

## بررسی عددی افزایش انتقال گرما نانوسیال در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با قراردادن نوار پیچشی چندکاناله در داخل لوله

سید علی فرشاد

محسن شیخ الاسلامی\*

دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### چکیده

انتقال گرما و ساختار جریان نانوسیال در داخل لوله به همراه نوار پیچشی چند کاناله بر روی یک گردآورنده خورشیدی صفحه تخت در این مطالعه عددی مورد تحلیل قرار گرفت. نانوسیال آب-آلومینوم اکسید با کسر حجمی ۳٪ به عنوان سیال کاری استفاده شد. نانوسیال در بازه عدد رینولدز ۴۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰ بررسی گردید. تاثیرات تعداد کانال (۲، ۳، ۴، ۵ و ۶) و ابعاد کانال نظیر نسبت قطر (۰/۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۴) و پیچش (۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷) مختلف بر روی انتقال گرما و افت فشار به طور جداگانه ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد که قرار گرفتن نوار پیچشی چند کاناله باعث ایجاد جریان ثانویه در نانوسیال می‌شود. به دنبال آن اختلاط سیال بهبود و در نتیجه انتقال گرما افزایش می‌یابد. افزایش تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش باعث افزایش ضریب انتقال گرما و افت فشار می‌شود. بیشترین ضریب عملکرد حرارتی زمانی که عدد رینولدز کمترین مقدار را داراست، برای حالتی است که نوار پیچشی دارای ۲ کانال عبور سیال (n=2)، نسبت قطر ۰/۱۴ و نسبت پیچش ۷ باشد.

واژه‌های کلیدی: افزایش انتقال گرما، نوار پیچشی چند کاناله، نانوسیال، گردآورنده خورشیدی صفحه تخت.

## Numerical investigation for heat transfer enhancement of nanofluid in the solar flat plate collector with insertion of multi-channel twisted tape

S. A. Farshad

M. Sheikholeslami

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### Abstract

Numerical analysis of heat transfers and nanofluid flow structure inside a tube with multi-channel twisted tapes in a solar flat plate collector has been investigated. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid with a volume fraction of 3% was used as working fluid. Nanofluid with Reynolds number (Re) ranged from 4000 to 20000 was investigated. Effect of the number of channel (n=2, 3, 4, 5 and 6), twisting ratio (N=4, 5, 6 and 7) and diameter ratio (D\*=0.1, 0.12 and 0.14) on heat transfer rate and friction loss have been presented separately. The results demonstrated that the insertion of multi-channel twisted tapes induce multi-swirling flows. Consequently, fluid mixing improves and heat transfer rate enhances. Augmenting number of channel, twisting ratio and diameter ratio leads to higher values of heat transfer and pressure loss. The maximum thermal performance factor is obtained by using twisted tapes with n=2, D\*=0.14 and N=7 when Reynolds number has lowest value.

**Keywords:** Heat transfer enhancement, Multi-channel twisted tape, Nanofluid, Solar flat plate collector.

رسانایی گرمایی افزایش می‌یابد در نتیجه به عملکرد گردآورنده خورشیدی بهبود می‌بخشد. نانوسیال به واسطه پراکنده شدن ذرات جامد فلزی یا غیرفلزی نانو به سیال پایه که ممکن است آب، اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول باشد، تهیه می‌شود. نانوسیال توسط چوبی و استمن [۲] با بکارگیری نانولوله کربنی و یک سیال پایه معرفی گردید و میزان بالای رسانایی گرمایی در نانوسیال مشاهده شد. بعدها ماسودا و همکاران [۳] در یک آزمایشی افزایش رسانایی گرمایی را در نانوسیال نسبت به سیال پایه تایید کردند.

امیرحسین زمزمیان و همکاران [۴] مطالعه آزمایشگاهی بر روی در گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت با سیال به همراه نانوذره صورت دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش غلظت، میزان بازده گردآورنده افزایش می‌یابد. یک تحقیق به صورت عددی توسط امیر صدقی نسب و همکاران [۵] برای ارزیابی نانوسیال بر میزان انتقال گرما جابه‌جایی در جریان آشفته و آرام به انجام رسید. لوله‌های بررسی شده به صورت مستقیم و U شکل بودند. نتایج به این صورت بود که میزان انتقال گرما با بیشتر شدن غلظت نانوذره افزایش داشته و همچنین افت فشار نیز

### ۱- مقدمه

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی موجود در جهان است که به میزان زیادی در سطح زمین موجود می‌باشد. سیستم‌های حرارتی خورشید، انرژی خورشید را به طور مستقیم دریافت و به گرما تبدیل می‌کند. در این سیستم‌ها برای انتقال گرما، از یک سیال کاری مانند آب یا هوا استفاده می‌شود که در سیستم‌های سرمایش یا گرمایش مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. یک سیستم ساده خورشیدی شامل یک گردآورنده، یک سیال کاری جهت سیرکوله کردن و یک سیستم ذخیره‌سازی شامل مبادله‌کن گرما می‌باشد [۱]. گردآورنده خورشیدی صفحه تخت یکی از محبوب‌ترین گردآورنده‌ها می‌باشد که در کاربردهای مسکونی و تجاری از آن استفاده می‌شود. این دسته از گردآورنده‌ها طراحی ساده دارند و در دماهای متوسط رو به پایین کار می‌کنند. با این حال این گردآورنده‌ها نسبتاً دمای خروجی و عملکرد پایینی دارند. یکی از روش‌های افزایش عملکرد در گردآورنده‌های خورشیدی تغییر در سیال کاری است. با افزودن نانوذرات به سیال

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.sheikholeslami1367@gmail.com

روند افزایشی را طی می‌کند. بخش خمیده نیز میزان انتقال گرما بیشتری را نسبت به نواحی دیگر دارد. احسان ابراهیم نیا و حمید نیازمند [۶] به صورت عددی تاثیرات نانوسیال بر انتقال گرما در مبادله‌کن‌های لوله خمیده را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که خم لوله و نانوسیال منجر به افزایش میزان انتقال گرما می‌شود. در یک کانال مربع شکل به همراه صفحه نگه دارنده و لوله صلب یک مطالعه توسط اکرم جهانبخشی و افشین احمدی [۷] صورت گرفت. نتایج به این صورت است که ضریب انتقال گرما با بیشتر شدن کسر حجمی نانوذرات بیشتر شده است. سید محمد حسینی و همکاران [۸] به صورت عددی بر روی نانوسیال در جابه‌جایی آزاد مطالعه‌ای را انجام دادند. یک محیط مثلثی شکل به همراه تیغه در نظر گرفته شد. با افزایش طول تیغه و غلظت نانوذرات، انتقال گرما روند افزایشی را دارد.

سینت و همکاران [۹] یک گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با نانوسیال آب-اکسید مس را با روابط مورد تحلیل قرار دادند. یک مدل ریاضی و کدنویسی نرم افزار متلب<sup>۱</sup> جهت محاسبه ضریب عملکرد گردآورنده برای شرایط آب و هوایی کشور میانمار نوشته شد. نتایج نشان داد که برای افزایش ضریب عملکرد گردآورنده کسر حجمی ذرات نانو تا ۲٪ مفید است. با افزودن ذرات نانو اکسید مس کارایی گردآورنده تا ۵٪ افزایش یافت. کلیچ و همکاران [۱۰] مطالعه تجربی بر روی گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با نانوسیال آب-تیتانیوم اکسید انجام دادند. ذرات نانو با کسر حجمی ۲٪ با آب مخلوط شد. براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده ضریب عملکرد برای حالت آب خالص ۳۶٪ و برای نانوسیال ۴۸٪ بود. بنابراین استفاده از نانوسیال تاثیر چشم‌گیری در افزایش عملکرد گردآورنده خورشیدی صفحه تخت دارد. گس و همکاران [۱۱] مطالعه عددی بر روی صفحات خورشیدی با نانوسیال در دبی و کسر حجمی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. برای افزایش برداشت انرژی در گردآورنده‌های خورشیدی از نانوسیال به عنوان سیال کاری استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر افزایش دمای خروجی به ترتیب با ۲۰/۷٪ در دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه و کسر حجمی ۳٪ به دست می‌آید. هوواش و همکاران [۱۲] مطالعه عددی و آزمایشگاهی در زمینه عملکرد گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با دو سیال کاری، نانوسیال و آب مقطر صورت گرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش کسر حجمی نانوسیال تا ۵/۵ درصد باعث افزایش عملکرد حرارتی می‌شود و از طرفی افت فشار را بیشتر می‌کند.

قرار دادن مغشوش‌کننده به داخل لوله، از روش‌های غیر فعال برای افزایش انتقال گرما می‌باشد. روش‌های فعال نیازمند نیروی خارجی مانند میدان ارتعاشی و الکترومغناطیسی هستند. روش‌های غیر فعال افت فشار بیشتری را حاصل می‌کنند. بنابراین باید به میزان اصطکاک توجه بیشتری داشت. در واقع بین افزایش انتقال گرما و افزایش افت فشار سازش خوبی برقرار باشد. روش غیر فعال مانند افزودن نوارپیچی به داخل لوله جهت استفاده عملی مناسب می‌باشد و نسبت به روش‌های فعال هزینه کمتری دارد [۱۳ و ۱۴].

فرنام و همکاران [۱۵] مطالعه آزمایشگاهی بر روی لوله و نوار

مارپیچی انجام دادند. با پیچشی کردن نوار و لوله میزان عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش یافت. بیشترین مقدار ضریب عملکرد در حالتی به وجود آمد که عدد رینولدز در پایین‌ترین مقدار است. عابد و همکاران [۱۶] مطالعه عددی بر روی یک لوله تحت شار حرارتی ثابت به همراه نوارپیچی معمولی و برشی وی‌شکل انجام دادند. نوارپیچی برشی انتقال گرما بیشتری نسبت به حالت معمولی دارد و به طور کلی افزودن نوارپیچی به لوله، انتقال گرما را افزایش می‌دهد و عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد. آزمایشی بر روی یک آبگرمکن خورشیدی توسط کومارا و پراساد [۱۷] صورت گرفت. در درون لوله آبگرمکن، یک عدد نوارمارپیچی به عنوان آشفته‌کننده جریان اضافه گردید. نتایج به این صورت گزارش گردید که قرار دادن نوار مارپیچی، باعث بیشتر شدن افت فشار و میزان انتقال گرما می‌شود. انتقال گرما یک آبگرمکن خورشیدی با نوارپیچی زانویی دار و بدون زانویی در داخل لوله توسط جیسانکار و همکاران [۱۸] آزمایش شد. نتایج نشان می‌دهد که نوارپیچی منجر به افزایش کارایی آبگرمکن خورشیدی می‌شود. ساروانان و همکاران [۱۹] مطالعه آزمایشگاهی بر روی آبگرمکن خورشیدی انجام دادند. لوله این آبگرمکن مجهز به نوارپیچی از نوع عادی، برش خورده مربعی شکل و وی شکل بود. با توجه به نتایج نوار وی شکل بهترین انتقال گرما را دارد. ساندر و همکاران [۲۰] به صورت آزمایشگاهی عملکرد حرارتی یک آبگرمکن خورشیدی را با روش غیرفعال افزایش دادند. بیشترین تاثیرات بر عملکرد را افزایش رسانایی گرمایی سیال و آشفته کردن جریان سیال دارد. آن‌ها از نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید به عنوان سیال کاری و نوارپیچی به عنوان توربولاتور برای افزایش انتقال گرما و به تبع آن افزایش ضریب عملکرد استفاده کردند. نتایج به این صورت بود که با وجود افزایش افت فشار در حالتی که از نانوسیال و نوارپیچی استفاده شود، عملکرد آبگرمکن خورشیدی افزایش می‌یابد.

در مقالات مختلف نوارپیچی ساده به همراه نانوذرات بررسی شده است. در این مقاله نوارپیچی چند کاناله به جای نوار پیچی معمولی به صورت کامل بدون ساده‌سازی با شرط تناوبی<sup>۲</sup> و همچنین صفحات جاذب نیز به منظور بررسی دقیق‌تر گردآورنده خورشیدی نسبت به حالت واقعی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی به صورت ۳بعدی است تا حل جریان آشفته بیشتر به واقعیت نزدیک باشد. حل عددی گردآورنده خورشیدی مجهز به نوار پیچی با نسبت ابعادی مختلف و عدد رینولدز در بازه ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ می‌گیرد. از نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۳٪ جهت افزایش عملکرد حرارتی استفاده می‌شود. گردآورنده خورشیدی به صورت عددی در این مقاله حل می‌شود. عدد رینولدز در بازه ۴۰۰۰-۲۰۰۰۰ قرار دارد. ذرات آلومینیوم اکسید به سیال آب با کسر حجمی ۳ درصد اعمال می‌گردد. تاثیرات نوارهای پیچی چند کاناله با نسبت‌های هندسی مختلف هدف این مطالعه می‌باشد.

<sup>2</sup> Periodic

<sup>1</sup> Matlab

جاذب، شار حرارتی ثابت داده می‌شود [۲۱]. جهت شبکه‌بندی از نرم افزار مشینینگ انسیس<sup>۱</sup> و همچنین تابع دیواره بهبود یافته<sup>۲</sup> برای حل در نظر گرفته شده است. بازه  $\gamma+$  در مسئله حاضر در عدد رینولدز بین ۴۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰ حدود ۱ برای تمامی حالات هندسی در نظر گرفته شده است. برای شبکه‌بندی صفحات جاذب و نوار پیچشی از شبکه سازمان یافته و برای لوله به دلیل هندسه استوانه‌ای شکل از شبکه بی‌سازمان استفاده گردید. همچنین با افزودن نوار پیچشی در لوله استفاده از شبکه بی‌سازمان عملکرد و کیفیت شبکه بیشتری به همراه دارد. شبکه‌بندی مسئله در شکل ۲ رسم شده است.



### ۳- معادلات حاکم

#### ۱-۳- معادلات حاکم بر سیال

با در نظر کردن از جابه‌جایی آزاد و نیروهای خارجی و همچنین تراکم‌ناپذیر بودن سیال، معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی به صورت معادلات (۳) الی (۵) در می‌آیند [۲۲].

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} \bar{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u} \rho_{\text{eff}} c_{p,\text{eff}} T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T + \tau \cdot \bar{u}) \quad (5)$$

تانسور تنش برشی به صورت رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$\tau = \mu_{\text{eff}} (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} \bar{u}) \quad (6)$$

<sup>1</sup> Ansys Meshing

<sup>2</sup> Enhanced wall treatment

### ۲- فیزیک مسئله و شرایط حل

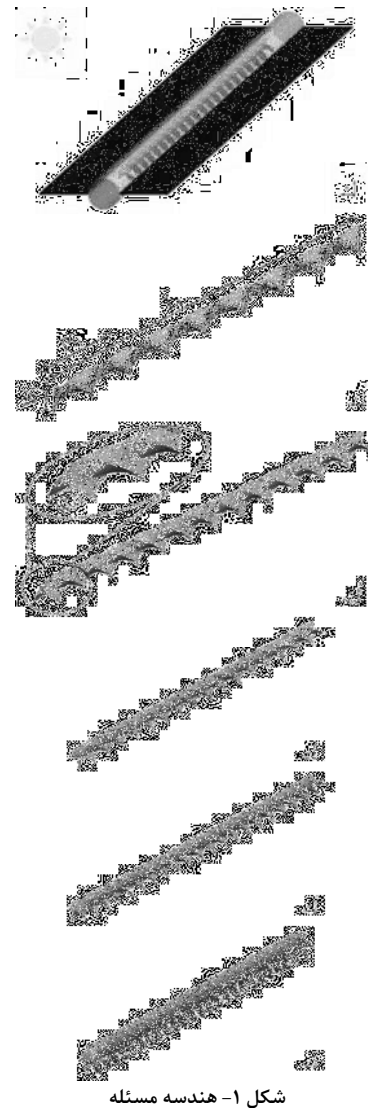
#### ۱-۲- هندسه مسئله

طول نوار پیچشی چند کاناله ۱/۵ متر و ۰/۵ میلی‌متر ضخامت آن می‌باشد. نسبت دورهای ۴ تا ۷ و نسبت قطر ۰/۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۴ متغیرهای هندسی هستند. طول قطر لوله‌ی آبگرمکن ۲ متر و قطر لوله آن ۱ اینچ است. پارامترهای هندسی به این صورت تعریف می‌شوند:

$$N = \frac{L_t}{P_{i_t}} \quad (1)$$

$$D^* = \frac{W_t}{L_t} \times 10 \quad (2)$$

شکل مسئله به همراه نوار پیچشی‌های متفاوت در شکل ۱ رسم گردیده است.



#### ۲-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

شرط عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها اعمال می‌گردد. قسمت ورودی لوله شرط مرزی سرعت ورودی داده می‌شود. برای بخش خروجی شرط فشار خروجی و قسمت بالایی لوله و همچنین صفحات

### ۲-۳- معادله جریان آشفته

مدل‌های توربولانسی مختلفی برای حل جریان آشفته وجود دارد. هر کدام از آن‌ها برای شرایط خاصی قابل اعمال است. مدل آشفته  $k-\epsilon$  برای بیشتر مسائل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و دقت لازم را دارد [۲۳-۲۵]. برای حل آبرگمن خورشیدی حاضر جریان آشفته با مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر<sup>۱</sup> شبیه‌سازی می‌شود که مدلی بهبود یافته نسبت به مدل استاندارد می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی، انرژی جنبشی آشفته‌گی به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود [۲۶]:

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} \bar{u} K) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla K \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (7)$$

آهنگ اضمحلال در رابطه (۸) آورده شده است:

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} \bar{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho_{\text{eff}} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

$G_k$  آهنگ تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌باشد و به صورت رابطه (۹) حاصل می‌شود:

$$G_k = \tau \nabla \bar{u}^T \quad (9)$$

از الگوریتم حل سیمپل<sup>۲</sup> برای کوپل شدن سرعت و فشار و با روش حجم محدود برای حل مسئله استفاده می‌شود. برای معادلات حرکت و انرژی از دقت مرتبه اول و میزان همگرایی برای معادلات  $10^{-5}$  و برای معادله انرژی  $10^{-9}$  می‌باشد.

### ۳-۳- مدل‌سازی نانوسیال به صورت تک فاز

در مطالعه حاضر با توجه به کم بودن تغییرات دمایی، خواص به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. خواص ترموفیزیکی سیال تغییر می‌کند که با استفاده از روابط موجود مدل‌سازی می‌شود [۲۷].

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{k_p + (SH-1)k_f - (SH-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (SH-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (11)$$

$$\rho_{nf} = \rho_f (1 - \phi) + \rho_p \phi \quad (12)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (\rho C_p)_f (1 - \phi) + (\rho C_p)_p \phi \quad (13)$$

$$SH = \frac{3}{\psi} \quad (14)$$

خاصیت ذرات نانو و سیال پایه در جدول ۱ آورده شده است. این خواص مربوط به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. نانوذرات در قطری حدود ۲۰ نانومتر می‌باشند. نانوذره آلومینیم اکسید به علت عملکرد قابل قبول در گردآورنده‌های خورشیدی مختلف انتخاب گردیده است [۲۸]. همچنین در کشور ما نیز به نسبت سایر نانوذرات موجود در بازار از قیمت مناسبی جهت کار آزمایشگاهی برخوردار است.

جدول ۱- خواص آب و آلومینیم اکسید

خواص	آب	آلومینیم اکسید
Cp	۴۱۸۱/۸	۷۶۵
$\rho$	۳۹۰۰	۹۹۸/۲
k	۳۰	۰/۶۰
$\mu$	۰/۰۰۱۰۰۳	-

### ۴-۳- پارامترهای شبیه‌سازی

عدد رینولدز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (15)$$

ضریب اصطکاک از رابطه (۱۶) حاصل می‌شود:

$$f = \frac{2D\Delta P}{\rho L u_m^2} \quad (16)$$

عدد ناسلت طبق رابطه (۱۷) برای حالت‌های مختلف به دست

می‌آید:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (17)$$

جهت محاسبه ضریب انتقال گرما از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود:

$$h = q'' / (T_w - T_b) \quad (18)$$

و در انتها ضریب عملکرد حرارتی [۲۹] به این صورت نوشته می‌شود:

$$\eta = \frac{(Nu / Nu_p)}{(f / f_p)^{1/3}} \quad (19)$$

### ۴- بحث و نتایج

#### ۱-۱- استقلال از شبکه

برای نواریچشی دو کاناله، بیشترین مقادیر پارامترهای هندسی جهت استقلال از شبکه در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۲ نتایج استقلال از شبکه محاسباتی آورده شده است. این بررسی در مقدار عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ صورت گرفته است.

جدول ۲- نتایج استقلال از شبکه

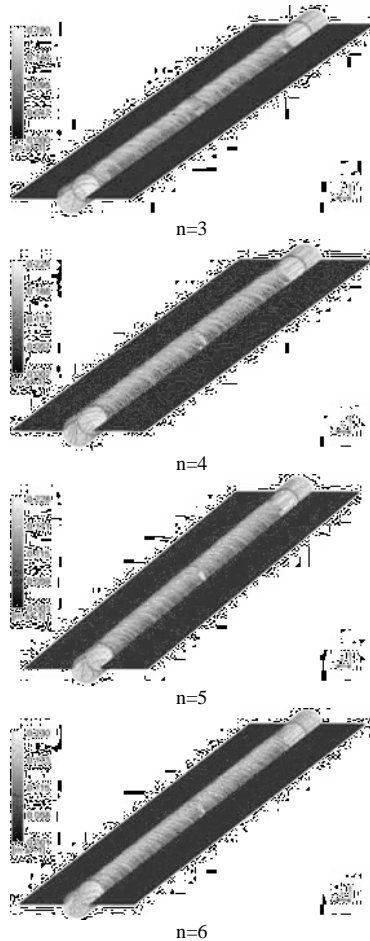
تعداد سلول	Nu	f	درصد خطا Nu	درصد خطا f
۱۵۷۴۱۹۵	۲۴۸/۷۸	۰/۰۶۱۸۴۷	۴۴	۸
۴۵۴۰۸۸۳	۲۱۶/۶۸	۰/۰۵۸۵۸۶	۲۴/۳۵	۲/۴۸
۶۹۳۵۱۵۰	۱۷۲/۷۲	۰/۰۵۸۰۳۰	۰/۰۰۴	۱/۲۴
۹۸۴۷۸۷۵	۱۷۲/۶۹	۰/۰۵۷۸۷۴	۰/۰۰۲	۰/۵
۱۲۹۸۹۴۴۰	۱۷۲/۶۴	۰/۰۵۷۱۶۴	-	-

#### ۲-۲- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی از مطالعه‌ای آزمایشگاهی که توسط آقای کیم و همکاران [۳۰] صورت گرفته، استفاده گردید. جریان آشفته با ۳ درصد نانوسیال آب آلومینیم اکسید شبیه‌سازی شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود خطا بین روش عددی و حل آزمایشگاهی بسیار کم است.

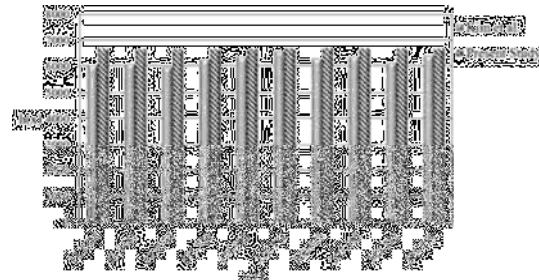
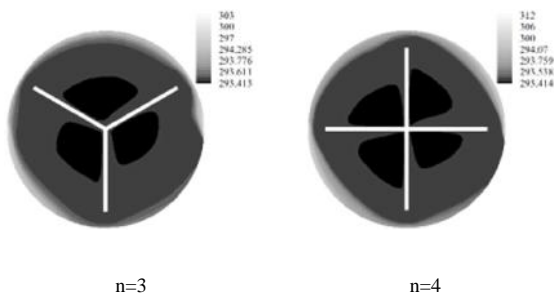
<sup>1</sup> Realizable

<sup>2</sup> SIMPLE



شکل ۵- خطوط جریان بیشترین مقادیر هندسی در عدد رینولدز ۴۰۰۰

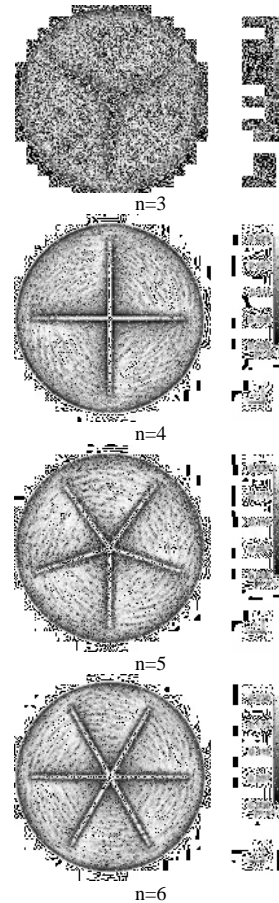
در شکل ۶ کانتور دما در مقطع  $x/D=40$  برای هندسه‌های مختلف نشان داده شده است. با افزایش مقدار کانال و چرخشی‌تر شدن سیال، شدت آشفتگی بیشتر و اختلاط سیال بهتر صورت می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود در دو طرف لوله که در تماس با صفحات جاذب قرار دارد دمای سیال نسبت به سایر نقاط مقدار بیشتری دارد.



شکل ۳- اعتبارسنجی

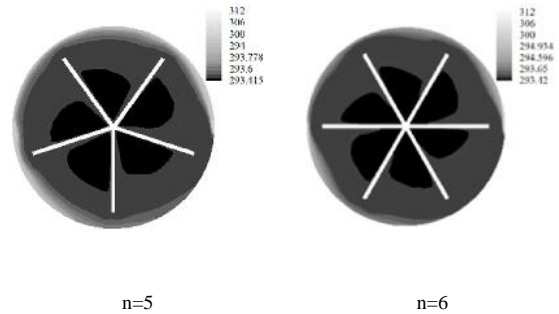
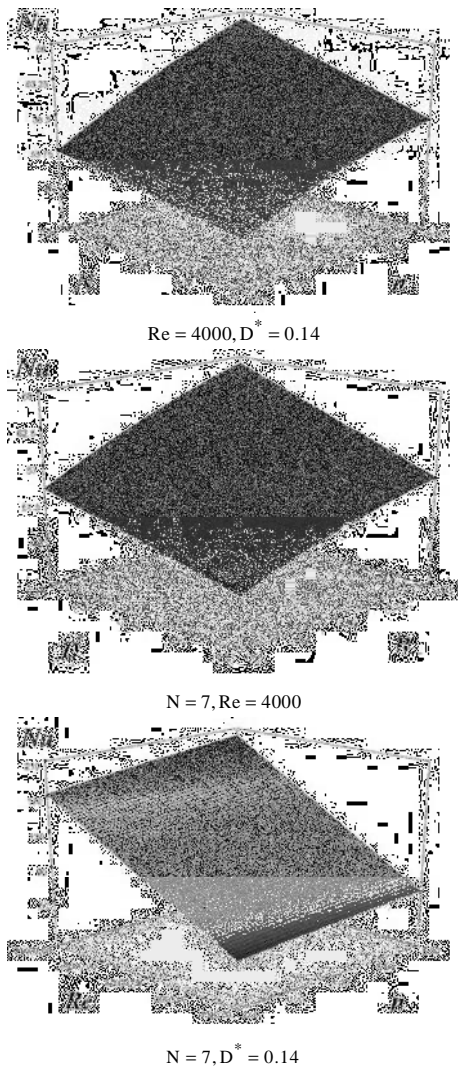
### ۳-۴- جریان سیال و دما

شکل ۴ کانتور سرعت و بردار مماس بر مقطع  $x/D=40$  در نوارپیچی می‌دهد. وجود نوارپیچی سبب چرخش در جریان سیال می‌شود. هرچه تعداد کانال نوارپیچی بیشتر شود سبب افزایش میزان چرخش سیال می‌شود. از طرفی دیگر افزایش نسبت پیچش و قطر نیز بر میزان چرخش سیال می‌افزاید. این چرخش سیال باعث تخریب لایه مرزی شده و انتقال گرما را افزایش می‌دهد. با اعمال شرط عدم لغزش دیواره، سرعت در اطراف دیواره لوله و نوارپیچی برابر با صفر می‌باشد و با حرکت به سمت دیوار سرعت افزایش می‌یابد. در شکل ۵ خطوط جریان سیال نشان داده شده است.



شکل ۴- بردار و کانتور سرعت برای بیشترین مقادیر هندسی و عدد رینولدز ۴۰۰۰

ناسلت که بیانگر نسبت انتقال گرما جابه‌جایی به انتقال گرما هدایتی است، افزایش می‌یابد. با افزایش پارامترهای ذکر شده لایه مرزی حرارتی همواره در حال تشکیل شدن می‌باشد و جریان سیال همواره در حال توسعه یافتگی است. مجهز کردن لوله به نوار پیچشی باعث ایجاد جریان ثانویه در سیال می‌شود. با افزایش پارامترهای مختلف هندسی در حالت فیزیکی جریان سیال چرخشی‌تر شده و اختلاط سیال را بهبود می‌بخشد. در شکل ۷ تاثیرات تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش و عدد رینولدز بر عدد ناسلت نشان داده شده است. در یک نسبت قطر و پیچش ثابت، با اضافه کردن تعداد کانال می‌توان بر مقدار عدد ناسلت به میزان چشمگیری افزود. با افزایش کانال از ۲ به ۶، در نسبت پیچش ۷، نسبت قطر ۰/۱۴ و عدد رینولدز ۴۰۰۰، عدد ناسلت به میزان ۲۶٪ افزایش می‌یابد. تاثیر عدد رینولدز بر عدد ناسلت به این گونه است که با افزایش آن، بر مقدار عدد ناسلت افزوده می‌شود.



شکل ۶- کانتور دمایی برای بیشترین مقادیر هندسی و عدد رینولدز ۴۰۰۰

#### ۴-۴- تغییرات ضریب اصطکاک در تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش مختلف

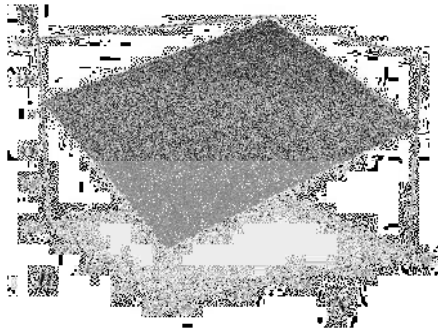
در جدول ۳ مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده در حالت مختلف هندسی آورده شده است. برای تمامی حالات با افزایش تعداد کانال و نسبت قطر و پیچش، مقدار ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. افزایش تعداد کانال باعث بیشتر شدن برخورد سیال به دیواره می‌شود. همچنین با افزایش نسبت قطر، فضای بیشتری از لوله توسط نوار پیچشی اشغال شده که باعث بیشتر شدن برخورد سیال با دیواره نوار پیچشی می‌شود. افزایش نسبت پیچش سبب چرخشی‌تر شدن جریان سیال در راستای لوله می‌شود. تمامی موارد ذکر شده باعث افزایش مقدار ضریب اصطکاک می‌گردد. با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب اصطکاک نیز کمتر می‌شود. کمترین میزان ضریب اصطکاک برای نوار پیچشی ۲ کاناله، در نسبت پیچش ۴، نسبت قطر ۰/۱۰ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ مقداری برابر با ۰/۰۴۵ دارد. بیشترین مقدار ضریب اصطکاک برابر با ۰/۲ برای حالت نوار پیچشی ۶ کاناله، در نسبت پیچش ۷، نسبت قطر ۰/۱۴ و عدد رینولدز ۴۰۰۰ است.

جدول ۳- تغییرات ضریب اصطکاک در تعداد کانال، نسبت پیچش، نسبت قطر و عدد رینولدز مختلف

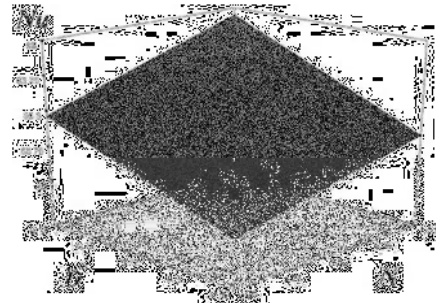
n	$D^*$	Re	f
2	0.1	4000	0.075
		20000	0.045
	0.14	4000	0.086
		20000	0.051
3	0.1	4000	0.088
		20000	0.051
	0.14	4000	0.1
		20000	0.058
4	0.1	4000	0.097
		20000	0.057
	0.14	4000	0.126
		20000	0.071
5	0.1	4000	0.11
		20000	0.064
	0.14	4000	0.155
		20000	0.082
6	0.1	4000	0.126
		20000	0.07
	0.14	4000	0.18
		20000	0.095

#### ۴-۵- تغییرات عدد ناسلت در تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش مختلف

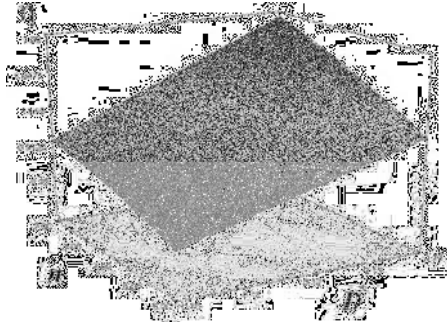
در تمامی حالات با افزایش تعداد کانال، نسبت پیچش و قطر عدد



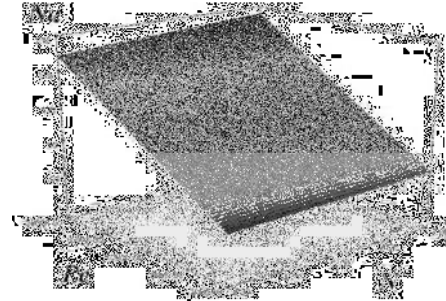
$Re = 4000, D^* = 0.14$



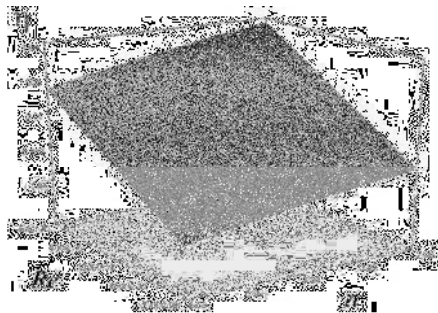
$n = 6, Re = 4000$



$N = 7, Re = 4000$



$n = 6, D^* = 0.14$



$N = 7, D^* = 0.14$



$n = 6, N = 7$

شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت در تعداد کانال، نسبت پیچش، نسبت قطر و عدد رینولدز مختلف

#### ۴-۶- تغییرات ضریب عملکرد حرارتی در تعداد کانال،

#### نسبت قطر و پیچش مختلف

در شکل ۸ ضریب عملکرد حرارتی در تمامی حالات مورد بررسی نشان داده شده است. با افزایش تعداد کانال نوار پیچشی، مقدار ضریب عملکرد حرارتی کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت پیچش و قطر، در یک مقدار ثابت کانال و عدد رینولدز، بر میزان ضریب عملکرد حرارتی افزوده می‌شود. با ثابت نگه داشتن تعداد کانال، نسبت قطر و پیچش، کاهش عدد رینولدز سبب افزایش مقدار ضریب عملکرد می‌شود. مقدار ضریب عملکرد بیشتر از واحد نشان دهنده قدرتمند بودن مکانیزم انتقال گرما نسبت به اصطکاک است. بیشترین مقدار آن در حالت نوار پیچشی ۲ کاناله، در نسبت پیچش ۷، نسبت قطر ۰/۱۴ و عدد رینولدز ۴۰۰۰ است که مقداری برابر با ۱/۰۸ دارد. کمترین مقدار ضریب عملکرد برابر با ۰/۸۳۶ برای حالت نوار پیچشی ۶ کاناله، در نسبت پیچش ۴، نسبت قطر ۰/۱۰ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ است.

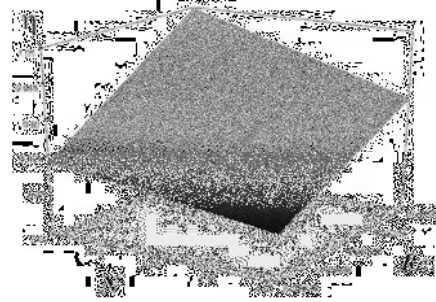
آهنگ تولید انرژی جنبشی آشفتگی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )	G
ضریب انتقال گرما ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	h
ضریب رسانایی گرمایی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	k
انرژی جنبشی آشفتگی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	K
طول (m)	L
نسبت پیچش	N
تعداد کانال	n
عدد ناسلت	Nu
گام پیشروی	Pi
فشار (Pa)	P
اختلاف فشار ورودی و خروجی لوله (Pa)	$\Delta P$
شار حرارتی ( $\text{Wm}^{-2}$ )	$q''$
عدد رینولدز	Re
فاکتور شکل ذره جامد نانو	SH
دما (K)	T
بردار سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )	$\vec{u}$
سرعت ورودی ( $\text{ms}^{-1}$ )	u
پهنا (m)	w
فاصله از مبدا مختصات در راستای محور (m)	x
فاصله بی‌بعد از دیواره	y+

**علائم یونانی**

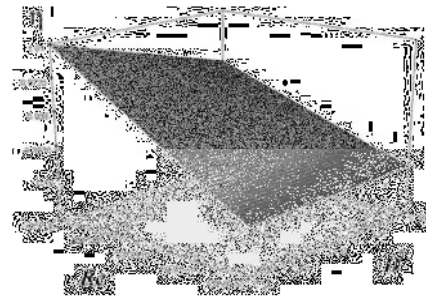
آهنگ اضمحلال ( $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ )	$\varepsilon$
عدد پراختل آشفتگی برای آهنگ اضمحلال	$\sigma_\varepsilon$
عدد پراختل آشفتگی برای انرژی جنبشی آشفتگی	$\sigma_K$
چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$\rho$
لزجت ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$\mu$
لزجت موثر ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$\mu_{\text{eff}}$
لزجت آشفتگی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$\mu_t$
تانسور تنش (Pa)	$\tau$
ضریب عملکرد حرارتی	$\eta$
کسر حجمی	$\phi$
حالت کروی ذره	$\psi$

**زیرنویس**

توده سیال	b
موثر	eff
سیال پایه	f
انرژی جنبشی	k
میانگین	m
نانو سیال	nf
نانوذرات	p
لوله خالی	P
نوار پیچشی	t
دیواره	w



$n = 6, D^* = 0.14$



$n = 6, N = 7$

شکل ۸- تغییرات ضریب عملکرد در تعداد کانال، نسبت پیچش، نسبت قطر و عدد رینولدز مختلف

**۵- نتیجه گیری**

مقادیر میزان انتقال گرما، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی برای لوله مجهز به نواریپیچشی چند کاناله، در تعداد کانال‌های مختلف (۲، ۳، ۴، ۵ و ۶) و ابعاد کانال نسبت قطر (۰/۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۴) و پیچش (۴، ۵، ۶ و ۷) و در بازه عدد رینولدز بین ۴۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به طور کلی با افزودن نواریپیچشی نسبت به لوله خالی، میزان ضریب اصطکاک و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصله، کاهش تعداد کانال منجر به افزایش ضریب عملکرد حرارتی می‌شود. افزودن تعداد کانال باعث افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک می‌شود اما این افزایش انتقال گرما به گونه‌ای نیست که مکانیزم انتقال گرما بتواند بر مکانیزم اصطکاک غلبه کند. اما در مواقعی که صرفاً بحث انتقال گرما مطرح باشد استفاده از نواریپیچشی با تعداد کانال بالا توصیه می‌شود. با افزایش نسبت قطر و پیچش در یک نواریپیچشی با تعداد کانال ثابت، ضریب عملکرد حرارتی بیشتر می‌شود. همچنین در تمامی حالات با کاهش عدد رینولدز، میزان ضریب عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد.

**۶- فهرست علائم**

**علائم انگلیسی**

گرمای ویژه ( $\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$C_p$
ثوابت مدل توربولانسی	$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$
قطر (m)	D
نسبت قطر	$D^*$
ضریب اصطکاک	f



- Cut twisted tape, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, pp. 749-758, 2018.
- [17] Kumar B. Prasad N., Investigation of twisted tape inserted solar water heaters—heat transfer, friction factor and thermal performance results, *Renewable Energy*, Vol. 19, No. 3, pp. 379-398, 2000.
- [18] Jaisankar S., Radhakrishnan T. K., Sheeba K. N., Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 1224-1231, 2009.
- [19] Saravanan A., Senthilkumar J. S., Jaisankar S., Performance assessment in V-trough solar water heater fitted with square and V-cut twisted tape inserts, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 476-486, 2016.
- [20] Sundar L. S., Singh M. K., Punnaiah V., Sousa A. C. M., Experimental investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids on the effectiveness of solar flat-plate collectors with and without twisted tape inserts, *Renewable Energy*, Vol. 119, pp. 820-833, 2018.
- [21] Gunjo D. G., Mahanta P., Robi P. S., CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition, *Renewable Energy*, Vol. 106, pp. 24-36, 2017.
- [22] Bejan A., *Turbulent Boundary Layer Flow*, in: *Convection Heat Transfer*, Eds., pp. 320-368: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [23] ANSYS® Academic research, release 18.1, ANSYS FLUENT, Theory Guide, ANSYS, Inc.
- [24] Versteeg H. K., Malalasekera W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, second ed., Pearson/Prentice Hall, Harlow, England, 2007.
- [25] Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J., A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, *Computers & Fluids*, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238, 1995.
- [26] Menter F. R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AAIA journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [27] Hasan M. I., Rageb A. M. A., Yaghoubi M., Investigation of a Counter Flow Microchannel Heat Exchanger Performance with Using Nanofluid as a Coolant, *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, Vol. 2 No. 3, pp. 35-43, 2012.
- [28] Verma S. K., Tiwari A. K., Progress of nanofluid application in solar collectors: A review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 100, pp. 324-346, 2015.
- [29] Webb R. L., Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 4, pp. 715-726, 1981.
- [30] Kim D., Kwon Y., Cho Y., Li C., Cheong S., Hwang Y., Lee J., Hong D., Moon S., Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, Supplement, pp. 119-123, 2009.
- ۷- مراجع
- [1] Javaniyan Jouybari H., Saedodin S., Zamzamin A., Nimvari M. E., Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 1506-1517, 2017.
- [2] Choi S. U. S., Eastman J. A., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles: Argonne National Lab., IL (United States)*, 1995.
- [3] Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles, *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227-233, 1993.
- [۴] زمزمیان ا.، تاجیک م. ایمانی ا.، بررسی تجربی کاربرد نانوسیالات در گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۶. ش. ۲. ص ۴۱-۴۹. ۱۳۹۵.
- [۵] صدیقی نسب ا. اشجاری اقدم م. محمدپورفرید م.، مطالعه عددی تأثیر نانو سیال بر انتقال حرارت جابجایی جریان آرام و آشفتگی در لوله‌های مستقیم و U شکل. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۶. ش. ۴. ص ۳۰۵-۳۰۹. ۱۳۹۵.
- [۶] ابراهیم‌نیا بجستان ا. نیازمند ح.، بررسی اثر نانوسیالات در لوله‌های خمیده جهت بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۰. ش. ۱. ص ۱-۱۸. ۱۳۸۹.
- [۷] جهانخشی ا. احمدی ندوشن ا.، بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در کانال مربعی با لوله صلب میانی و صفحه نگهدارنده. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۶. ش. ۴. ص ۵۹-۶۸. ۱۳۹۵.
- [۸] حسینی م. قاسمی ب. رئیسی ا.، جابجایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مثلثی با تیغه گرم‌مازا. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. د. ۴۷. ش. ۲. ص ۵۹-۶۷. ۱۳۹۶.
- [9] Sint N. K. C., Choudhury I. A., Masjuki H. H., Aoyama H., Theoretical analysis to determine the efficiency of a CuO-water nanofluid based-flat plate solar collector for domestic solar water heating system in Myanmar, *Solar Energy*, Vol. 155, pp. 608-619, 2017.
- [10] Kiliç F., Menlik T., Sözen A., Effect of titanium dioxide/water nanofluid use on thermal performance of the flat plate solar collector, *Solar Energy*, Vol. 164, pp. 101-108, 2018.
- [11] Genc A. M., Ezan M. A., Turgut A., Thermal performance of a nanofluid-based flat plate solar collector: A transient numerical study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 130, pp. 395-407, 2018.
- [12] Hawwash A. A., Abdel Rahman A. K., Nada S. A., Ookawara S., Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 130, pp. 363-374, 2018.
- [13] Sheikholeslami, M., Jafaryar, M., Li, Z., Nanofluid turbulent convective flow in a circular duct with helical turbulators considering CuO nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 980-989, 2018
- [14] Gugulothu R., Reddy K. V. K., Somanchi N. S., Adithya E. L., A Review on Enhancement of Heat Transfer Techniques, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, Part A, pp. 1051-1056, 2017.
- [15] Farnam M., Khoshvaght-Aliabadi M., Asadollahzadeh M. J., Heat transfer intensification of agitated U-tube heat exchanger using twisted-tube and twisted-tape as passive techniques, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 133, pp. 137-147, 2018.
- [16] Abed A. M., Majdi H. Sh., Hussein Z. Fadhil D., Abdulkadhim A., Numerical analysis of flow and heat transfer enhancement in a horizontal pipe with P-TT and V-