ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# ارائه مدلی برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال: تاثیر لایه بین سطحی و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات

زهره شمس<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 9177948944.

چکیدہ	اطلاعات مقاله
این مقاله مدلی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالها ارائه میکند. در این مدل، تاثیر وجود لایهی بین سطحی در سطح مشترک ذره- سیال و توزیع غیریکنواخت اندازهی نانوذرات معلق درون سیال در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده شامل اثرات ضریب هدایت حرارتی نانوذره و سیال پایه، درصد حجمی و قطر نانوذرات، دما و حرکت برآونی می،اشد. دقت مدل ارائه شده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 مهر 1393 پذیرش: 22 مهر 1393 ارائه در سایت: 11 آذر 1393
— نانوسیال های آب- اکسید آلومینیم، اتیلن گلیکول- اکسید آلومینیم، آب- اکسید مس، اتیلن گلیکول- اکسید مس، اتیلن گلیکول- آلومینیم و	کلید واژگان:
اًب- دی اکسید تیتانیم ارزیابی شده و تاثیرات دما، قطر و کسر حجمی نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال بررسی شده است. نتایج	نانوسيال
نشان میدهد که در نظر گرفتن همزمان وجود لایه بین سطحی و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات سبب افزایش دقت مدلسازی میشود و	نانوذرات
خطای مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در دسترس حداکثر 5 درصد است. مقایسه نتایج بهدست آمده از مدل ارائه شده با اطلاعات	ضريب هدايت حرارتي مؤثر
آزمایشگاهی موجود و سایر مدلها نشان میدهد که نتایج این مدل تطابق خوبی با دادههای آزمایشگاهی داشته و مقادیر دقیقتری نسبت به سایر مدلها ارائه میکند.	توزیع غیریکنواخت لایه بین سطحی

# A model for the effective thermal conductivity of nanofluids–effect of interfacial layer and non-uniform size distribution of nanoparticles

# Zohreh Shams<sup>1\*</sup>, Mohammad Moghiman<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran 2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 23 September 2014 Accepted 14 October 2014 Available Online 22 November 2014	This work presents a model for calculating the effective thermal conductivity of nanofluids. In the method, the effect of non-uniform sizes of nanoparticles and interfacial layer is investigate simultaneously. The developed model for the thermal conductivity of nanofluids takes in account the effects of thermal conductivity of base fluids, thermal conductivity, volume fractic
<i>Keywords:</i> Nanofluid Nanoparticle Effective thermal conductivity,Non-uniform size Interfacial layer	and the size of nanoparticles, the interfacial layer, non-uniform sizes of nanoparticles, Brownian motion and temperature. Hence, this model has the capability of offering both analytical and numerical predictions. The accuracy of the proposed model for the effective thermal conductivity of water- <b>Al</b> <sub>2</sub> <b>O</b> <sub>3</sub> , ethylene glycol- <b>Al</b> <sub>2</sub> <b>O</b> <sub>3</sub> , water- <b>CuO</b> , ethylene glycol- <b>CuO</b> , ethylene glycol- <b>Al</b> , water- <b>TiO</b> <sub>2</sub> is investigated. The effect of temperature, size of nanoparticles and volume fraction of nanoparticles are determined. Results show that the interfacial layer at the nanoparticle-liquid interface and non-uniform sizes of nonparticles are the most important parameters for calculating the thermal conductivity of nanofluids. Comparison between the result and available experimental data of several types of nanofluids indicates that the proposed model provides

accurate results with maximum error of 5%.

# ایستمن و همکاران با پخش 5 درصد حجمی از نانوذرات اکسید آلومینیم و اکسید مس درون آب، بهترتیب 29 و 60 درصد افزایش در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال گزارش کردند[3]. نتایج مطالعه لیو همکاران [4] نشان میدهد که نانوسیال حاوی 4 درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس با قطر 35 نانومتر در اتیلن گلیکول، سبب 20 درصد افزایش در ضریب هدایت حرارتی میشود. آزمایش دی و کل[5] نشان میدهد که در دمای 30 درجه

خواص جالب نانوسیال ها و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان میدهند سبب شده که این گروه از سیالات در سال های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند. افزودن نانوذرات به سیال پایه تاثیر قابل توجهی روی ضریب هدایت حرارتی داشته و این کمیت بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱،2].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.10.6

دانگاه زمیت مدرس

سلسیوس با 20/2 درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال روغن موتور - اکسید مس نسبت به سیال پایه حدود 10/4 درصد افزایش می یابد و این افزایش در دمای 80 درجه سلسیوس به 11/9 درصد می رسد. مطالعه پنگ و همکاران [6] نشان می دهد که با افزودن 5/0 درصد حجمی از نانوذرات اکسید آلومینیم و دی اکسید سیلسیم به متانول ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بهترتیب 10/74 و 14/26درصد افزایش می یابد.

پیشرفتهای اخیر در نانوتکنولوژی لزوم تعیین دقیق خواص نانوسیال را مشخص می سازد. ارائه مدل مناسب برای ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته نانوسیالات یکی از موضوعهای جالب و مورد توجه در این حوزه است. مدلهای کلاسیک مانند مدل ماکسول [7] قادر به پیشبینی دقیق هدایت حرارتی افزایش یافته نانوسیالات نمی باشند. کبلینسکی و همکاران [8] چهار عامل تاثیرگذار در افزایش انتقال حرارت در نانوسیالها را حرکت برآونی<sup>ا</sup> نانوذرات، لایه بین سطحی، اثر کلاستر<sup>2</sup> نانوذرات و طبیعت انتقال حرارت در نانوذرات معرفی کردند. لانگو و همکاران [9] با استفاده از روش شبکه عصبی با سه و چهار ورودی، مدلی برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسید مس ارائه کردند. با استفاده از روشهای بهینهسازی غیرخطی و روش شبکه عصبی جمال آبادی و زمزمیان [10] اثر برخی کمیتها مانند دما، غلظت و اندازه نانوذرات روی ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال حاوی نانوذرات اكسيد آلومينيم را برررسي كردند. برخي از محققان مانند يو و همكاران [11] و زيو همكاران [12]، با در نظر گرفتن اثر لايه بين سطحي، مدلهای کلاسیک نظیر مدل ماکسول را اصلاح کرده و مدلهای جدیدی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه کردند. لئونگ و همکاران [13] با در نظر گرفتن لایه بین سطحی، مدلی برای ضریب رسانایی نانوسیال پیشنهاد کردند. مورشد و همکاران [14] مدلی برای ضریب هدایت نانوسیال ارائه کرده و کمیتهای موثر بر آن از جمله قطر ذرات، نانولایه، حرکت نانوذرات و فعل و انفعال نانوذرات را در نظر گرفته و نشان دادند که علت اصلی افزایش ضریب هدایت نانوسیال در سهم استاتیکی ضریب رسانایی است. با در نظر گرفتن تاثیر لایه بین سطحی جنگ و همکاران [15] یک مدل عددی برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه کردند. شمس و همکاران [16] با در نظر گرفتن لایه بین سطحی با ضخامت ثابت، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات اكسيد آلومينيم و اكسيد مس با توزيع غيريكنواخت را تعيين كردند. با وجود آنکه نانوذرات پخش شده در سیال ممکن است قطرهای مختلف داشته باشند، در بیشتر مطالعات انجام شده توزیع اندازه نانوذرات یکنواخت و با استفاده از یک قطر میانگین انجام شده است. هاولین و بن-آوراهام [17]، توزيع اندازه نانوذرات و توزيع نانوذرات در سوسپانسيون را بررسی كردند. وانگ و همکاران [18] مطالعهای آزمایشگاهی روی نانوسیال اتانول- دی اكسيد سيلسيم انجام دادند و نشان دادند كه توزيع اندازه نانوذرات و کلاسترها از قانون فرکتال<sup>3</sup> پیروی میکند. ایکسیو و همکاران **[19]** براساس توزيع فركتال اندازه نانوذرات و انتقال حرارت جابجايي ناشى از حركت برآوني نانوذرات، یک مدل برای ضریب هدایت نانوسیال ارائه کردند. براساس توزیع فرکتال اندازه نانوذرات و انتقال حرارت جابجایی ناشی از حرکت برآونی، فنگ و همكاران[20] يك مدل تحليلي - عددي ارائه كردند.

تشکیل لایه بین سطحی در سطح مشترک نانوذره- سیال گرچه دارای

ضخامتی در حد چند نانومتر است، میتواند نظم و ترتیب ساختار اتمی را در ناحیه سطح مشترک تغییر داده و نقش مهمی در انتقال حرارت از جامد به سیال مجاور بازی میکند. همچنین، نانوذرات معلق در نانوسیال اندازههای مختلف داشته و توزيع غيريكنواخت اندازه نانوذرات مىتواند بر ضريب هدايت حرارتی نانوسیال تاثیرگذار باشد. با وجود مطالعات زیادی که پیرامون رفتار حرارتی نانوسیالات انجام شده است تا کنون مدلی که به طور همزمان تاثیر وجود لایه بین سطحی و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات را در نظر بگیرد، برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه نشده است. در مطالعه حاضر یک مدل تحلیلی- عددی برای ضریب رسانایی نانوسیال با در نظر گرفتن لایه بین سطحی در سطح مشترک سیال- ذره و نیز در نظر گرفتن اندازه غیریکنواخت نانوذرات معلق در نانوسیال، ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده، ضريب هدايت حرارتي نانوسيال هاي آب- اكسيد آلومينيم، اتيلن گليكول- اكسيد آلومينيم، آب- اكسيد مس، اتيلن گليكول- اكسيد مس، اتيلن گليكول- آلومينيم و آب- دى اكسيد تيتانيم ارزيابى شده و تاثيرات دما، قطر و کسر حجمی نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال بررسی شدہ است.

# 2- مدلهای موجود برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

#### 2-1- مدل ماكسول

مدل ماکسول برای تعیین ضریب هدایت حرارتی مؤثر سوسپانسیونهای حاوی درصد حجمی کمی از ذرات کروی که بهطور تصادفی درون سیال پایه پخش شده و مخلوط همگنی را تشکیل دادهاند، ارائه شده است[7]:

$$k_{\rm eff} = \frac{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} + 2\phi(k_{\rm p} - k_{\rm f})}{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} - \phi(k_{\rm p} - k_{\rm f})}$$
(1)

که در آن  $k_p$  ضریب هدایت حرارتی ذرات،  $k_f$  ضریب رسانایی سیال پایه و  $k_p$  خریب هدایت مؤثر نانوسیال میباشد. کاربرد مدل ماکسول محدود به سوسپانسیونهای حاوی ذرات با اندازه بزرگ و با غلظت پایین است. 2-2- مدل لئونگ

لئونگ و همکاران با در نظر گرفتن لایه بین سطحی به عنوان یک بخش مستقل و حل معادله انرژی در حالت دائم و در مختصات کروی، مدل معادله 2 را برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات کروی ارائه کردند[13]:

$$\begin{aligned} k_{\rm eff} &= \\ \frac{(k_{\rm p} - k_{\rm lr}) \phi_{\rm p} k_{\rm lr} [\mathbf{2} \gamma_1{}^3 - \gamma^3 + \mathbf{1}] + (k_{\rm p} + \mathbf{2} k_{\rm lr}) \gamma_1{}^3 [\phi_{\rm p} \gamma^3 (k_{\rm lr} - k_{\rm f}) + k_{\rm f}]}{\gamma_1{}^3 (k_{\rm p} + \mathbf{2} k_{\rm lr}) - (k_{\rm p} - k_{\rm lr}) \phi_{\rm p} [\gamma_1{}^3 + \gamma^3 - \mathbf{1}]} \end{aligned}$$
(2)

که در این رابطه  $\frac{t}{r_p} + 1 = \gamma$ ,  $\frac{t}{2r_p} + 1 = \gamma$  است. مدل لئونگ فقط شامل سهم استاتیکی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است و در آن توزیع اندازه نانوذرات یکنواخت فرض شده است.

#### 2-3- مدل مورشد

مورشد و همکاران با در نظر گرفتن سهم دینامیکی ضریب رسانایی نانوسیال مدل لئونگ را اصلاح کردند[14]. براساس این مدل، ضریب هدایت نانوسیال از رابطه 3 محاسبه می شود.

<sup>1-</sup>Brownian motion

<sup>2-</sup>Cluster 3-Fractal low

$$k_{eff} = + \left\{ \frac{1}{2} \rho_{cp} c_{p-cp} d_s \sqrt{\frac{3K_B T (1 - 1.5\gamma^3 \phi_p)}{2\pi \rho_{cp} \gamma^3 r_p^3}} + \frac{G_T}{6\pi \eta \gamma r_p d_s} \right\} + \left\{ \phi_p^2 \gamma^6 k_f (3A^2 + \frac{3A^2}{4} + \frac{9A^3}{16} \frac{k_{cp} + 2k_f}{2k_{cp} + 3k_f} + \frac{3A^4}{2^6} + \cdots) \right\} + \left\{ \frac{(k_p - \mathbf{k}_{lr}) \phi_p \mathbf{k}_{lr} [2\gamma_1^3 - \gamma^3 + 1] + (\mathbf{k}_p + 2\mathbf{k}_{lr}) \gamma_1^3 [\phi_p \gamma^3 (\mathbf{k}_{lr} - \mathbf{k}_f) + \mathbf{k}_f]}{\gamma_1^3 (\mathbf{k}_p + 2\mathbf{k}_{lr}) - (\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_{lr}) \phi_p [\gamma_1^3 + \gamma^3 - 1]} \right\}$$
(3)

که در رابطه <sub>L</sub><sub>I</sub> ضریب رسانایی نانو لایه، *η* ویسکوزیته محیط سیال و *G*<sub>T</sub> پتانسیل <sup>1</sup>DLVO ناشی از و <sup>1</sup>DLVO ناشی از واکنش بین ذرات است. مدل مورشد شامل اثرات اندازه نانوذرات، نانولایه، دما، حرکت برآونی نانوذرات و فعل و انفعال ذرات است.

#### 2-4- مدل فنگ

فنگ و همکاران بر اساس ویژگی فرکتال نانوذرات درون سیال، یک مدل تصادفی برای اندازه نانوذرات ارائه کرده و با استفاده از آن، مدلی برای ضریب هدایت نانوسیال ارائه کردند که شامل اثرات جابجایی ناشی از حرکت برآونی ذرات است[20]:

$$k_{\rm eff} = \frac{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} - 2\phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})}{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} + \phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})} + \frac{d_{\rm f} \sum_{i=1}^{J} \lambda_{\rm i} \left( 2.0 + 0.5 \frac{\rho_{\rm f}}{c_{\rm p} k_{\rm f}} \right)}{Pr \sum_{i=1}^{J} \lambda_{\rm i}^{2}}$$
(4)

قطر مولکول مایع،  $\lambda_{
m i}$  قطر نانوذرات و Pr عدد پرانتل است.  $d_{
m f}$ 

# 3- مدل ارائه شده برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

در سوسپانسیونهای حاوی نانوذرات، مولکولهای مایع نزدیک به سطح ذرات به سطح نانوذره چسبیده و یک لایه بین سطح مایع - جامد تشکیل می دهند. با این که ضخامت این لایه در حد چند نانومتر است، اما نقش مهمی در انتقال حرارت از جامد به سیال مجاور بازی می کند. زیرا تشکیل این لایه، نظم و ترتیب ساختار اتمی را در ناحیه سطح مشترک افزایش می دهد. این لایه که بین سطح نانوذرات و مولکولهای مایع تشکیل می شود، خواص ترموفیزیکی متفاوت با خواص توده سیال و ذرات جامد از خود نشان داده و به عنوان نانوذرات و لایه بین سطحی<sup>2</sup> به عنوان "نانوذره مرکب"<sup>3</sup> در نظر گرفته شده است. در پخش نانوذرات با قطر میانگین معین، نانوذرات معلق در سیال ممکن است اندازههای مختلف داشته باشند و توزیع غیریکنواخت قطر ذرات بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تاثیرگذار است. مدل حاضر با در نظر گرفتن همزمان لایه بین سطحی و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات گرفتن همزمان لایه بین سطحی و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال شامل سهم استاتیکی و سهم دینامیکی است. سهم استاتیکی ناشی از انتقال حرارت هدایتی در سیال، نانولایه و نانوذره است و سهم دینامیکی ناشی از حرکت برآونی نانوذرات است. در گسترش مدل از فرضیات زیر استفاده شده است:

- نانوسیال شامل سه جزء نانوذره، لایه بین سطحی و سیال پایه است.

- توزيع قطر نانوذرات غيريكنواخت است.

- نانوذرات کروی معلق در نانوسیال با شعاع r<sub>p</sub>، ضریب رسانایی k<sub>p</sub> و درصد حجمی ø<sub>p</sub> هستند.

- لایه بینسطحی بهصورت یک لایه کروی به ضخامت t، ضریب رسانایی در سطح مشترک ذره-سیال تشکیل میشود.

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دورہ 15، شمارہ 1

- انتقال حرارت درون سیستم در حالت دائم و دوبعدی است. - در مدلسازی سهم استاتیک، نانوذرات آنقدر از یکدیگر دور فرض میشوند که هیچ واکنشی بین ذرات رخ نمیدهد. - برای تعیین ضخامت لایه بین سطحی از رابطه لنگمیور بهصورت

معادله 5 استفاده شده است[18].

$$t = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{4M}{\rho_f N_A}\right)^{1/3}$$
(5)
$$\sum_{k=1}^{3} e_k \left(\sum_{k=1}^{3} e_k \right)^{1/3}$$

که در این رابطه *M*وزن مولکولی سیال، *p*<sub>f</sub> چگالی سیال و N<sub>A</sub> عدد آواگادرو است.

#### 3-1- سهم استاتيكي ضريب هدايت نانوسيال

سهم استاتیکی ضریب هدایت نانوسیال، از حل معادله انرژی بهدست میآید. معادله انرژی حاکم بر میدان دمایی در سه ناحیه نانوذره، نانولایه و سیال پایه، در مختصات کروی بهصورت معادله 6 است:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T_i}{\partial \theta} \right) = 0 \qquad i = p, lr, f$$
(6)

با فرض میدان دمای خارجی یکنواخت ™، شرایط مرزی معادله 6 بهصورت رابطه 7 نوشته می شود:

$$T_{\rm p}(\boldsymbol{r} \to \boldsymbol{0}) = T_{\rm p}(\boldsymbol{r} \to \boldsymbol{0}) = T_{\infty}$$

$$(7)$$

شرایط مرزی در سطوح مشترک نانوذره و لایه بین سطحی عبارت است از:

$$T_{\rm p} = T_{\rm lr}, \quad -k_{\rm p} \frac{dT_{\rm p}}{dr} = -k_{\rm lr} \frac{dT_{\rm lr}}{dr} \qquad : \quad r = r_{\rm p,s}$$
(8)

همچنین شرط مرزی در سطح مشترک نانولایه و سیال پایه بهصورت رابطه 9 است:

سيال يايه بهصورت معادلات 10-12 بهدست ميآيد[13]،

$$\frac{dT_{\rm p}}{dz} = \frac{\mathbf{3}k_{\rm lr}}{k_{\rm p} + \mathbf{2}k_{\rm lr}} T_{\infty} \tag{10}$$

$$\frac{dT_{\rm lr}}{dz} = \left[ \mathbf{1} + \frac{\mathbf{1}}{\left(\mathbf{1} + t/2r_{\rm p}\right)^3} \frac{k_{\rm lr} - k_{\rm p}}{k_{\rm p} + 2k_{\rm lr}} \right] T_{\infty}$$
(11)

$$\frac{dT_{\rm f}}{dz} = T_{\infty} \tag{12}$$

که z = r **cos** *θ* است. با معلوم بودن گرادیانهای دمایی، سهم استاتیکی ضریب هدایت نانوسیال بهصورت رابطه 13 بیان میشود[13]:



**شکل1** الف) طرح شماتیک نانوذرات مرکب پخش شده درون سیال پایه ب) یک نانوذره کروی با لایه بین سطحی

<sup>1-</sup>Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeck

<sup>2-</sup>Interfacial layer 3-Complex nanoparticle (cp)

 $k_{\rm dy} =$ 

$$\sum_{l=1}^{m} \left( -\frac{1}{2} \rho_{\rm cp} c_{\rm p-cp} d_{\rm s} \sqrt{\frac{3K_{\rm B} T (1 - 1.5\gamma^{3} \phi_{\rm p})}{2\pi \rho_{\rm cp} \gamma^{3} r_{\rm p}^{3}}} \right) \frac{n_{\rm p,l}}{N_{\rm t}}$$
(20)

با محاسبه سهم استاتیکی و دینامیکی ضریب رسانایی نانوسیال، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه  $k_{
m nf}$  =  $k_{
m st}$  +  $k_{
m dy}$  تعیین میشود. ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال نیز از رابطه  $k_{
m eff}$  =  $k_{
m nf}/k_{
m f}$  بهدست میآید.

3-3- مدل فركتال

سیستمهای فرکتال، سیستمهایی هستند که اگر به گروههای کوچکتر تقسیم شود، هر گروه شبیه گروه بعدی است. مطالعات محققان نشان می دهد که توزیع قطر نانوذرات و توزیع نانوذرات در سوسپانسیونها، فرکتال هستند[18.17]. توصیف کمی سیستمهای فرکتال معمولا با قانون توانی بیان می شود. با استفاده از قانون توانی، تعداد کل نانوذرات پخش شده در یک نانوسیال با کسر حجمی م<sup>0</sup> که در آن قطر نانوذرات بین ما mb و max (به-ترتیب کوچکترین و بزرگترین قطر نانوذرات) است، از رابطه 21 به دست می آید[20]،

$$N_{\rm t} = \left(\frac{d_{\rm min}}{d_{\rm max}}\right)^{D_{\rm fr}} \tag{21}$$

که در این رابطه بعد فرکتال (D<sub>fr</sub>) از رابطه 22 محاسبه میشود،

$$D_{\rm fr} = 2 - \frac{\ln \phi_{\rm p}}{\ln \left(\frac{d_{\rm min}}{d_{\rm max}}\right)}$$
(22)

براساس این قانون، قطر نامین نانوذره معلق در نانوسیال را میتوان از رابطه 23 تعیین کرد [20]،

$$d_{i} = \frac{d_{\min}}{1 - R_{i}^{1/D_{fr}}} = \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}}\right) \frac{d_{\max}}{1 - R_{i}^{\frac{1}{D_{fr}}}}$$
(23)

$$\bar{d} = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^{J} d_i \ge d_{Ave}$$
(24)

i **= 1,2,3,…** *J است و J تع*داد کل ذرات تولید شده در کسر حجمی معین است.

#### 3-4- مراحل محاسبه هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال

مراحل محاسبه ضريب رسانايي نانوسيال بهصورت زير است،

- با معلوم بودن درصد حجمی و قطر متوسط نانوذرات، بعد فرکتال ذرات از معادله 22 محاسبه شود.
  - 22. توليد نانوذرات با قطر d<sub>i</sub> با استفاده از رابطه 23.
- . اگر  $d_{\max} < d_i$  <br/>  $d_{\max}$  و در غیر این مورت به گام  $d_{\min} < d_i < d_{\max}$  1 رام . 9 رام . 9 مرگردید.

$$k_{\rm st} = -\frac{\int_{V} q_z \, dV}{\int_{V} \nabla T_z \, dV} = \frac{\sum_{i=p,lr,t} \left(k_i \frac{dT_i}{dz} V_i\right)}{\sum_{i=p,lr,t} \left(\frac{dT_i}{dz} V_i\right)} \tag{13}$$

معادله فوق با فرض توزیع یکنواخت آندازه نانوذرات بهدست آمده است. برای نانوسیال حاوی*N* نانوذره با توزیع غیریکنواخت قطر نانوذرات، سهم استاتیکی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بهصورت رابطه 14 نوشته میشود:

$$k_{st} = \frac{k_{lr} \sum_{i=1}^{N_t} \frac{V_{p,i}}{\gamma_{1,i}^3} [(k_p + 2k_{lr})\gamma_{1,i}^3 \gamma_i^3 + (k_p - k_{lr})(2\gamma_{1,i}^3 - \gamma_i^3 + 1)] + V_f k_f (k_p + 2k_{lr})}{\sum_{i=1}^{N_t} \frac{V_{p,i}}{\gamma_{1,i}^3} [(k_p + 2k_{lr})\gamma_{1,i}^3 \gamma_i^3 - (k_p - k_{lr})(\gamma_{1,i}^3 + \gamma_i^3 - 1)] + V_f (k_p + 2k_{lr})}$$
(14)

که در این رابطه  $\frac{t}{r_p}$  + **1** =  $\gamma_1$  = **1** +  $\frac{t}{2r_p}$ ,  $\gamma$  = **1** +  $\frac{t}{r_p}$  است. در نوشتن رابطه بالا از روابط 15 نیز استفاده شده است،

$$v_{\rm lr,i} = v_{\rm p,i} (\gamma^3 - 1)$$
 (الف)

$$v_{\rm f} = \left(\mathbf{1} - \gamma^3 \phi_{\rm p}\right) \frac{V_{\rm p}}{\phi_{\rm p}} \tag{(z-15)}$$

.در معادله (15-ج)،  $V_{\rm p} = \sum_{i=1}^{N_{\rm t}} v_{{\rm p},i}$  است

#### 3-2- سهم ديناميكي هدايت حرارتي نانوسيال

سهم دینامیکی هدایت حرارتی نانوسیال ناشی از حرکت برآونی ذرات است. شار حرارتی محوری خالص ناشی از حرکت برآونی ذرات با اندازه یکسان از رابطه 16 محاسبه میشود[14]:

$$q''_{\rm net} \approx -\frac{1}{2} \rho_{\rm cp} c_{\rm p-cp} d_{\rm s} U_{\rm B} \nabla T$$
<sup>(16)</sup>

در رابطه فوق  $c_{p-cp} = c_{p-cp} = d_s$  بهترتیب چگالی و گرمای ویژه نانوذره مرکب، اندازه حرکت برآونی ذرات و فاصله بین دو ذره با اندازه یکسان است و  $d_s$  عرکت برآونی ذرات و فاصله بین دو ذره با اندازه یکسان است و  $d_s = 0.893 r_{cp} \phi_{cp}^{-1/3}$  مختلف هستند، با استفاده از روش میانگین وزنی، شار حرارتی محوری کل ناشی از حرکت برآونی همه نانوذرات از بهصورت رابطه **17** محاسبه میشود:

$$q_{\text{net, total}}^{*} \approx \sum_{l=1}^{m} \left( -\frac{1}{2} \rho_{\text{cp}} c_{\text{p-cp}} d_{\text{s}} U_{\text{B}} \nabla T \right) \frac{n_{\text{p,l}}}{N_{\text{t}}}$$
(17)

که در این رابطه m تعداد دسته های ذرات با اندازهی یکسان و  $n_{pl}$  تعداد نانوذرات موجود در دسته  $l^{th}$  است. رابطه حرکت برآونی اصلاح شده به -صورت رابطه 18 است[14]:

$$U_{\rm B} = \sqrt{\frac{2K_{\rm B}T(1 - 1.5\phi_{\rm cp})}{M}}$$
(18)

با توجه به این که  $TT = -k_{dy}$  و با جای گذاری معادله 18 در معادله 17، سهم دینامیکی ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال به صورت رابطه 19 دست میآید:

$$k_{dy} =$$

$$\sum_{l=1}^{m} \left( -\frac{1}{2} \rho_{\rm cp} c_{\rm p-cp} d_{\rm s} \sqrt{\frac{2K_{\rm B}T(1-1.5\phi_{\rm cp})}{M}} \right) \frac{n_{\rm p,l}}{N_{\rm t}}$$
(19)

معادله 19را میتوان به فرم ساده شده زیر نوشت:

- بررسی معیار همگرایی از معادله 24.
- تعیین ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال با محاسبه سهم استاتیکی و دینامیکی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از معادلات 14 و 20.

در هر بار اجرای برنامه، پس از برقراری شرط همگرایی، مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر و تعداد نانوذرات تولید شده ثبت میشود. بهمنظور افزایش دقت نتایج مدل و کاهش اثر تصادفی بودن قطر نانوذرات تولیدی، این مراحل چندین بار تکرار میشود. سپس متوسط ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال برای قطر متوسط و درصد حجمی معین از نانوذرات از رابطه 25 به-دست میآید:

$$\overline{k_{\text{eff}}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} k_{\text{eff}}^{(n)}$$

در رابطه فوق N = **1,2,3,...**, N تعداد اجراهای برنامه است

#### 4- نتايج

(25)

دقت مدل ارائه شده با انتخاب شش نوع نانوسیال مختلف ارزیابی شده است. این نانوسیالها شامل آب- اکسید آلومینیم، اتیلن گلیکول- اکسید آلومینیم، آب- اکسید مس، اتیلن گلیکول- اکسید مس، اتیلن گلیکول- آلومینیم و آب- دی اکسید تیتانیم با قطرها و در کسر حجمیهای متفاوت میباشند. به-منظور افزایش دقت نتایج مدل و کاهش اثر تصادفی بودن قطر نانوذرات تولیدی، فرآیند تولید نانوذرات چندین بار اجرا میشود. شکل 2 تعداد نانوذرات تولید شده برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیم را در 150 بار اجرای برنامه نشان میدهد. در هر بار اجرای برنامه ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال محاسبه شده و مقدار میانگین ضریب هدایت مؤثر بهدست آمده از تمام اجراها بهعنوان ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال در نظر گرفته میشود.

ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با قطر متوسط نانوذرات 15 نانومتر و 1 درصد حجمی در دمای 25 درجه سلسیوس در 150 بار اجرای برنامه در شکل 3 نشان داده شده است. مشاهده می شود که هدایت حرارتی مدل سازی شده، شدیداً حول مقدار آزمایشگاهی 1/032 نوسان می کند. این مطلب به دلیل تصادفی بودن اندازه نانوذرات کاملاً مورد انتظار است. پس از برقراری شرط همگرایی، مقدار متوسط ضریب رسانایی مؤثر درمدل سازی حاضر، 1/0332 به دست می آید.



شکل2 تعداد نانوذرات تولید شده برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیم (15 نانومتر) با درصد حجمی 1 در 150 بار اجرای برنامه



15 ضريب هدايت حرارتى مؤثر نانوسيال آب-اكسيد آلومينيم با قطر متوسط 15 نانومتر و 1 درصد حجمى در 150 اجراى برنامه

در ادامه، نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی در دسترس و نتایج سایر مدلها مقایسه شده است. بهاین منظور چهار مدل ماکسول، مدل لئونگ، مدل مورشد و مدل فنگ انتخاب شده است. شکل 4 مقایسه نتایج مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی [3] و نتایج سایر مدلها را برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با قطر متوسط 33 نانومتر در درصدهای حجمی مختلف و در دمای 25 درجه سلسیوس نشان میدهد. مشاهده میشود که نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد در حالیکه مدل ماکسول در مقایسه با مدل ارائه شده نتایج بسیار ضعیفی ارائه میکند. با اینکه مدل مورشد، مدل نسبتاً کاملی به نظر میرسد اما نتایج مدل حاضر در مقایسه با نتایج مدل مورشد از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج نشان میدهد که بیشترین خطای مدل ارائه شده تقریباً 1/5 درصد است، در حالیکه بیشترین خطای مدل مورشد با فرض مدل مورشد ازدازه ذرات گسترش یافته است. شکل 4 نشان میدهد که توزیع یکنواخت اندازه ذرات گسترش یافته است. شکل 4 نشان میدهد که مدل ارائه شده با اطلاعات آزمایشگاهی کمک میکند.

نتایج مدل حاضر برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با قطر 13 نانومتر برای درصدهای حجمی مختلف در شکل 5 آورده شده است. نتایج مدل ارائه شده در مقایسه با نتایج مدل فنگ [20] و مدل مورشد [14] تطابق خیلی بهتری با نتایج آزمایشگاهی ماسودا [2] دارد. نتایج دقیق تر این مدل نسبت به مدل فنگ، از تاثیرات لایه بین سطحی بر هدایت حرارتی نانوسیال ناشی



شکل4 مقایسه مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر با دادههای آزمایشگاهی ایستمن [3] و نتایج سایر مدلها برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با قطر متوسط 33 نانومتر





می شود. هرچند مدل فنگ براساس توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات است اما بدون در نظر گرفتن وجود نانولایه در سطح مشترک سیال-ذره گسترش یافته است.

نتایج مشابهی برای نانوسیال آب- اکسید مس با قطر متوسط 36 نانومتر و نانوسیال اتیلن گلیکول- اکسید مس با قطر متوسط 35 نانومتر در درصد-های حجمی مختلف، در شکل 6 و 7 آورده شده است. نتایج بهدست آمده افزایش ضریب رسانایی مؤثر نانوسیال با افزایش درصد حجمی نانوذرات را نشان میدهد. در شکل 6 تطابق بهتر نتایج مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی ایستمن [3] نسبت به مدل مورشد [14] مشاهده میشود. به عنوان مثال برای نانوسیال آب- اکسید مس با قطر متوسط 36 نانومتر در کسر حجمی 5 درصد، خطای ضریب هدایت حرارتی مؤثر در مدل حاضر و مدل مورشد بهترتیب 27/5 و 14/5 درصد است. شکل 7 نیز نشان میدهد که نتایج مدل حاضر در مقایسه با دیگر مدلها نظیر مدل لئونگ [13].

شكل 8 ضريب هدايت حرارتى مؤثر نانوسيال اتيلن گليكول - آلومينيوم با قطر متوسط 80 نانومتر در غلظتهاى مختلف را نشان مىدهد. مشاهده مى -شود نتايج بهدست آمده از مدل حاضر تطابق خوبى با نتايج آزمايشگاهى [3] دارد بهطورىكه حداكثر خطاى مدل ارائه شده 2/5 درصد مىباشد. مطابق شكل 8 ضريب رسانايى مؤثر نانوسيال تابع كسر حجمى نانوذرات است و با افزايش غلظت نانوذرات درون سيال پايه، ضريب هدايت حرارتى مؤثر نانوسيال افزايش مىيابد.



شکل 6 مقایسه مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر با دادههای آزمایشگاهی ایستمن [3] و نتایج سایر مدل ها برای نانوسیال آب- اکسید مس با قطر متوسط 36 نانومتر



شکل 7 مقایسه مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر با دادههای آزمایشگاهی لی [4] و نتایج سایر مدلها برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید مس با قطر متوسط 35 نانومتر



شكل 8 مقايسه مقادير ضريب هدايت حرارتى مؤثر با دادههاى آزمايشگاهى ايستمن [3] و نتايج ساير مدلها براى نانوسيال اتيلن گليكول - آلومينيوم با قطر متوسط 80 نانومتر

تاثیر اندازه قطر نانوذرات و کسر حجمی نانوذرات بر هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال اتیلن گلیکول اکسید آلومینیم در شکل 9 نشان داده شده است. این شکل برای دو قطر متوسط 28 و 38 نانومتر در غلظتهای مختلف نانوذرات رسم شده است. مشاهده میشود که افزایش قطر نانوذرات موجب کاهش هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال میشود. شکل 10 نیز تاثیر قطر متوسط نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال آب اکسید مس با درصد حجمی 4 و 5 را نشان میدهد. مشاهده میشود که با کاهش قطر متوسط نانوذرات در حدود قطر 15 نانومتر، افزایش شدیدی در ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال ایجاد میشود. علت این است که کاهش قطر نانوذرات، سبب افزایش سهم استایکی ضریب رسانایی به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم میشود.

درصد افزایش ضریب هدایت موثر نانوسیالهای مختلف نسبت به سیال پایه در جدول 1 ارائه شده است. مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مختلف [21] نشان گر دقت بالای مدل ارائه شده در این مطالعه است. مشاهده میشود که حداکثر خطای مدل در تعیین ضریب رسانایی موثر برای نانوسیالهای مختلف 5 درصد است که برای نانوسیال اتیلن گلیکول - اکسید مس با قطر 12 نانومتر در کسر حجمی 1% رخ میدهد.



**شکل 9** مقایسه مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر با دادههای آزمایشگاهی [3، 4] و نتایج سایر مدلها برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیم با قطرهای 28 و 38 نانهمت



شکل 10 تغییرات ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال با اندازه قطر نانوذره برای نانوسیال آب- اکسید مس

جدول 1 مقایسه درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال در مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی [21]

	-	5		
نانوسيال	درصد حجمی	درصد افزایش هدایت حرارتی مؤثر در مدل ارائه شده	درصد افزایش هدایت حرارتی موثر گزارش شده	درصد خطا
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (28nm)/W	3	12/50	12	2/02
Al <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> (33nm)/W	5	28/20	29	2/74
Al <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> (80nm)/W	5	24/25	24	1/00
Al <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub> (29nm) /EG	4	17/88	18	0/65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (38nm) /EG	5	18/60	18	3/00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (60.4nm) /EG	5	29/16	30	2/71
CuO(12nm)/EG	1	5/70	6	5/00
CuO(29nm)/EG	5	22/35	23	2/82
CuO(35nm)/EG	4	22/51	22	2/33

شکل 11 وابستگی ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال به دما را برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با قطر 38 نانومتر در دو کسر حجمی 1 و 4 درصد نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که با افزایش دمای نانوسیال و درصد حجمی نانوذرات، ضریب رسانایی موثر نانوسیال افزایش مییابد. نتایج

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دورہ 15، شمارہ 1

آزمایشگاهی نشان میدهد که در کسر حجمی 4 درصد با تغییر دما از 21 تا 51 درجه سلسیوس، درصد افزایش ضریب رسانایی نانوسیال نسبت به سیال پایه از 9/4 درصد به 24/3 درصد میرسد[22]. نتایج مدلسازی حاضر در این بازه دمایی و در کسر حجمی 4 درصد، افزایش 8 تا 30 درصدی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه را گزارش میدهد.

مقایسه نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی [23] برای ضریب رسانایی موثر نانوسیال آب- دی اکسید تیتانیم با قطر 21 نانومتر در کسر حجمی 1 و 2 درصد در شکل 12 ارائه شده است. مشاهده می شود که مدل ارائه شده با دقت قابل قبولی مقادیر ضریب رسانایی نانوسیال را تعیین می کند. شکل 12 نشان می دهد که ضریب رسانایی موثر نانوسیال با افزایش دما افزایش می یابد و میزان این افزایش به کسر حجمی نانوذرات بستگی دارد.

## 5- نتيجه گيرى

در مطالعه حاضر مدل جدیدی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال با درنظر گرفتن تاثیر همزمان نانولایه و توزیع غیریکنواخت اندازه نانوذرات گسترش یافت. مدل ارائه شده تابعی از اندازه غیریکنواخت نانوذرات، ضریب هدایت حراتی نانوذره، سیال پایه و نانولایه، ضخامت نانولایه و دما است. نتایج مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی موجود برای نانوسیالهای آب- اکسید آلومینیم، اتیلن گلیکول- اکسید آلومینیم، آب- اکسید مس، اتیلن گلیکول- اکسید مس، اتیلن گلیکول- آلومینیم، و آب- دیاکسید مدیایت مقایسه شد. تاثیرات دما، قطر و کسر حجمی نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال بررسی شد. نتایج بهدست آمده از این مدل، تطابق قابل قبولی با اطلاعات آزمایشگاهی دارد و در مقایسه با سایر مدلها از



شکل 11 تغییرات ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال با دما برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیم با قطر متوسط 38 نانومتر



آب- دی اکسید تیتانیم با قطر 21 نانومتر

- [3] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, L.J. Thompson, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II, Materials Research Society, Vol. 457, pp. 3-11, 1997.
- S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of [4] fluids containing oxide nanoparticles, Journal of Heat Transfer, Vol. 121.pp. 280-289,1999.
- [5] M. Kole, T.K. Dey, Role of interfacial layer and clustering on the effective thermal conductivity of CuO-gear oil nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 35, pp. 1490-1495, 2011.
- C. Pang, J. Jung, J. Lee, Y. T. Kang, Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al2O3 and SiO2 nanoparticles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 5597-5602, 2012
- J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Third Edittion, [7] Oxford, UK, 1891
- P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Mechanisms of heat [8] flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 45, No. 4, pp. 855–863, 2002.
- [9] G. A. Longon, C. Zilio, E. Ceseracciu, M. Reggiani, Diffusion in disordered media, *Nanc Energy*, Vol. 1, pp. 290–296, 2012. [10]M. Tajik Jamal-Abadi, A. H. Zamzamian, Optimization of thermal
- conductivity of Al2O3 Nanofluid by using ANN and GRC methods, International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 9, No. 4, pp. 177-184, 2013.
- [11] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, Journal of Nanoparticle Research, Vol. 5, pp. 167–171, 2003.
- [12] H.Xie, M. Fujii, X. Zhang, Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 2926-2932, 2005.
- [13] K. C. Leong, C. Yang, S.M.S. Murshed, A model for the thermal conductivity of nanofluids - the effect of interfacial layer, Journal of Nanoparticle Research, Vol.8, pp. 245–254, 2006. [14] S. M. S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, A combined model for the effective
- thermal conductivity of nanofluids, Journal of Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2477-2483, 2009.
- [15] H. Jiang, H. Li, Q. Xu, L. Shi, Effective thermal conductivity of nanofluids Considering interfacial nano-shells, Journal of Materials Chemistry and Physics, pp. 1-6, 2014.
- [16] Z. Shams, S. H. Mansouri, M. Baghbani, A proposed model for calculating effective thermal conductivity of nanofluids, effect of nanolayer and nonuniform size of nanoparticles, Journal of Basic and Applied Scientific Research, pp. 9370-9377, 2012.
- [17] S. Havlin, D. Ben-Avraham, Diffusion in disordered media, Advanced Physics, Vol. 36, No. 6, pp. 695–798, 1987. [18] B. X.Wang L. P. Zhou, X. F. Peng, A fractal model for predicting the
- effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 2665-2672, 2003.
- [19] J. Xu, B.M.Yu, M. Q. Zou, P. Xu, A new model for heat conduction of nanofluids based on fractal distributions of nanoparticles, Journal of Physics D Appl Phys, Vol. 39, pp. 4486-4490, 2006.
- [20] Y. Feng, B. Yu, K. Feng, P. Xu, M. Zho, Thermal conductivity of nanofluids and size distribution of nanoparticales by Monte Carlo simulation, Journal of Nanoparticle Research, Vol. 10, pp. 1319-1328, 2008.
- [21] S. M. S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids-A critical review, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 2109-2125. 2008.
- [22] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermalconductivity enhancement for nanofluids, Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567-574,2003.
- [23] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Measurement of temperaturedependent thermal conductivity and viscosity of TiO2-water nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33, pp. 706-714, 2009.

دقت بیشتری برخوردار است به طوری که حداکثر خطای مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی 5 درصد است. مقایسه نتایج مدل ارائه شده در مطالعه حاضر با نتایج سایر مدلها تاثیر قابل توجه لایه بینسطحی بر هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال را نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که عدم در نظر گرفتن اثر نانولايه، موجب كاهش دقت نتايج ساير مدلها مى شود. هم چنين توزيع غيريكنواخت اندازه نانوذرات يك فرض واقعى است كه به بهبود نتايج كمك شایانی کرده است و در مقایسه با مدلهایی که با فرض توزیع یکنواخت گسترش یافتهاند، مدل حاضر از دقت بالاتری برخوردار است.

#### 6- فهرست علائم

- d قطر (nm)
- $(Wm^{-1}K^{-1})$  ضريب انتقال حرارت هدايتی k
  - M وزن مولكولى
  - Nt تعداد نانوذرات
    - T دما (K)
  - (nm) ضخامت لایه بین سطحی (
    - V حجم

#### علايم يونانى

ρ چگالی (kgm<sup>-3</sup>)

(kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) لزجت دینامیکی (
$$\mu$$

#### زيرنويسها

- Ave مقدار متوسط
- **ср** نانوذره مرکب
  - eff مۇثر
  - f سيال يايه
- Ir لايه بين سطحي
  - nf نانو سيال
    - نانوذره

#### -7 مراجع

- [1] S. U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, Vol. 231, No. 66, pp. 99-105, 1995.
- [2] T. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles), Netsu Bussei, Vol. 4, pp. 227-233, 1993.