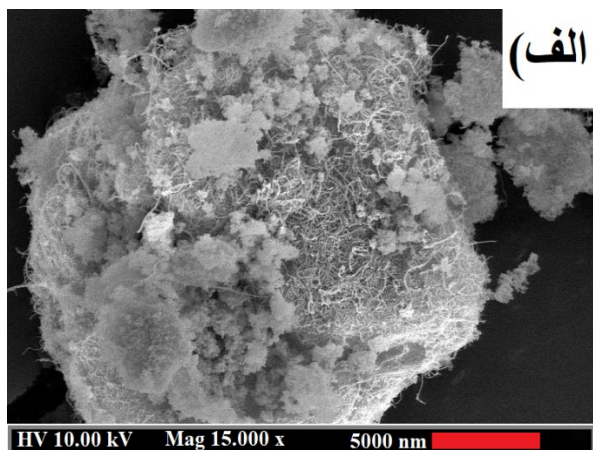
### ۳-۱- مشخصه‌یابی

در شکل ۱، الگوی XRD سه ماده هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده، نانولوله‌های کربنی و چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده دارای قله مشخصه در  $2\theta = 37$  درجه با فاصله بین‌لایه‌ای<sup>۲</sup>  $2/4274$  آنگستروم است. با توجه به انطباق کامل سایر قله‌ها با کارت استاندارد  $0274-230-96$ ، تشکیل کامل هیدروکسی‌آپاتیت تأیید می‌شود. همچنین، نانولوله کربنی دارای سه قله مشخصه در  $2\theta = 25/9$ ،  $2\theta = 42/76$  و  $2\theta = 53/77$  درجه، به ترتیب با فاصله بین‌لایه‌ای  $3/4366$ ،  $2/1128$  و  $1/7034$  آنگستروم است. وجود این سه قله، حضور نانولوله‌های کربنی خالص را تأیید می‌کند. در مورد چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی،

<sup>2</sup> D-Lattice Spacing

<sup>1</sup> Metallography

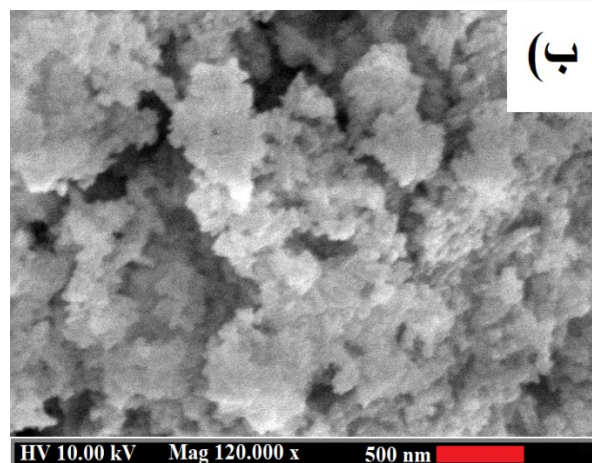
در شکل ۴، تصاویر میکروسکوپی از چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی در مقیاس ۵ میکرومتر و ۵۰۰ نانومتر ارائه شده است. مطابق شکل، پر شدن فضای خالی بین ذرات هیدروکسی‌آپاتیت توسط نانولوله‌های کربنی و ترکیب این دو ماده قابل مشاهده است. لازم به ذکر است پراکندگی نانولوله‌های کربنی در زمینه هیدروکسی‌آپاتیت پس از آسیاکاری مکانیکی به‌دست آمده است.



شکل ۴. تصاویر SEM چندسازه هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی در بزرگنمایی (الف) ۱۵ و (ب) ۱۲۰ هزار برابر

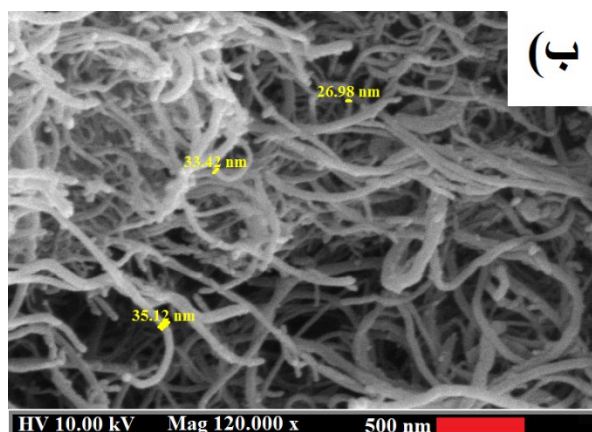
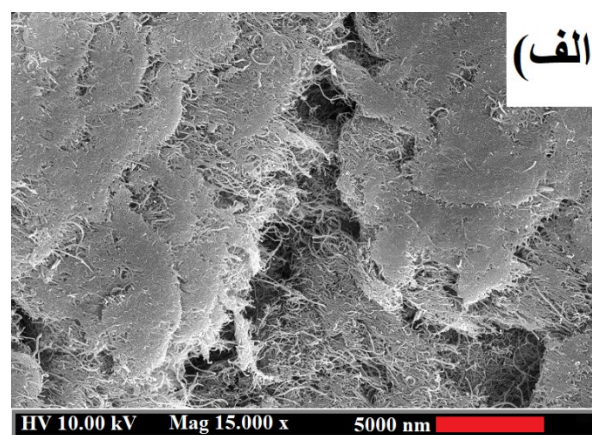
### ۳-۲- هدایت حرارتی

هدایت حرارتی دو نانوسیال چندسازه‌ای، برای کسر حجمی ۰/۲ تا ۱ درصد در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس، اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۵ و ۶، مقایسه هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن را نشان می‌دهند. در شکل ۵، مقایسه در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس و در شکل ۶، مقایسه در کسر حجمی‌های ۰/۲ و ۱ درصد انجام شده است. شکل ۵ و ۶ نشان می‌دهند که با افزایش دما یا کسر



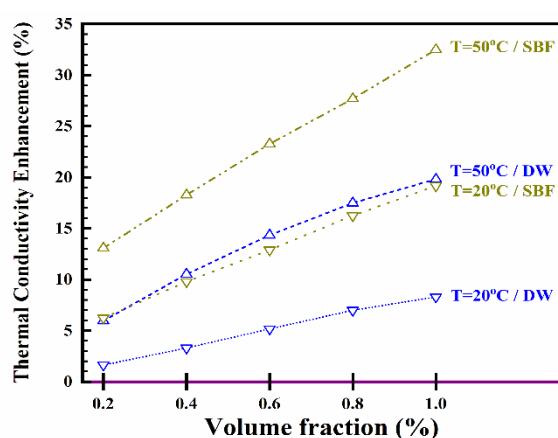
شکل ۲. تصاویر SEM هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده در بزرگنمایی (الف) ۱۵ و (ب) ۱۲۰ هزار برابر

در شکل ۳، تصاویر میکروسکوپی نانولوله‌های کربنی در مقیاس ۵ میکرومتر و ۵۰۰ نانومتر آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ریخت‌شناسی سطح نانولوله‌های کربنی دارای ساختار یک‌بُعدی است؛ به‌این معنی که لوله‌ها دارای یک محور میکرومتری و دو محور نانومتری هستند.

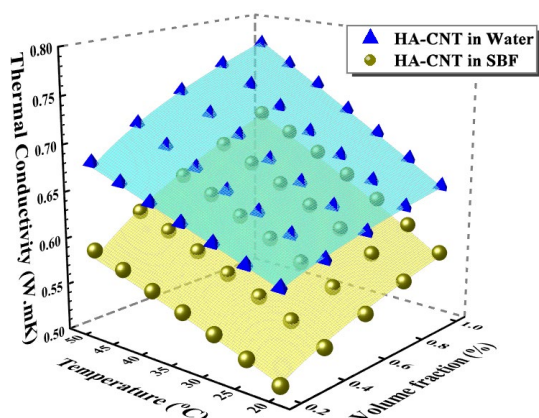


شکل ۳. تصاویر SEM نانولوله‌های کربنی در بزرگنمایی (الف) ۱۵ و (ب) ۱۲۰ هزار برابر

حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن نشان داده شده است. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که درصد افزایش هدایت حرارتی نانوسیال چندسازه‌ای پایه غیریابی با ورود ماده چندسازه‌ای در سیال پایه آن (نانوسیال SBF) در مقایسه با درصد افزایش هدایت حرارتی نانوسیال چندسازه‌ای پایه آبی بیشتر است. درواقع، افزودن نانولوله‌های کربنی به نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت-مایع شبیه‌ساز بدن، در مقایسه با افزودن نانولوله‌های کربنی به نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت-آب، اثر بیشتری بر درصد افزایش هدایت حرارتی داشته است.



شکل ۷. مقایسه درصد افزایش هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن

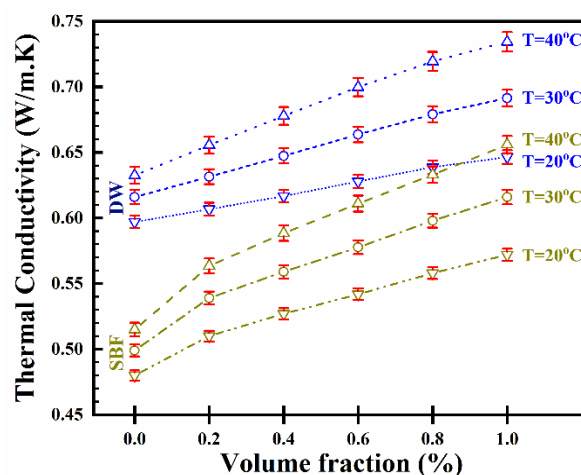


شکل ۸. مقایسه سه‌بعدی هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن

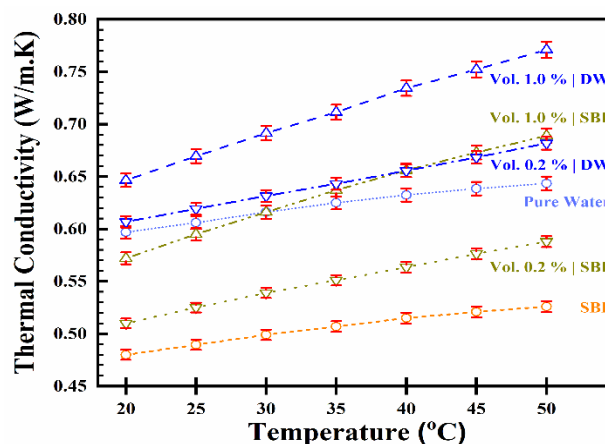
#### ۴- نتیجه‌گیری

- (۱) نتایج آزمون XRD تأییدکننده شکل‌گیری هیدروکسی‌آپاتیت در فرایند سنتز از استخوان گاو بود.
- (۲) نتایج مشاهدات SEM تأییدکننده نانو بودن ذرات

حجمی، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد؛ درضمن هدایت حرارتی در نمونه نانوسیال‌های پایه آبی بیشتر از نانوسیال‌های پایه غیریابی است. علت تأثیر بیشتر دما بر افزایش رسانایی نانوسیال‌های چندسازه‌ای با کسر حجمی بالاتر، می‌تواند به سبب افزایش برخورد بین ذرات جامد نانو (حرکت براونی) در دماهای بالاتر و کسر حجمی بیشتر ذرات باشد [۲۴]. نتیجه اینکه افزایش دما یا کسر حجمی، در افزایش هدایت حرارتی نانوسیال‌ها، روند مشابهی را (به دلیل همسان نبودن شیب افزایشی) نشان نمی‌دهد.



شکل ۵. مقایسه هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن در برابر کسر حجمی برای دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس



شکل ۶. مقایسه هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن در برابر دما برای کسر حجمی‌های ۰/۲ و ۱ درصد

در شکل ۷، مقایسه درصد افزایش هدایت حرارتی چندسازه در دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن با افزایش کسر حجمی ماده چندسازه‌ای و در شکل ۸، مقایسه سه‌بعدی هدایت

- Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, (2017), 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.010>
2. Chakraborty, S., Panigrahi, P. K., "Stability of nanofluid: A review", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174, (2020), 115259. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115259>
  3. Sheikholeslami, M., Rokni, H. B., "Simulation of nanofluid heat transfer in presence of magnetic field: A review", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, Part B, (2017), 1203-1233. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.108>
  4. Bakthavatchalam, B., Habib, K., Saidur, R., Saha, B. B., Irshad, K., "Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 305, (2020), 112787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>
  5. Tawfik M. M., "Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, (2017), 1239-1253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.111>
  6. Kumar, S., Hassan, S. B., Sharma, K. V., Baheta, A., "Heat transfer coefficients investigation for TiO<sub>2</sub> based nanofluids", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 10, (2019), 1491-1496. <https://doi.org/10.5829/IJE.2019.32.10A.19>
  7. Sidik, N. A., Yazid, M. N., Samion, S., "A review on the use of carbon nanotubes nanofluid for energy harvesting system", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, (2017), 782-794. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.047>
  8. Dey, D., Kumar, P., Samantaray, S., "A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties", *Heat Transfer—Asian Research*, Vol. 46, No. 8, (2017), 1413-1442. <https://doi.org/10.1002/htj.21282>
  9. Borode, A. O., Ahmed, N. A., Olubambi, P. A., "A review of heat transfer application of carbon-based nanofluid in heat exchangers", *Nano-Structures & Nano-Objects*, Vol. 20, (2019), 100394. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100394>
  10. Salman, S., Talib, A. A., Saadon, S., Sultan, M. H., "Hybrid nanofluid flow and heat transfer over backward and forward steps: A review", *Powder Technology*, Vol. 363, (2020), 448-472. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.038>
  11. Bhattacharya, M., Seong, W. J., "Carbon nanotube-based materials—Preparation, biocompatibility, and applications in dentistry", *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry*, (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815886-9.00003-6>
  12. Janković, A., Eraković, S., Mitrić, M., Matić, I. Z., Jurančić, Z. D., Tsui, G. C., Tang, C. Y., Mišković-Stanković, V., Rhee, K. Y., Park, S. J., "Bioactive hydroxyapatite/graphene composite coating and its corrosion stability in simulated body fluid", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 624, (2015), 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.078>
  13. Park, J. E., Jang, Y. S., Bae, T. S., Lee, M. H., "Biocompatibility characteristics of titanium coated with multi walled carbon nanotubes—hydroxyapatite nanocomposites", *Materials*, Vol. 12, No. 2, (2019), 224. <https://doi.org/10.3390/ma12020224>
  14. Khalili, A., Naeimi, F., Fakhrazadeh, A., "Electrodeposited hydroxyapatite/graphene oxide/zirconia oxide composite coatings: Characterization and antibacterial activity", *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 6, No. 4, (2020), 8-14. <https://doi.org/10.30501/ACP.2020.233349.1037>
  15. Hadidi, M., "Evaluation of corrosion resistance of electrophoretic-deposited HA-Cu and HA-CuO nanocomposite coatings on Ti6Al4V", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 5, No. 1, (2016), 55-60. <https://doi.org/10.30501/JAMT.2637.70324>
  16. Jaafar, A., Hecker, C., Árki, P., Joseph, Y., "Sol-gel derived hydroxyapatite coatings for titanium implants: A review", *Bioengineering*, Vol. 7, No. 4, (2020), 127. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7040127>
  17. Kaur, S., Bala, N., Khosla, C., "Characterization of hydroxyapatite coating on 316L stainless steel by sol-gel technique", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 55, No. 3, (2019), 357-366. <https://doi.org/10.3103/S1068375519030104>
  18. Lim, H. P., Park, S. W., Yun, K. D., Park, C., Ji, M. K., Oh, G. J., Lee, J. T., Lee, K., "Hydroxyapatite coating on TiO<sub>2</sub> nanotube by sol-gel method for implant applications", *Journal of Nanoscience*

هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده و نیز تأییدی بر پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در زمینه‌ای از هیدروکسی‌آپاتیت پس از آسیاکاری مکانیکی بود.

۳) برای هر دو سیال آب و مایع شبیه‌ساز بدن، با افزایش درصد ماده چندسازه‌ای هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی و نیز افزایش دما، رسانایی حرارتی نانوسیال‌ها افزایش یافت.

۴) نتایج اندازه‌گیری رسانایی حرارتی، نشان‌دهنده بالاتر بودن درصد افزایش هدایت حرارتی نانوسیال‌های چندسازه‌ای بر پایه مایع شبیه‌ساز بدن در مقایسه با نانوسیال‌های چندسازه‌ای بر پایه آب بود.

۵) بالاترین درصد افزایش رسانایی حرارتی (۳۲ درصد) متعلق به نانوسیال بر پایه مایع شبیه‌ساز بدن با ۱ درصد حجمی ماده چندسازه‌ای هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس بود؛ در حالی که در شرایط مشابه، درصد افزایش رسانایی حرارتی برای نانوسیال بر پایه آب، ۲۰ درصد بود.

۶) افزودن نانولوله‌های کربنی به نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت در مایع شبیه‌ساز بدن تأثیر بیشتری در افزایش هدایت حرارتی نسبت به نانوسیال هیدروکسی‌آپاتیت در آب داشت.

۷) باتوجه به محدوده هدایت حرارتی عاج دندان که ۰/۳۶ تا ۰/۸۸ وات بر متر-کلوین می‌باشد، محدوده دمایی مجاز برای پوشش دندان‌های هیدروکسی‌آپاتیت/نانولوله‌های کربنی جهت جلوگیری از احساس درد حرارتی دندان‌های هر دما در محدوده ۰/۵۰ تا ۰/۸۰ وات بر متر-کلوین مشخص شد.

## ۵- سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت آزمایشگاه معدن و متالورژی، در دانشگاه یزد و پژوهشکده مواد پیشرفته، در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، تشکر و قدردانی می‌کنند.

## مراجع

1. Ganvir, R. B., Walke, P. V., Kriplani, V. M., "Heat transfer characteristics in nanofluid—A review", *Renewable and*

24. Malekahmadi, O., Kalantar, M., Nouri-Khezrabad, M., "Effect of carbon nanotubes on the thermal conductivity enhancement of synthesized hydroxyapatite filled with water for dental applications: experimental characterization and numerical study", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, No. 6, (2021), 2109-2126. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10593-w>
25. Li, Y., Moradi, I., Kalantar, M., Babadi, E., Malekahmadi, O., Mosavi, A., "Synthesis of new dihybrid nanofluid of TiO<sub>2</sub>/MWCNT in water-ethylene glycol to improve mixture thermal performance: Preparation, characterization, and a novel correlation via ANN based on orthogonal distance regression algorithm", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, No. 6, (2021), 2587-2603. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10392-9>
26. Du, C., Nguyen, Q., Malekahmadi, O., Mardani, A., Jokar, Z., Babadi, E., D'Orazio, A., Karimipour, A., Li, Z., Bach, Q. V., "Thermal conductivity enhancement of nanofluid by adding multiwalled carbon nanotubes: Characterization and numerical modeling patterns", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, (2020). <https://doi.org/10.1002/mma.6466>
27. Esmailkhanian, A., Sharifianjazi, F., Abouchenari, A., Rouhani, A., Parvin, N., Irani, M., "Synthesis and characterization of natural nano-hydroxyapatite derived from turkey femur-bone waste", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 189, No. 3, (2019), 919-932. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03046-6>
19. Catauro, M., Barrino, F., Blanco, I., Piccolella, S., Pacifico, S., "Use of the sol-gel method for the preparation of coatings of titanium substrates with hydroxyapatite for biomedical application", *Coatings*, Vol. 10, No. 3, (2020), 203. <https://doi.org/10.3390/coatings10030203>
20. Ansari, Z., Kalantar, M., Kharaziha, M., Ambrosio, L., Raucci, M. G., "Polycaprolactone/fluoride substituted-hydroxyapatite (PCL/FHA) nanocomposite coatings prepared by in-situ sol-gel process for dental implant applications", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 147, (2020), 105873. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105873>
21. Park, J. E., Jang, Y. S., Bae, T. S., Lee, M. H., "Multi-walled carbon nanotube coating on alkali treated TiO<sub>2</sub> nanotubes surface for improvement of biocompatibility", *Coatings*, Vol. 8, No. 5, (2018), 159. <https://doi.org/10.3390/coatings8050159>
22. Bazli, L., Siavashi, M., Shiravi, A., "A review of carbon nanotube/TiO<sub>2</sub> composite prepared via sol-gel method", *Journal of Composites and Compounds*, Vol. 1, No. 1, (2019), 1-9. <https://doi.org/10.29252/jcc.1.1.1>
23. Ansari, Z., Kalantar, M., Soriente, A., Fasolino, I., Kharaziha, M., Ambrosio, L., Raucci, M. G., "In-situ synthesis and characterization of chitosan/hydroxyapatite nanocomposite coatings to improve the bioactive properties of Ti6Al4V substrates", *Materials*, Vol. 13, No. 17, (2020), 3772. <https://doi.org/10.3390/ma13173772>