



## بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های انجماد نانوسیال و مدل سازی به روش منطق فازی

هدی اصلانی<sup>1</sup>، محمد مقیمان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\*مشهد، صندوق پستی 91775-1111، moghiman@um.ac.ir

### چکیده

در این مقاله اثر افزودن نانوذره تیتانیا بر رفتار انجمادی نانوسیال در غلظت‌های جرمی 0.01%، 0.02%، 0.04% مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این ارتباط، شاخصه‌های مهم در انجماد شامل درجه فراسرمایش، زمان انجماد، دمای تشکیل هسته و دمای تغییر فاز به روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. برای انجام آزمایشات از دستگاه مولد سرما برپایه سیکل تبرید تراکمی استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد افزودن نانوذرات اثر قابل توجهی بر بهبود رفتار انجمادی سیال پایه دارد؛ به طوری که مقایسه نتایج فرایند انجماد سیال پایه و نانوسیال نشان می‌دهد که حضور نانوذرات در سیال موجب کاهش قابل توجه زمان انجماد و درجه فراسرمایش و افزایش دمای تشکیل هسته سیال پایه می‌گردد. در مقایسه با آب دیونیزه، غلظت 0.04% جرمی نانوذره سبب کاهش 70% زمان انجماد، کاهش 69% درجه فراسرمایش و افزایش 29 درصدی در دمای تشکیل هسته شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که شار حرارتی برداشت‌شده در فرایند انجماد نانوسیال تیتانیا بیش از شار حرارتی سیال پایه است. همچنین در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی میزان کسر جرمی گذرای مایع در زمان انجماد در مقایسه با نتایج به دست آمده از منطق فازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس نتایج حاصل از مدل سازی، منطق فازی روش قابل اطمینان در ارائه نتایج کسر جرمی گذرای مایع در زمان‌های مختلف است. ارزیابی دقت مدل ارائه شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد میانگین خطای نسبی منطق فازی در غلظت‌های ناچیز، کمتر است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 03 شهریور 1394  
پذیرش: 06 مهر 1394  
ارائه در سایت: 10 آبان 1394  
کلید واژگان:

انجماد  
نانوسیال  
دمای تشکیل هسته  
درجه فراسرمایش  
منطق فازی

## Experimental investigation and fuzzy logic modelling of nanofluid solidification behavior

Hoda Aslani, Mohammad Moghiman\*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\*P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 August 2015  
Accepted 28 September 2015  
Available Online 01 November 2015

Keywords:  
Solidification  
Nanofluid  
Nucleation Temperature  
Supercooling Degree  
Fuzzy Logic

### ABSTRACT

In this paper, the important characteristics of solidification including supercooling degree, solidification time, nucleation temperature, phase change temperature which effect on efficiency are experimentally studied. A purposely designed experimental device was used to investigate the solidification characteristics of titania nanofluid (0.01% wt. 0.02% wt. and 0.04% wt.). The results clearly reveal that adding titania nanoparticles to Deionized water as a base fluid can reduce the time of solidification, phase change temperature and supercooling degree. By adding 0.04% wt. titania nanoparticles, the solidification time, phase change temperature and supercooling degree are reduced by 70%, 18%, 69% while nucleation temperature is enhanced by 29%. Thus, the time of solidification is more affected by adding nanoparticles than other solidification characteristics. Further, the experimental results show that nanofluid heat flux is higher than that of base fluid. Also, a comparison of Fuzzy logic modelling and experimental results for liquid fraction is studied. The results reveal that the fuzzy logic modelling is a reliable and powerful technique for predicting the liquid transient fraction. From the results it is also concluded that extremely low concentration of titania has low average error.

### 1- مقدمه

دلیل توانایی ذخیره گرمای نهان، محیط‌های مناسبی برای ذخیره سازی انرژی است [1]. از پارامترهای مهم در بهبود راندمان و سرعت عملکرد سیستم‌های ذخیره سرمایی، استفاده از مواد تغییر فازدهنده با خاصیت ضریب هدایت حرارتی بالا و قابلیت امکان شارژ سریع (نرخ بالای جذب سرما تا دستیابی به انجماد کامل)، ذخیره انرژی سرمایی بالا و در نهایت تخلیه و آزادسازی مناسب آن است [2].

گرچه آب به دلیل پایداری شیمیایی و عدم دارا بودن اثرات مخرب زیست محیطی به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده متداول در سیستم‌های

یک روش مؤثر و قابل اعتماد ذخیره سازی انرژی سرمایی، انجماد مایعات است که به ویژه در شرایط مصرف نوسانی و پیک ناگهانی بار برودتی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند شامل جذب گرما از سیال، تغییر فاز آن به جامد و ذخیره انرژی سرمایی توسط سیستم‌های ذخیره سرمایی<sup>1</sup> است. مواد تغییر فاز دهنده<sup>2</sup> که در این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به

1- Cool Storage Systems  
2- Phase Change Material

کربنی نانومقیاس با نسبت ابعادی<sup>4</sup> بالا (نانولوله‌های کربنی و نانوصفحات گرافن) صورت گرفت. از نتایج این تحقیق می‌توان به سرعت بیشتر تشکیل هسته در حضور نانولوله کربنی در مقایسه با نانو صفحات گرافن اشاره کرد [16].

با در نظر گرفتن اثر قابل توجه نانوذرات بر مشخصه‌های انجماد نانوسیالات و نیز راندمان سیستم‌های ذخیره‌سازی سرمایای نیاز به اطلاعات بیشتر پیرامون خواص مهم ترموفیزیکی در نانوسیال‌های مختلف است؛ هدف تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی اثر غلظت‌های مختلف نانوسیال تیتانیا بر مشخصه‌های انجماد شامل دمای تشکیل هسته<sup>5</sup>، درجه فراسرمایش<sup>6</sup>، انرژی آزاد حجمی و شعاع بحرانی هسته، دمای تغییر فاز<sup>7</sup> و زمان انجماد است. این مشخصه‌ها در غلظت‌های مختلف نانوذرات مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین در این مقاله، مقادیر آزمایشگاهی کسر جرمی گذرای مایع با هدف تلاش برای به حداقل رساندن آزمایشات و هزینه‌های آن توسط منطق فازی مدل‌سازی شده و برای بررسی توانایی این روش، میزان خطای آن در پیش‌گویی مقادیر آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است.

## 2- مشخصه‌های انجماد مایعات

عمل سرد کردن و منجمدسازی رفتارهای پیچیده مختلفی را نسبت به زمان از خود نشان می‌دهد؛ بدین ترتیب که کاهش دمای مایع با جذب سرما، تا مرحله آغاز تشکیل هسته‌های اولیه انجماد، ادامه می‌یابد. دمای مایع در شروع مرحله تشکیل هسته‌های انجماد، مینیمم دمای ممکن هنگام فرایند انجماد است. در مرحله شروع تشکیل هسته‌های اولیه انجماد ذرات کوچک فاز جدید در فاز مایع تشکیل می‌شود [17]. پس از این مرحله، هسته‌های تشکیل شده رشد نموده و بلور تشکیل می‌گردد. تبلور در نانوسیالات از نوع تبلور ناهمگن<sup>8</sup> است، زیرا تشکیل هسته‌های اولیه در محل سطوح تماس سیال پایه و نانوذره آغاز می‌گردد [18,19]. ذرات ناخالصی (نانوذرات) در مکانیسم تبلور ناهمگن به‌عنوان عامل هسته‌زایی<sup>9</sup> در کریستاله شدن به‌شمار می‌روند [20]. در هنگام رشد بلورهای کریستالی، دمای مایع بالا می‌رود تا به دمای ثابت تغییر فاز (نقطه انجماد) رسیده و لایه‌های اولیه انجماد تشکیل می‌شود. در این مرحله، جذب سرما منجر به تشکیل لایه‌های بعدی انجماد شده و کاهش دما صورت نمی‌گیرد. پس از تشکیل آخرین لایه جامد و با ادامه فرایند سرمایش، دوباره کاهش دما صورت می‌گیرد.

یکی از پارامترهای مهم در انجماد، درجه فراسرمایش ( $SD$ ) بوده که در مطالعات این حوزه، به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود [21].

$$SD = T_m - T_n \quad (2)$$

که در آن  $T_m$  دمای تغییر فاز و  $T_n$  دمای تشکیل هسته است. کاهش درجه فراسرمایش به دلیل نیاز کمتر به کاهش دما در اواپراتور سیکل تبرید، شرایط مناسب‌تری برای انجماد و سیستم‌های ذخیره انرژی فراهم می‌آورد [3].

در تفسیر تغییرات دمای تشکیل هسته و در نتیجه درجه فراسرمایش، بررسی پارامتر انرژی آزاد حجمی ضروری است، زیرا رشد هسته‌های کریستالی تشکیل شده که همراه با افزایش دما از دمای تشکیل هسته به دمای تغییر فاز است، با میزان انرژی آزاد حجمی مرتبط است [22]. مطابق

ذخیره‌سازی سرمایای استفاده می‌شود؛ اما پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن، موجب کاهش عملکرد، کارایی و ایجاد محدودیت در سیستم‌هایی که از آن استفاده می‌کنند، می‌گردد [3]. تاکنون روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد سیستم‌های برودتی مانند قراردادن فین<sup>1</sup> و توزیع میکروذرات در آب (به عنوان ماده تغییر فاز دهنده) به کار گرفته شده است [5,4].

امروزه، با توسعه فناوری نانو تکنولوژی این امکان فراهم شده است که با افزودن ذرات نانو به مواد تغییر فاز دهنده، خواص ترموفیزیکی آن‌ها از جمله ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تغییر داده شود. از آن‌جا که ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اکسید فلزی، در مقایسه با سیال پایه (آب دیونیزه<sup>2</sup>) بسیار بالاتر است افزودن این ذرات به سیال، منجر به افزایش هدایت حرارتی نانوسیال طبق رابطه (1) می‌گردد [6].

$$K_{NF} = K_{DW} \times \frac{K_{NP} + 2K_{DW} + 2\phi_p(K_{NP} - K_{DW})}{K_{NP} + 2K_{DW} - \phi_p(K_{NP} - K_{DW})} \quad (1)$$

که در آن  $K_{NF}$ ،  $K_{NP}$  و  $K_{DW}$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال، نانوذره و آب دیونیزه بوده و همچنین  $\phi_p$  کسر حجمی نانوسیال است. از جمله مطالعات در این حوزه، بررسی اثر افزودن نانوذرات آلومینا [8,7] و اکسید آهن [9] بر افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه آب دیونیزه است.

در راستای بررسی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات و تأثیر حضور نانوذرات در فرایندهای فیزیکی، کیم و همکارانش [10] فرایند جوشش نانوسیال آلومینا- آب دیونیزه را مورد مطالعه قرار دادند؛ نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر افزایش هشتاد درصدی در شار حرارتی بحرانی به علت تأثیرات رسوب نانوذرات در دیواره داخلی محفظه تست بوده است. در سال 2013، اثر غلظت‌های مختلف نانولوله کربنی بر ویسکوزیته و سرعت ذوب سیال پایه دودکانول، به روش آزمایشگاهی مطالعه شد؛ نتایج این آزمایش که در شرایط اعمال شارحرارتی از کف محفظه تست در حفره استوانه‌ای عمودی انجام شده بود، تغییر سرعت ذوب و ویسکوزیته را در اثر افزودن نانوذره، نشان داد [11]. همچنین در همان سال، اثر غلظت‌های نانوذرات بر تغییر میزان تبخیر سیال پایه و راندمان آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [12]. نصیری و رشیدی [13] در سال 2014، با استفاده از روش حجم محدود و مدل دوسیالی، اثر موج‌دار بودن کانال عمودی را در جوشش مادون سرد نانوسیال آلومینا مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش غلظت نانوذره سبب افزایش دمای دیواره کانال می‌شود.

علی‌رغم نیاز به پرداخت دقیق پارامترهای شاخص مبرد تغییر فاز دهنده و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی سرمایای در شرایط حضور نانوذرات تحقیقات محدودی در این زمینه صورت گرفته است؛ از آن جمله می‌توان به بررسی اثر طرد<sup>3</sup> غلظت‌های مختلف نانوذره مس در انجماد نانوسیال مس- سیکلو هگزان در سال 2013 اشاره کرد؛ نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ضریب تفکیک نانوذره از سیال پایه، در فرایند انجماد با افزایش غلظت و کاهش اندازه نانوذرات، افزایش می‌یابد [14]. در سال 2014، اثر نانوذره اکسید مس و پایدارکننده ستیل تری متیل آمونیوم بروماید بر عملکرد مخازن ذخیره سرمایای به صورت آزمایشگاهی تحلیل گردید. نتایج این تحقیق بیانگر تأثیر قابل توجه نانوذره بر کاهش زمان انجماد کامل است؛ درحالی‌که حضور پایدارکننده منجر به افزایش زمان انجماد می‌گردد [15]. در سال 2015، بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های انجماد نانوسیالات حاوی افزودنی‌های

4- Aspect Ratio  
5- Nucleation Temperature  
6- Supercooling Degree (SD)  
7- Phase Change Temperature  
8- Heterogeneous Nucleation  
9- Nucleating agent

1- Fin  
2- Deionized Water  
3- Rejection

### 3-1- تهیه نانوسیال

در این تحقیق، نانوذره تیتانیا، باتوجه به سهولت تهیه، هزینه پایین، عدم سمیت، دارا بودن فعالیت و خواص ضد سرطانی و در نتیجه امکان به‌کارگیری کم‌خطر در سیستم‌های ذخیره انرژی، مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، نانوذرات تیتانیا خواص منحصر به فردی مانند پایداری بالا، قابلیت مقابله در مقابل طیف گسترده‌ای از میکروب‌ها [32,31] داشته و همچنین نانوسیال تیتانیا ویسکوزیته بیشتر [33] و ضریب هدایت حرارتی بزرگ‌تر [34] و نرخ تبخیر کمتری [12] در مقایسه با سیال پایه خود دارد. در این پژوهش نانوسیال به روش دو مرحله‌ای تهیه شده است؛ به این صورت که ابتدا نانوذره به‌صورت پودر خشک آماده شده و در مرحله بعد، نانوذرات در سیال پایه پراکنده گردیدند [12]. نانوذرات تیتانیا در سیال پایه با استفاده از همزن مغناطیسی (به مدت 15 دقیقه با سرعت 450 دور بر دقیقه) و بدون استفاده از پایدارکننده با سیال پایه آب دیونیزه پراکنده‌سازی و مخلوط شدند. جهت افزایش پایداری نانوذرات در سیال پایه و از بین بردن توده‌های نانوذرات، ترکیب حاصل به مدت 30 دقیقه و با فرکانس 50 کیلوهرتز در دستگاه اولتراسونیک<sup>2</sup> تحت ارتعاش قرار گرفته است.

اندازه‌گیری جرم سیال پایه و نانوذرات توسط ترازوی الکترونیکی با دقت 0.001 گرم انجام شده است. نانوذرات تیتانیا با ساختار تقریباً کروی به قطر 15-25 نانومتر (اندازه متوسط 20 نانومتر) در غلظت‌های جرمی 0.01%، 0.02% و 0.04% مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نانوذرات مورد استفاده، از شرکت پیشگامان نانو مواد ایران<sup>3</sup> خریداری شده و ساخت شرکت آمریکایی یو اس ریسرچ نانومتریال<sup>4</sup> است. ساختار این نانوذره، از ترکیب هشتاد درصد حجمی آاناتاز<sup>5</sup> و بیست درصد حجمی روتایل<sup>6</sup> با خلوص بیش از 99% و اسیدیته 5.5-6 تشکیل شده است. شکل 1، تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی<sup>7</sup> از ساختار نانوذره تیتانیای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

### 3-2- دستگاه آزمایش و روش اندازه‌گیری

شماتیک و تصویر واقعی دستگاه آزمایش که شامل یک سیکل تبرید تراکمی است، به ترتیب در شکل 2 و 3 نشان داده شده است. اوپراتور دستگاه بصورت یک وان ایزوله به حجم 10 لیتر است که محتوی مخلوط 25% حجمی اتیلن‌گلیکول و 75% حجمی آب با دمای انجماد 12- درجه سانتی‌گراد است

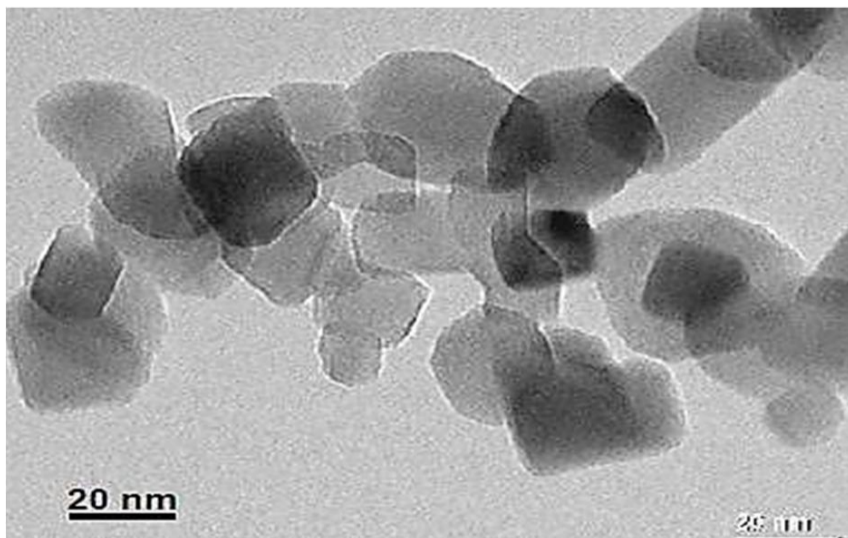


Fig. 1 SEM image of Titania nanoparticles

شکل 1 تصویر SEM از نانوذره تیتانیا

روابط ترمودینامیکی، انرژی آزاد به صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$\Delta g_v = \Delta h_v - \bar{T} \Delta s_v \quad (3)$$

که در آن  $\Delta g_v$ ،  $\Delta h_v$  و  $\Delta s_v$  به ترتیب تغییرات انرژی آزاد، انتالپی و انتروپی در واحد حجم بوده و  $\bar{T}$  میانگین دماهای تشکیل هسته و تغییر فاز برحسب کلون است.

همچنین انرژی آزاد حجمی برحسب پارامترهای انجماد، به صورت رابطه (4) تعریف می‌شود و به پارامترهای چگالی  $\rho$ ، گرمای نهان انجماد  $h_{sl}$  و درجه فراسرمایش بستگی دارد.

$$\Delta g_v = \frac{-\rho \times h_{sl} \times SD}{T_m} \quad (4)$$

انرژی آزاد حجمی در نانوسیالات با استفاده از رابطه (4) و با اعمال درجه فراسرمایش نانوسیال، دمای تغییر فاز و گرمای نهان آن، محاسبه می‌شود. گرمای نهان نانوسیال به روش آزمایشگاهی و توسط دستگاه کالریمتر اسکن تفاضلی<sup>1</sup> اندازه‌گیری می‌شود؛ به این صورت که مقدار گرمای نهان نانوسیال، توسط انتگرال‌گیری از منحنی اگزوترمیک در بازه زمانی آغاز تا پایان فرایند تغییر فاز محاسبه می‌شود [23]. نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مرتبط با گرمای نهان انجماد نانوسیالات رابطه تجربی (5) را ارائه داده‌اند [24] و در این تحقیق از رابطه (5) برای محاسبه گرمای نهان نانوسیال تیتانیا، استفاده شده است. در این رابطه  $\rho_{NF}$  دانسیته نانوسیال بوده و گرمای نهان آب دیونیزه، 333 kJ/kg در نظر گرفته می‌شود [25]  $\rho_{NF}$  و  $\phi_p$  به ترتیب، از روابط (6) و (7) به دست می‌آیند [27,26] که در آن  $wt$  غلظت جرمی نانوذره است.

$$h_{sl,NF} = \frac{\rho_i \times h_{sl} \times (1 - \phi_p)}{\rho_{NF}} \quad (5)$$

$$\rho_{NF} = (1 - \phi_p) \times \rho_i + \phi_p \times \rho_{NP} \quad (6)$$

$$\phi_p = \frac{\rho_{DW} \times wt}{\rho_{DW} \times wt + (1 - wt) \times \rho_{NP}} \quad (7)$$

در بررسی و آزمایش تبلور ناهمگن در نانوسیالات، توجه به شعاع بحرانی هسته‌های تشکیل شده در انتخاب بستر آزمایش به خصوص در مقیاس‌های کوچک حائز اهمیت است [19]. شعاع بحرانی بیشینه شعاع هسته بوده که براساس رابطه (8) محاسبه می‌شود [28]. شعاع هسته‌های تشکیل یافته هرگز از مقدار شعاع بحرانی بیشتر نمی‌شود. بر اساس کار لیبو و همکاران [28]  $\gamma_{iw}$  در این رابطه، انرژی آزاد سطح مشترک آب-یخ بوده و آنان مقدار  $0.023 \text{ J/m}^2$  را برای آن استفاده نموده‌اند. خواص نانوسیال در محاسبه شعاع بحرانی هسته، در ترم انرژی آزاد حجمی و با تأثیر قابل توجه پارامتر درجه فراسرمایش نانوسیال لحاظ می‌گردد.

$$r_c = \frac{-2\gamma_{iw}}{\Delta g_v} \quad (8)$$

میزان شار حرارتی برداشت شده در فرایند انجماد که نسبت عکس با زمان تغییر فاز کامل دارد، از دیگر مشخصه‌های انجماد بوده و از رابطه (9) به دست می‌آید [30,29].

$$HF = \frac{m \times h_{sl}}{A \times t} \quad (9)$$

که در آن  $HF$  شار حرارتی برداشت شده برحسب کیلو وات بر مترمربع،  $m$  جرم نانوسیال بر حسب کیلوگرم،  $h_{sl}$  گرمای نهان انجماد برحسب کیلوژول بر کیلوگرم،  $A$  سطح مقطع بر حسب مترمربع و  $t$  زمان تغییر فاز در انجماد کامل برحسب ثانیه است.

### 3- مواد و شرح آزمایش

1- Differential Scanning Calorimetry (DSC)

2- Ultrasonic Vibration  
3- Iranian Nanomaterials Pioneers (INP)  
4- US Research Nanomaterials  
5- Anatase  
6- Rutile  
7- Scanning Electron Microscope (SEM)



Fig. 3 Experimental Setup

شکل 3 تصویر دستگاه آزمایش

جدول 1 نتایج آنالیز عدم قطعیت

Table 1 Results of uncertainty analysis

عدم قطعیت	پارامترهای اندازه‌گیری شده
0.1%	جرم
4%	دما
3%	کسر جرمی
0.01%	شار حرارتی

#### 4- مدل‌سازی به روش منطق فازی

یکی از کاربردهای منطق فازی که اولین بار در سال 1965 توسط لطفی‌زاده معرفی گردید، مدل‌سازی براساس داده‌های آزمایشگاهی است. مدل‌سازی به روش منطق فازی، با کاهش چشمگیر در زمان محاسبات به حل مسائل پیچیده مهندسی می‌پردازد، همچنین این مدل‌سازی برای پایین آوردن هزینه آزمایشات و ارائه پیش‌گویی به نسبت دقیق نتایج آزمایشاتی که به دلیل برخی محدودیت‌ها امکان انجام آن‌ها وجود ندارد، دارای اهمیت است. این روش به دلیل این که از سایر روش‌های آماری متداول کارآمدتر است، به تازگی مورد توجه بسیاری از محققان در مدل‌سازی فرایندهای مهندسی قرار گرفته است [37,36]. یک مجموعه فازی هر جزء را توسط تابع عضویت<sup>3</sup>، به درجه‌های نسبی عضویت (بین 0 و 1) مرتبط می‌کند. متداول‌ترین تابع، نوع مثلثی است که به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود.

$$f(x; a_i, b_i, c_i) = \max\left(\min\left(\frac{x - a_i}{b_i - a_i}, \frac{c_i - x}{c_i - b_i}\right), 0\right) \quad (10)$$

که در آن پارامترهای  $a$  و  $b$  رئوس قاعده مثلث و  $c$  راس بالایی آن است [37].

فرایند فازی‌سازی شامل مراحل زیر است:

1- انتخاب سیستم استنتاجی<sup>4</sup> برای ارتباط فضای ورودی به فضای خروجی.

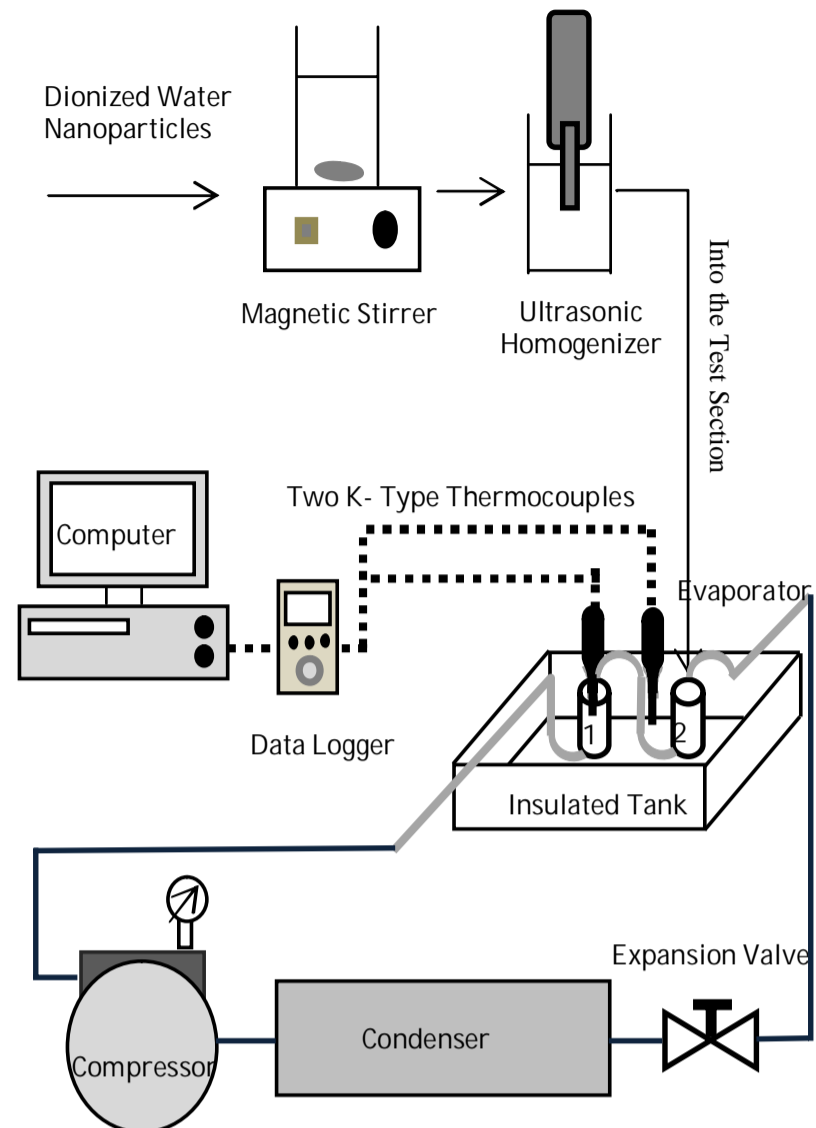


Fig. 2 schematic diagram of the experimental setup: capsule (1) including nanofluid to test the transition temperature and capsule (2) including nanofluid to test the liquid transient fraction

شکل 2 طرحواره دستگاه آزمایش: کپسول (1) حاوی نانوسیال جهت تست دمای لحظه‌ای و کپسول (2) حاوی نانوسیال جهت تست کسر جرمی گذرای مایع

که در طول آزمایشات پیوسته در این دما ثابت نگهداشته شده است. دقت ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای مخلوط آب و اتیلن گلیکول  $\pm 0.1$  درجه سانتی‌گراد است. از دو کپسول استوانه‌ای مشابه از جنس پلی‌اتیلن، به قطر 80 میلی‌متر و حجم 200 سی‌سی (به عنوان محفظه‌های تست) برای نگهداری نانوسیال در وان ایزوله دما ثابت استفاده شده است. دمای نانوسیال داخل کپسول توسط یک سنسور از نوع  $1^{\circ}\text{K}$  با دقت  $\pm 0.01$  درجه سانتی‌گراد که در مرکز کپسول ثابت شده است، اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های دمای لحظه‌ای نانوسیال داخل کپسول در طی فرایند انجماد در هر ثانیه مستقیماً توسط داده نگار<sup>2</sup> در رایانه ثبت می‌شود.

پس از شروع تشکیل لایه‌های انجماد در داخل کپسول‌ها، پیوسته جرم مایع باقی‌مانده از نانوسیال در حین فرایند انجماد، توسط ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 گرم اندازه‌گیری شده است. در لحظه شروع کلیه آزمایشات، نانوسیال در دمای محیط ( $25 \pm 0.5$  درجه سانتی‌گراد) بوده است.

#### 3-3- آنالیز عدم قطعیت

پیش از شروع آزمایش، کلیه ابزارها، کالیبره گردیدند و برای بررسی تکرارپذیری و دقت داده‌های اندازه‌گیری، آزمایشات سه بار تکرار شد. آنالیز فقدان قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده به روش کلمن و استیل [35] صورت گرفته و مقادیر فقدان قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول 1 ارائه شدند.

3- Membership function  
4- Fuzzy Inference System (FIS)

1- Thermocouple (K- Type)  
2- Data logger

### 5-2- بررسی دمای گذرا

شکل 5، منحنی انجماد نانوسیال تیتانیا را در چهار غلظت (0.04%، 0.02%، 0.01% و 0 یا آب دیونیزه) نسبت به زمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود زمان شروع فرایند انجماد با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد؛ زیرا نانوذرات به عنوان عامل هسته زایی، موجب تسریع در تشکیل هسته و در نتیجه فرایند انجماد می‌شوند، همچنین طبق رابطه (1) و نتایج آزمایشگاهی مرشد و همکارانش [34] حضور نانوذرات تیتانیا منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌گردد. افزایش ضریب هدایت حرارتی سبب می‌شود فضاهای مناسب بیشتری جهت رشد و تشکیل هسته‌های انجماد تامین گردیده و افزایش نرخ رشد لایه‌های منجمد را به دنبال داشته باشد [39]؛ در نتیجه با افزایش هدایت حرارتی شروع فرایند انجماد سریع‌تر رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد زمان شروع انجماد در غلظت 0.01% تیتانیا، 58% نسبت به آب دیونیزه کاهش یافته است. همچنین زمان شروع انجماد نانوسیالات با غلظت‌های 0.02% و 0.04% نسبت به آب دیونیزه به ترتیب 67% و 70% کمتر است.

### 5-3- بررسی دمای تشکیل هسته

شکل 6، اثر غلظت نانوذره را بر دمای تشکیل هسته نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود افزودن مقدار بسیار جزئی نانوذره به سیال پایه، دمای تشکیل هسته را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. افزایش 0.01% غلظت نانوذره، موجب افزایش 29% دمای تشکیل هسته می‌گردد؛ زیرا طبق تئوری تبلور ناهمگن، افزایش غلظت منجر به افزایش تمایل و نرخ رشد و تشکیل هسته‌های انجماد می‌شود. افزایش دمای تشکیل هسته در نانوسیال نشان می‌دهد نانوسیال در مقایسه با سیال پایه، نیاز به کاهش دمای کمتری به منظور شروع مرحله تشکیل هسته خواهد داشت.

### 5-4- بررسی دمای تغییر فاز

شکل 7، وابستگی دمای تغییر فاز نانوسیال را به غلظت نانوذره نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود دمای تغییر فاز در اثر افزایش غلظت نانوسیال کاهش جزئی می‌یابد؛ زیرا با افزودن نانوذره به سیال پایه و در نتیجه کاهش تعداد مولکول‌های سیال پایه در سطح، فشار بخار مایع کاهش یافته و با توجه به لزوم برابری فشار بخار مایع و فشار بخار جامد در شروع تشکیل لایه‌های انجماد، دمای تغییر فاز کاهش می‌یابد [40]؛ همچنین با توجه به انتروپی

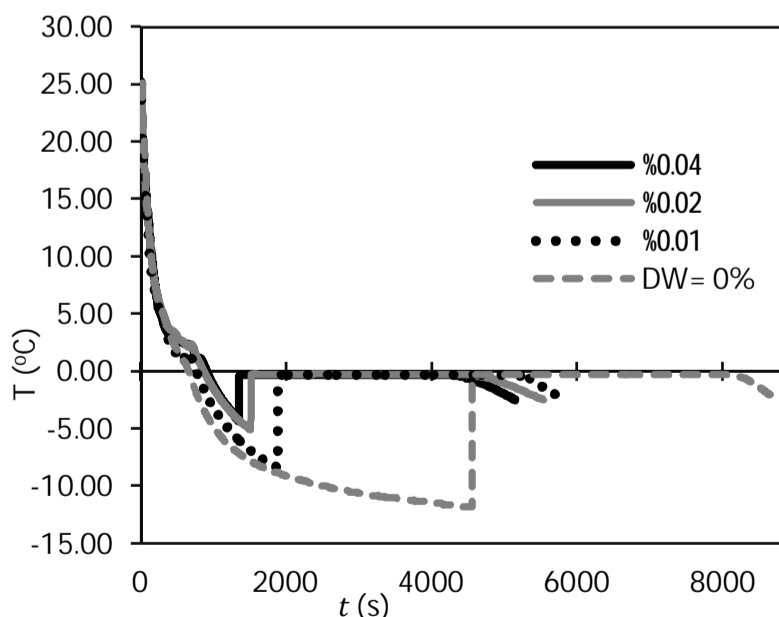


Fig. 5 Cooling curve of nanofluids with different concentrations  
شکل 5 منحنی انجماد نانوسیال تیتانیا در غلظت‌های مختلف

2- فازی‌سازی ورودی‌ها از طریق عملگرهای فازی‌سازی، برای انتقال داده‌های عددی به مجموعه فازی از طریق تابع عضویت.

3- اعمال عملگرهای فازی شامل AND، OR و NOT در مواقعی که تعداد ورودی‌ها، بیش از 1 باشد.

4- اعمال روش مفهومی<sup>1</sup> برای تخصیص عدد واحد داده شده از نقش فازی به مجموعه فازی توسط دو روش AND و PROD.

5- تجمیع خروجی‌ها برای ترکیب خروجی‌های هر نقش به یک مجموعه فازی واحد.

6- تبدیل مجموعه فازی با تخصیص مقدار انحصاری، متداول‌ترین روش، روش مرکز ثقل<sup>2</sup> بر پایه مرکز سطح زیرین منحنی است [38].

پس از ارائه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی در این مقاله، مدل‌سازی نتایج توسط منطق فازی صورت گرفته و میزان خطای روش بررسی گردید.

### 5- نتایج و بحث

در این بخش، ضمن اعتبارسنجی نتایج این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات بر مشخصه‌های انجماد نانوسیال تیتانیا شامل دمای لحظه‌ای در حین فرایند انجماد، دمای تشکیل هسته و تغییر فاز، تغییر درجه فراسرمایش، انرژی آزاد حجمی و شعاع بحرانی هسته، زمان انجماد و شار حرارتی برداشت شده مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد و سرانجام نتایج آزمایشگاهی کسر جرمی گذرای مایع در مقایسه با نتایج مدل‌سازی توسط منطق فازی تحلیل گردیده و سپس از مدل‌سازی صورت گرفته، رابطه چندجمله‌ای برحسب زمان و غلظت نانوذره، جهت تعیین رفتار انجماد نانوسیال و آب دیونیزه استخراج شده است.

### 5-1- صحت سنجی

در شکل 4، به منظور بررسی صحت عملکرد دستگاه، مقایسه نتایج انجماد آب دیونیزه با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکارانش [28] ارائه می‌گردد. شرایط به کار برده شده در هر دو آزمایش به صورت یکسان، در دمای وان ایزوله 15- درجه سانتی‌گراد بوده و محفظه تست نانوسیال، کپسول شیشه‌ای به قطر خارجی 48 میلی‌متر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج هر دو تحقیق برقرار است که بیانگر عملکرد مناسب دستگاه در اجرای آزمایش است.

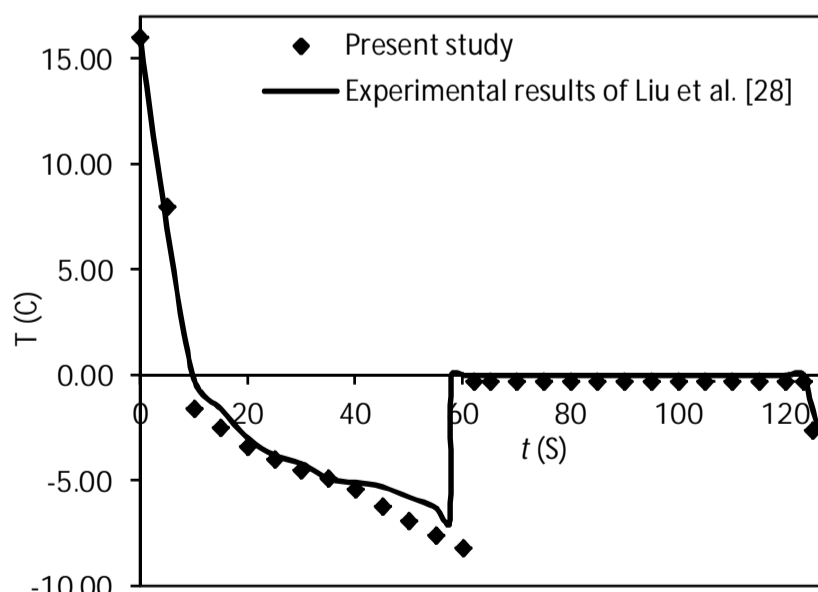


Fig. 4 Comparison of present study with results reported in [28]  
شکل 4 مقایسه نتایج آزمایشگاهی مرجع [28] و تحقیق حاضر

1- Implication Method  
2- Centroid

مقایسه نتایج در شرایط یکسان، بیانگر درجه فراسرمایش بیشتر نانوسیال تیتانیا درمقایسه با اکسید گرافن است؛ به صورتی که درجه فراسرمایش در نانوذره تیتانیا به غلظت 0.04%، 37% بیش از نانوذره اکسید گرافن در همان غلظت است. با توجه به شکل 8، مشاهده می‌شود درجه فراسرمایش در نانوسیال تیتانیا، با دمای وان ایزوله رابطه مستقیم دارد و در نتیجه وان ایزوله با دمای پایین‌تر، با ایجاد درجه فراسرمایش کمتر، به افزایش راندمان سیستم ذخیره انرژی سرمایی کمک می‌کند.

#### 5-6- بررسی انرژی آزاد و شعاع بحرانی هسته

شکل 9 انرژی آزاد حجمی (رابطه 4) و شعاع بحرانی هسته (رابطه 8) را برای غلظت‌های مختلف نانوسیال تیتانیا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوسیال، انرژی آزاد حجمی و نیز شعاع بحرانی هسته تشکیل شده افزایش می‌یابد. بنابر رابطه (4) که اثر درجه فراسرمایش بر انرژی آزاد را نشان می‌دهد، افزایش انرژی آزاد در اثر افزایش غلظت و کاهش مقدار مطلق آن، موید کاهش درجه فراسرمایش در شکل 8 است.

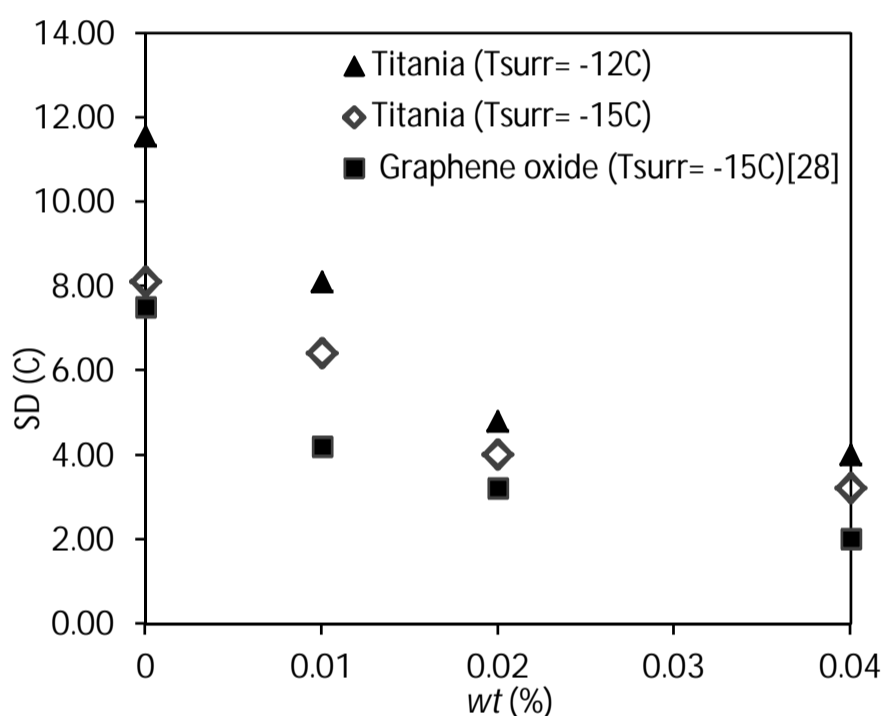


Fig. 8 Effect of nanoparticle types and concentrations on supercooling degree

شکل 8 اثر غلظت و نوع نانوذره بر درجه فراسرمایش

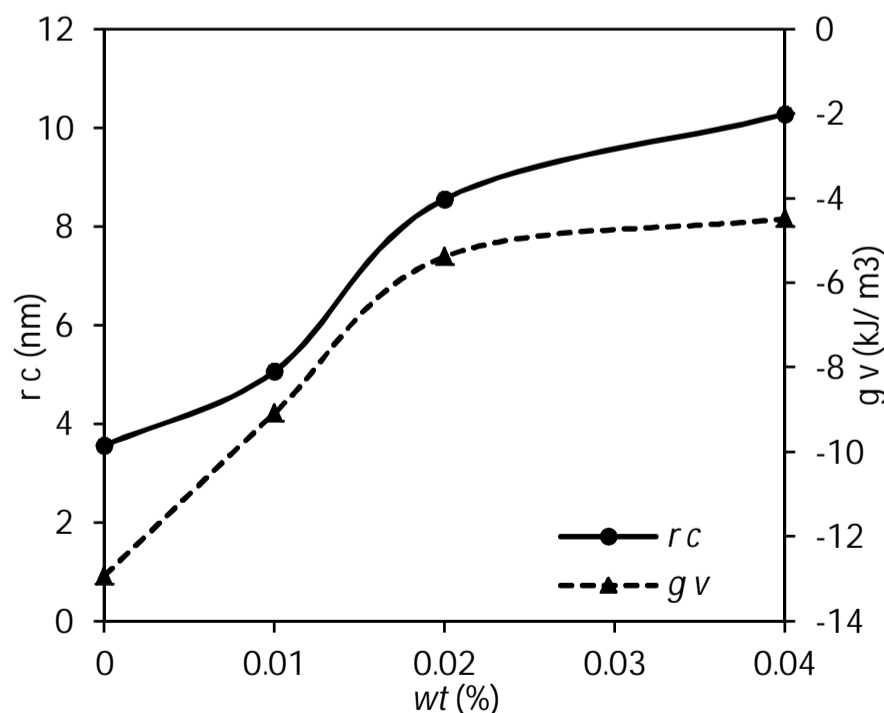


Fig. 9 Effect of nanoparticle concentrations on volumetric free energy and critical nucleation radius

شکل 9 اثر غلظت نانوذره بر انرژی آزاد حجمی و شعاع بحرانی هسته

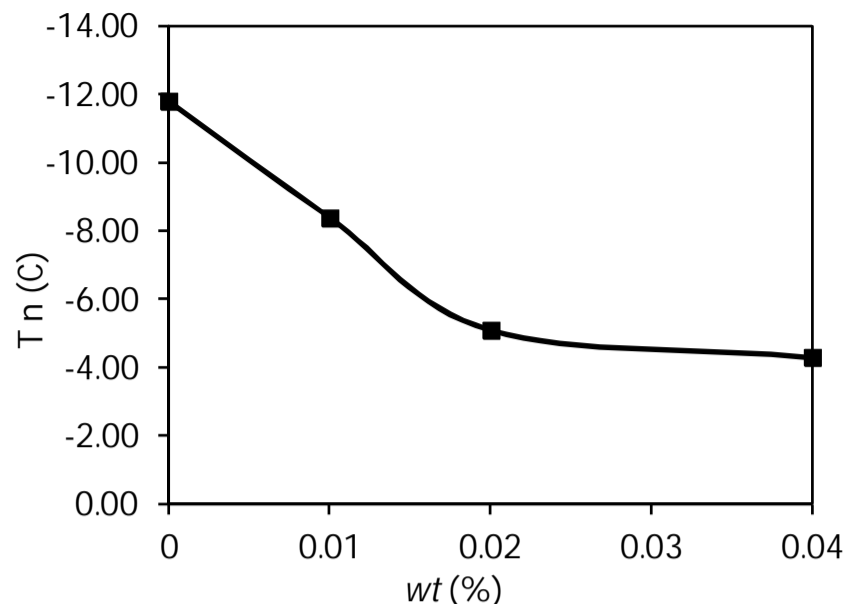


Fig. 6 Effect of Titania nanoparticle concentrations on nucleation temperature

شکل 6 اثر غلظت نانوذره بر دمای تشکیل هسته

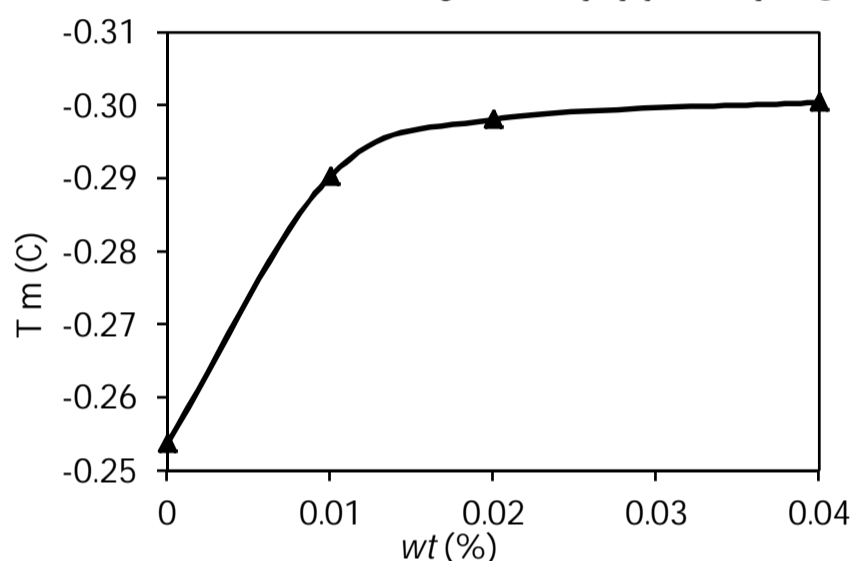


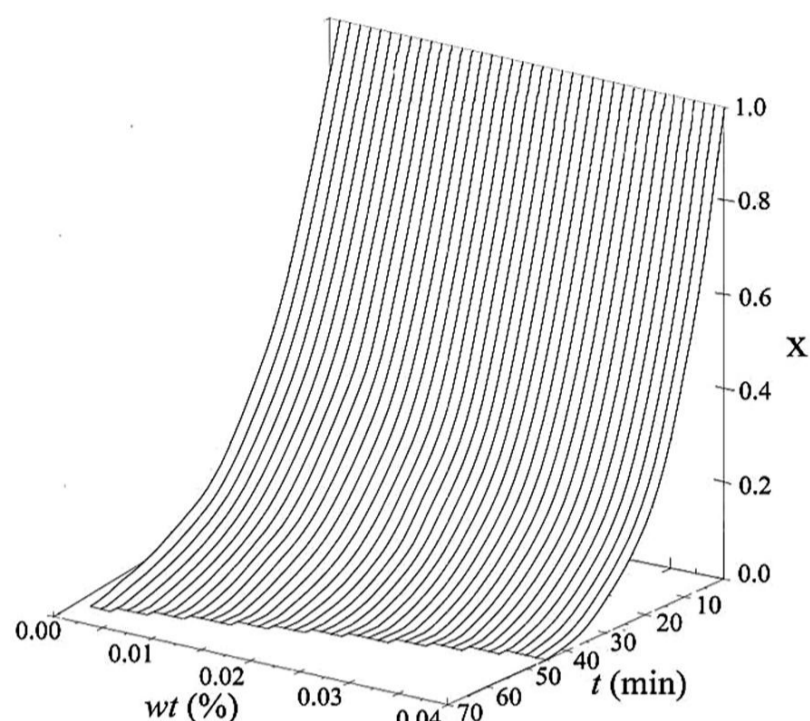
Fig. 7 Effect of Titania nanoparticle concentrations on phase change temperature

شکل 7 اثر غلظت نانوذره بر دمای تغییر فاز

بیشتر نانوسیال به دلیل حضور نانوذرات درمقایسه با سیال پایه و انترپوی کمتر مواد جامد درمقایسه با مایع، تغییر انترپوی در تبدیل نانوسیال به حالت جامد بیش از تغییر انترپوی در تبدیل سیال پایه به حالت جامد است، در نتیجه تمایل به آغاز مرحله تغییر فاز در نانوسیال، کمتر از سیال پایه بوده و دمای تغییر فاز کاهش می‌یابد [41]. کاهش نسبی دمای تغییر فاز در اثر افزودن غلظت 0.01% تیتانیا، 14% بوده و با افزایش غلظت، سرعت کاهش دمای تغییر فاز کاهش یافته و تدریجاً شیب نمودار ملایم‌تر می‌شود.

#### 5-5- بررسی درجه فراسرمایش

شکل 8 درجه فراسرمایش نانوسیال را در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوذره، درجه فراسرمایش کاهش می‌یابد. زیرا بنابر رابطه (2) و با توجه به شکل‌های 6 و 7 کاهش دمای تغییر فاز و افزایش دمای تشکیل هسته منجر به کاهش درجه فراسرمایش در اثر افزایش غلظت می‌شود. مطالعه تجربی هی و همکارانش [42] در زمینه خواص ترموفیزیکی نانوسیال در دماهای پایین و بررسی رفتار نانوسیال آلومینا در سیستم‌های ذخیره انرژی سرمایی [24] نتایج مشابهی را در کاهش درجه فراسرمایش در اثر افزایش غلظت نانوذره ارائه داده‌اند؛ بنابراین، با توجه به نتایج استنباط می‌گردد که افزایش غلظت نانوذره تیتانیا با کاهش درجه فراسرمایش به افزایش راندمان سیستم‌های ذخیره سرمایی منجر می‌شود، همچنین شکل 8 تأثیر افزودن نانوذره تیتانیا به سیال پایه آب دیونیزه را در مقایسه با نتایج تجربی نانوذره اکسیدگرافن [28] نشان می‌دهد.



**Fig. 11** liquid fraction of nanofluid in different nanoparticle concentrations

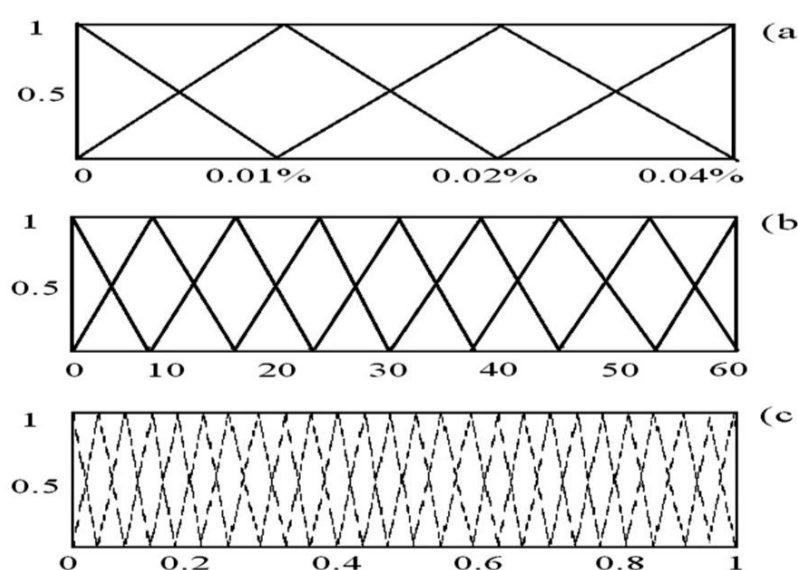
شکل 11 کسر جرمی مایع باقیمانده در فرایند انجماد در غلظت‌های مختلف نانوذره عضویت زمان توسط چهارده مثلث به کار گرفته شد. تابع عضویت خروجی در محدوده 0-1 توسط پنجاه مثلث متقارن مشخص گردید. شکل 12-a,b,c توابع عضویت مذکور را نمایش می‌دهند.

شکل 13 نتایج آزمایشگاهی کسر جرمی مایع را در مقایسه با نتایج عددی حاصل از منطق فازی، مقایسه می‌کند. نمودار مربوطه، انطباق بسیار خوب نتایج را در پایان تشکیل لایه‌های انجماد نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق نتایج، درصد خطای نسبی مقادیر به دست آمده از منطق فازی در نمودار شکل 14 ارائه گردید. مشاهده می‌شود با افزایش غلظت مقادیر خطای نسبی نتایج آزمایشگاهی و فازی افزایش می‌یابد؛ به نحوی که سطح زیر نمودار خطا در آب دیونیزه کمترین مقدار و در نتیجه کمترین میانگین را داراست، همچنین مقایسه سطح زیر نمودارها نشان می‌دهد میانگین خطا نیز با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به میانگین درصد خطای نسبی در غلظت‌های مختلف در جدول 2 ارائه شده است.

با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش منطق فازی، تابع کسر جرمی گذرای مایع (x) توسط رابطه چندجمله‌ای بر حسب پارامترهای زمان و غلظت جرمی نانوذره بر اساس معادلات (11-14) ارائه گردید.

$$x(t, wt) = d(wt)t^3 + e(wt)t^2 + f(wt)t + 1 \quad (11)$$

که در آن  $d(wt)$ ،  $e(wt)$  و  $f(wt)$  توابع بر حسب غلظت جرمی بوده و



**Fig. 12** membership functions of a) Titania nanoparticle concentration. b) time. c) liquid fraction.

شکل 12 توابع عضویت (a) غلظت نانوذره تیتانیا، (b) زمان و (c) کسر جرمی مایع

### 7-5- بررسی شار حرارتی برداشت شده و زمان انجماد

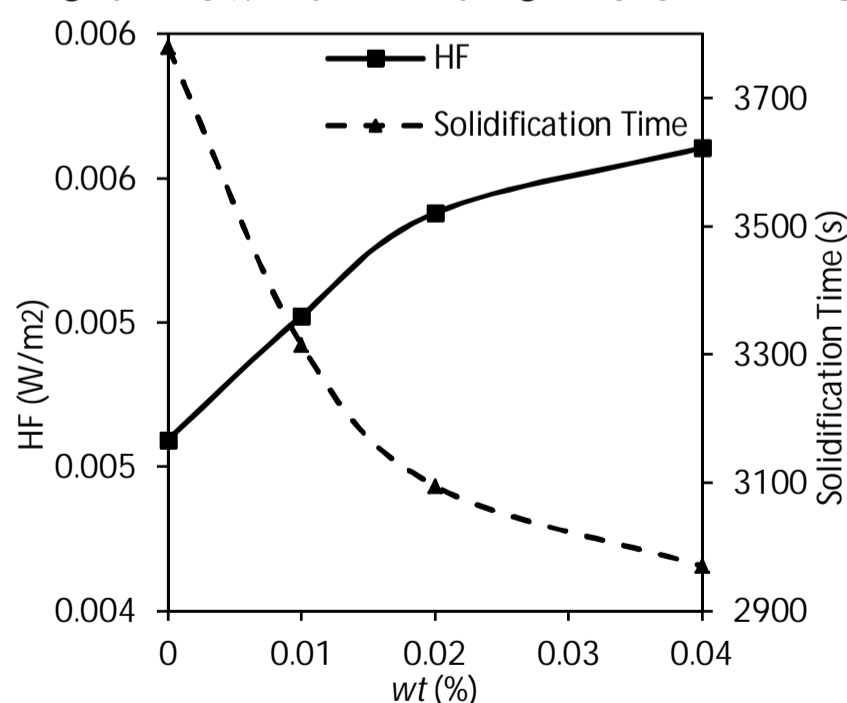
شکل 10 نتایج شارحرارتی برداشت شده مورد نیاز در انجماد کامل نانوسیال تیتانیا و زمان انجماد کامل آن را در غلظت‌های مختلف ارائه می‌کند. ملاحظه می‌شود که به دلیل افزایش هدایت حرارتی و با توجه به تئوری تبلور ناهمگن، زمان مورد نیاز برای انجماد کامل با افزایش غلظت کاهش می‌یابد و در نتیجه شرایط مناسبی در سیستم‌های ذخیره سرمایی فراهم می‌کند. مشاهده می‌شود با افزودن 0.01% جرمی نانوذره به آب دیونیزه، میزان شار حرارتی مورد نیاز، به دلیل کاهش زمان لازم برای انجماد کامل (طبق رابطه 9) 9% افزایش می‌یابد.

### 8-5- بررسی کسر جرمی گذرای مایع

چنانچه در بخش پیشین مطرح شد، تولید لایه‌های نخستین جسم جامد، پس از پایان رشد هسته‌های کریستالی و در فرایند دما ثابت (مرحله تغییر فاز) صورت می‌گیرد و در این مرحله مقدار مایع به شدت کاهش می‌یابد. شکل 11 ترکیب اثرات غلظت نانوذره و زمان را بر کسر جرمی مایع باقی‌مانده (نسبت جرم مایع باقی‌مانده به جرم مایع نخستین) در مرحله تغییر فاز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مقدار مایع باقی‌مانده در شروع به شدت کاهش می‌یابد. نتایج این نمودار بیانگر آن است که شیب تغییرات کسر جرمی، در ابتدای شروع انجماد در مقایسه با انتهای انجماد، بیشتر است؛ زیرا لایه‌های جامد، با آغاز انجماد نانوسیال/ آب دیونیزه در مجاورت بدنه کپسول تشکیل می‌شود و لایه‌های جامد تشکیل شده، نقش عایق انتقال حرارت را برعهده گرفته و سبب کاهش نرخ تبادل انرژی می‌گردد.

### 6- فازی سازی نتایج

با در نظر گرفتن توابع ورودی و خروجی مثلثی، انتخاب ساختار کمینه در روش مفهومی، ساختار بیشینه در روش تجمیع و نیز روش مرکز ثقل در تبدیل مقادیر فازی مجموعه، نتایج مربوط به کسر جرمی گذرای مایع، فازی‌سازی شده است. مقادیر ورودی و خروجی با سطوح مرتبط تعریف گردیدند. غلظت نانوذرات در چهار سطح در محدوده 0-0.04% و زمان نیز در چهارده سطح در محدوده 0-65 مشخص شده و کسر جرمی گذرای مایع به عنوان خروجی در 50 تست تعیین گردید. تابع عضویت غلظت توسط چهار مثلث و تابع



**Fig. 10** Effect of nanoparticle concentrations on solidification time and heat flux

شکل 10 اثر غلظت نانوذره بر زمان انجماد کامل و شارحرارتی برداشت شده مورد نیاز

نانوسیال، زمان و دمای تغییر فاز، درجه فراسرمایش و شار حرارتی برداشت شده مورد نیاز در تغییر فاز، به روش آزمایشگاهی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین نتایج کسر جرمی گذرای مایع به دو روش آزمایشگاهی و منطق فازی تحلیل و مقایسه گردیدند. بر پایه نتایج این پژوهش، یافته‌های مهم به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- با افزایش غلظت نانوذره تیتانیا دمای تشکیل هسته افزایش می‌یابد.
- نانوسیال تیتانیا درجه فراسرمایش کمتری نسبت به آب دیونیزه داشته و موجب افزایش راندمان سیستم می‌گردد.
- شار حرارتی برداشت شده در فرایند انجماد نانوسیال تیتانیا در مقایسه با سیال پایه آب دیونیزه بیشتر است.
- افزودن نانوذره تیتانیا به آب دیونیزه، زمان انجماد را کاهش می‌دهد.
- با افزایش غلظت نانوذرات تیتانیا، شعاع بحرانی هسته و انرژی آزاد حجمی افزایش می‌یابد.
- منطق فازی روش عددی قابل اطمینان در ارائه نتایج کسر جرمی گذرای مایع در زمان‌های مختلف است.
- خطای منطق فازی در ارائه نتایج کسر جرمی گذرای مایع، با افزایش غلظت نانوذره تیتانیا افزایش می‌یابد.

### 8- فهرست علائم

A	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )
a, b	رأس قاعده مثلث تابع عضویت مثلثی
c	رأس فوقانی مثلث تابع عضویت مثلثی
$g_v$	انرژی آزاد حجمی (kJm <sup>-3</sup> )
$h_v$	انتالپی حجمی (kJ m <sup>-3</sup> )
$h_{sl}$	گرمای نهان انجماد آب (kJkg <sup>-1</sup> )
HF	شارحرارتی برداشت شده (kWm <sup>-2</sup> )
K	ضریب هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
m	جرم (kg)
$r_c$	شعاع بحرانی تشکیل هسته (nm)
$S_v$	انتروپی حجمی (kJK <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )
SD	درجه فراسرمایش (°C)
$\bar{T}$	میانگین دماهای تشکیل هسته و تغییر فاز (K)
T	دما (°C)
t	زمان تغییر فاز در انجماد کامل (S)
wt	غلظت جرمی نانوذره (%)
x	تابع کسر جرمی مایع
علائم یونانی	
$\gamma_w$	انرژی آزاد سطح مشترک آب- یخ (Jm <sup>-2</sup> )
$\rho$	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )
$\phi_p$	کسر حجمی نانوسیال
زیرنویس‌ها	
DW	آب دیونیزه
i	یخ
m	تغییر فاز

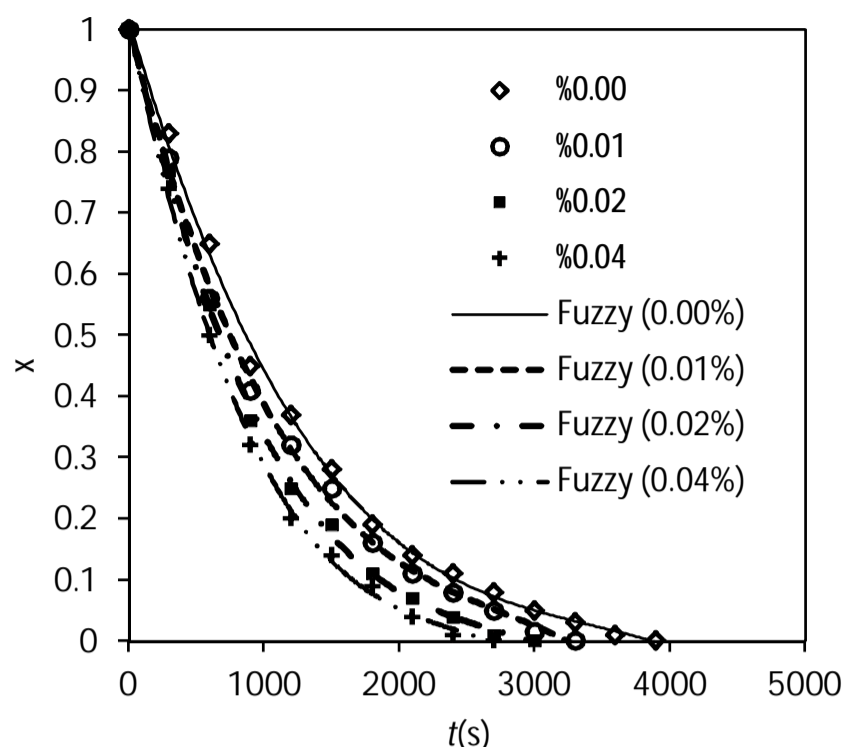


Fig. 13 Comparison of experimental results with Fuzzy logic modelling to predict the liquid fraction

شکل 13 مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی به روش منطق فازی در پیشگویی کسر جرمی گذرای مایع هنگام انجماد

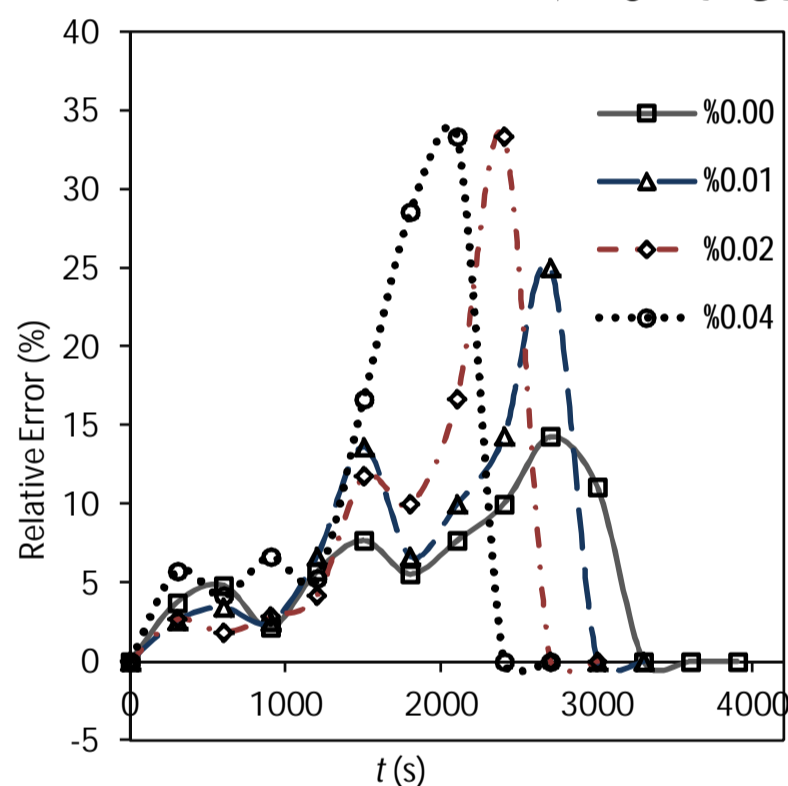


Fig. 14 Relative error of Fuzzy logic modelling to predict the experimental liquid fraction

شکل 14 خطای نسبی مدل‌سازی منطق فازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کسر جرمی گذرای مایع در انجماد

جدول 2 میانگین خطای نسبی

Table 2 Average of relative error

غلظت (%)	0.00	0.01	0.02	0.04
میانگین خطای نسبی (%)	5.20	7.07	7.57	10.04

طبق روابط (12-14) بیان می‌گردد.

$$d(wt) = -wt \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-11} \quad (12)$$

$$e(wt) = -5 \times wt \times 10^{-6} + 2 \times 10^{-7} \quad (13)$$

$$f(wt) = 0.1136 \times wt^2 - 0.0121 \times wt - 0.0008 \quad (14)$$

### 7- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، مشخصه‌های انجماد نانوسیال تیتانیا (با سیال پایه آب دیونیزه) شامل دمای تشکیل هسته، شعاع بحرانی هسته، انرژی آزاد حجمی



- [21] Sh. Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei, Thermal energy storage behavior of  $Al_2O_3$ - $H_2O$  nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 483, pp. 73- 77, 2009.
- [22] X. J. Wang, X. F. Li, Y. H. Xu, D. S. Zhu, Thermal energy storage characteristics of  $Cu$ - $H_2O$  nanofluids, *Energy*, Vol. 78, pp. 212-217, 2014.
- [23] L. Wen, X. Feng, D. Yong, C Shi, Accurate determination of latent heat via differential scanning calorimetry, *Journal of instrumental Analysis*, Vol. 28, No. 2, pp. 9-16, 2006.
- [24] A. Zabalegui, Dh. Lokapur, H. Lee, Nanofluid PCMs for thermal energy storage: Latent heat reduction mechanisms and a numerical study of effective thermal storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 1145-1154, 2014.
- [25] J. Güemez, C. Fiolhais, M. Fiolhais, Revisiting black's experiments on the latent heats of water. *Physiol Teach*, Vol. 40, pp. 26-31, 2002.
- [26] M. Bovand, S. Rashidi, J. A. Esfahani, Enhancement of heat transfer by nanofluids and orientations of the equilateral triangular obstacle, *Energy conversion and management*, Vol. 97, pp. 212 -223, 2015.
- [27] J. M. Khodadadi, L. Fan, H. Babaei, Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 418-444, 2013.
- [28] Y. Liu, X. Li, P. Hu, G.a Hu, Study on the supercooling degree and nucleation behavior of water-based graphene oxide nanofluids PCM, *international journal of refrigeration*, Vol. 50, pp. 80 -86, 2015.
- [29] P. Chandrasekaran, M. Cheralathan, V. Kumaresan, R. Velraj, Solidification behavior of water based nanofluid phase change material with a nucleating agent for cool thermal storage system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 41, pp. 157-163, 2014.
- [30] V. Kumaresan, P. Chandrasekaran, M. Nanda, A. K.Maini, R. Velraj, Role of PCM based nanofluids for energy efficient cool thermal storage system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, pp. 1641-1647, 2013.
- [31] M. M. Saadatmand, M. E. Yazdanshenas, S. Rezaei-Zarchi, B. Yousefi-telori, M. Negahdary, Investigation of anti-microbial properties of chitosan-TiO<sub>2</sub> Nanocomposite and its use on sterile gauze pads, *Medical Laboratory Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 59 -72, 2012 (In Persian فارسی).
- [32] S. M. A. Moosavi, A. Khataee, S. Moasses-Ghaffari, Study of the photocatalytic effects of nitrogen-doped titanium dioxide nanoparticles on growth inhibition and apoptosis induction in K562 cell line, *Scientific Journal Of Kurdistan University Of Medical Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 47 - 58, 2013(In Persian).
- [33] L. Fedele, L. Colla, S. Bobbo, Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 1359-1366, 2012.
- [34] S. M. S. Murshed , K. C. leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of  $TiO_2$ -water based nanofluids, *International Journal of thermal sciences*, Vol. 44, pp. 367-373, 2005.
- [35] H. W. Coleman, W. G. Steele, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [36] M. Mehrabi, M. Sharifpur, J. P. Meyer, Viscosity of nanofluids based on an artificial intelligence model, *International communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 16-21, 2013.
- [37] A. Karimi, E. Rezaei, M. Shahhosseini, M. Aghakhani, Fuzzy logic to predict heat transfer in an air cooler equipped with different tube inserts, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 53, pp. 141-147, 2012.
- [38] O. Kisi, Daily pan evaporation modelling using a neuro-fuzzy computing technique, *Journal of Hydrology*, Vol. 329, pp. 636- 646 ,2006.
- [39] A. A. Altohamy, M. F. Abd Rabbo, R.Y. Sakr, A. A. A. Attia, Effect of water based  $Al_2O_3$  nanoparticle PCM on cool storage performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 84, pp. 331-338, 2015.
- [40] J. K. H. Ma, B. Hadzija, *Basic Physical Pharmacy*, Revised Edition, pp. 29-30, Burlington: Jones & Bartlett Publishers, 2013.
- [41] M. J. Pikal, D. J. W. Grant, A theoretical treatment of changes in energy and entropy of solids caused by additives or impurities in solid solution, *Internatioal Journal of Pharaeutics*, Vol. 39, pp. 243-253, 1987.
- [42] Q. He, Sh. Wang, M. Tong, Y. Liu, Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage, *Energy conversion and management*, Vol. 64, pp. 199 -205, 2012.

تشکیل هسته n

نانوذره NP

نانوسیال NF

محیط اطراف محفظه تست (وان ایزوله) Surr

## 9- مراجع

- [1] E. Oróa, A. de Graciaa, A. Castella, M. M. Faridb, L. F. Cabeza, Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, *Applied Energy*, Vol. 99, pp. 513-533, 2012.
- [2] X. Q. Zhai, X. L. Wang, T. Wang, R. Z. Wang, A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 108-120, 2013.
- [3] S. L. Chen, P. P. Wang, T. Sh. Lee, An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 299-306, 1998.
- [4] F. Agyenim, P. Eames, M. Smyth, Experimental study on themelting and solidificationbehaviour of a medium temperature phase change material (Erythritol)system augmented with fins to power a  $LiBr/H_2O$  absorption cooling system, *Renew. Energy*, Vol. 36, pp. 108-117, 2011.
- [5] E. S. Mettawee, G. M. R. Assassa, Thermal conductivity enhancement in a latentheat storage system, *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 839-845, 2007.
- [6] J. M. Khodadadi, L. Fan, H. Babaei, Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 418-444, 2013.
- [7] T. P. Teng, Thermal conductivity and phase change properties of aqueous alumina nanofluid, *Energy conversion and management*, Vol. 67, pp. 369 - 375, 2013.
- [8] C. K. Kim, G. J. lee, C. K. Rhee, A study on heat transfer characteristics of spherical and fibrous alumina nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 542, pp. 33-36, 2012.
- [9] H. Kargarsharifabad, M. Mirzaei Amirabad, Design and construction of thermal conductivity measurement device and measuring of magnetic nanofluids thermal conductivity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.15, No. 5, pp.419-422, 2015 (In Persian فارسی).
- [10] T. I Kim, W. J. Chang, S. H. Chang, Flow boiling CHF enhancement using  $Al_2O_3$  nanofluid and  $Al_2O_3$  nanoparticle deposited tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2021-2025, 2011.
- [11] Y. Zeng, L. W. Fan, Y.Q. Xiao, Z.T. Yu, K. F. Cen, An experimental investigation of melting of nanoparticle enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom- heated vertical cylindrical cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 111- 117, 2013.
- [12] M. Moghiman, B. H. Aslani, Influence of nanoparticles on reducing and enhancing evaporation mass transfer and its efficiency, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, pp. 114-118, 2013.
- [13] M. Nasiri, M. M. Rashidi, Numerical study of subcooled flow boiling of water-  $Al_2O_3$  in vertical sinusoidal wavy channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.14, No. 11, pp.195- 203, 2014 (In Persian فارسی).
- [14] Y. M. F. El Hasadi, J. M. Khodadadi, One-dimensional Stefan problem formulation for solidificationof nanostructure-enhanced phase change materials (NePCM), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, pp. 202-213, 2013.
- [15] P. Chandrasekaran, M. Cheralathan, V. Kumaresan, R. Velraj, Enhanced heat transfer characteristics of water based copper oxide nanofluid PCM (phasechange material) in a spherical capsule during solidification forenergyefficient cool thermal storage system, *Energy*, Vol. 72, pp. 636- 642, 2014.
- [16] L. W. Fan, X. L. Yao, X. Wang, Y.Y. Wu, X. L. Liu, X. Xu, ZT. Yu, Non-isothermal crystallization of aqueous nanofluids with high aspect-ratio carbon nano-additives for cold thermal energy storage, *Applied Energy*, Vol. 138, pp. 193-201, 2015.
- [17] E. Gunther, L. Huang, H. Mehling, Ch. Dotsch, Subcooling in PCM emulsions- Part 2: Interpretation in terms of nucleation theory, *Thermochimica Acta*, Vol. 522, pp. 199-204, 2011.
- [18] Sh. Yamanaka, N. Ito, K. Akiyama, A. Shimosaka, Y. Shirakawa, Heterogeneous nucleation and growth mechanism on hyrophilic and hydrophobic surface, *Advanced Power Technology*, Vol. 23, pp. 268 -272, 2012.
- [19] Y. Zhang, M. Wang, X. Lin, W. Huang, Effect of substrate surface microstructure on heterogeneous nucleation behavior, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 67 -72, 2012.
- [20] X. Y. Liu, Heterogeneous nucleation or homogeneous nucleation?, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 112, pp. 9949-9955, 2000.