



## بهبود عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال با استفاده از پین-فین‌های V شکل و نانوسیال $Al_2O_3$ /آب

مرتضی محمدی<sup>۱</sup>، سید حسین مظلومی<sup>۲\*</sup>، سید مسعود حسینی<sup>۳</sup>، مرتضی خوشوقت علی آبادی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱

### چکیده

در این پژوهش از دو هندسه کلی میکروکانال (مستقیم و V شکل) با چهار حالت متفاوت انقطاع استفاده شده است. اثرات هندسه‌ها و انقطاع پین‌ها در رینولدزهای مختلف (۹۰۰-۱۰۰) روی افزایش انتقال حرارت میکروکانال، مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مهم از قبیل، عدد ناسلت، افت فشار، ضریب انتقال حرارت و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی توسط نرم افزار فلونت ۱۷ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند، میکروکانال‌های منقطع سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در مقایسه با هندسه‌های مستقیم شده است؛ میکروکانال‌های دارای پین V شکل به دلیل ایجاد اغتشاش در بالک سیال و تولید جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری را نشان می‌دهند. از میان حالت‌های مختلف، حالت منقطع غیرخطی برای هر دو هندسه کلی، دارای بالاترین ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی است که تقریباً ۱/۵ برابر حالت پایه است. افزودن نانوذرات  $Al_2O_3$  به آب باعث افزایش ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی تا ۱/۸۳ برابر برای هندسه مستقیم منقطع غیرخطی و ۱/۷۷ برابر برای هندسه V شکل منقطع غیرخطی نسبت به حالت پایه گردید؛ همچنین افزایش غلظت نانوذرات، سبب بهبود عملکرد هیدرولیکی-حرارتی شد.

**کلمات کلیدی:** چاه حرارتی؛ میکروکانال؛ انتقال حرارت؛ افت فشار؛ عدد ناسلت؛ نانوسیال.

## Improvement of Hydrothermal Performance of Microchannel Heat Sinks using V-Shape Pin-Fins and $Al_2O_3$ / Water Nanofluid

M. Mohammadi<sup>1</sup>, S. H. Mazloumi<sup>2\*</sup>, S.M. Hassani<sup>3</sup>, M. Khoshvaght-Aliabadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Asst. Prof, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> PhD student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>4</sup> Department of Chemical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

### Abstract

in this study two general geometries of microchannels (Straight and V-shaped) with four different types of interruption are studied. The effects of geometries and pin-fins interruption on performance enhancement of microchannel heat sinks were investigated at various Reynolds number (100-900). Important parameters such as base temperature, Nusselt number, pressure drop, heat transfer coefficient and hydrothermal performance factor were evaluated. The simulations have been carried out using Fluent 17 software. The results show that interrupted microchannels improve the heat transfer coefficient and Nusselt number compared to integral microchannels. Microchannels with a V-shaped pin report better results due to turbulence in the bulk flow and the generation of vortex. Through different configurations, the Interrupted-Staggered configuration for both straight and V-shaped geometries shows the highest hydrothermal performance factor with increase of about 1.5 times in comparison to the Straight-Integral model. adding  $Al_2O_3$  nanoparticles to water increased the hydrothermal performance factor approximately 1.83 times in the case of Straight, Interrupted-Staggered and about 1.77 times in the case of V-shaped, Interrupted-Staggered. Increasing the concentration of nanoparticles also improved the hydrothermal performance.

**Keywords:** Heat Sink; Microchannel; Heat Transfer; Pressure Drop; Nusselt Number; Nanofluid.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۰۵۵؛ فکس: ۰۵۱۳۸۸۰۶۱۲۳

آدرس پست الکترونیک: [s.h.mazloumi@um.ac.ir](mailto:s.h.mazloumi@um.ac.ir)

## ۱- مقدمه

رشد تقاضای انرژی، نیاز به افزایش کارایی انرژی و کاهش استفاده از تجهیزات، فضای مورد نیاز کمتر برای وسایل، افزایش بهره‌وری و سهولت استفاده از تجهیزات، انقلابی در تبادل انتقال حرارت و جرم به وجود آورد. در میان این تکنیک‌ها، استفاده از میکروکانال‌های تبادل انتقال حرارت و انتقال جرم مطلوب به نظر می‌رسند.

میکروکانال‌ها می‌توانند جریان آرام را به گونه‌ای در کانال‌ها تثبیت نمایند که ضرایب انتقال حرارت بالایی حاصل گردد. نسبت سطح تماس به حجم افزایش یابد و افت فشار کلی کاهش یابد. موارد ذکر شده، مزایای اصلی استفاده از میکروکانال‌ها در صنایع مختلف است [۱].

به عنوان مثال، افزایش سریع در تعداد ترانزیستورها در ریزتراشه‌ها<sup>۱</sup> و توان و کارایی و تولید حرارت بالاتر آنها، مشکل جدیدی در صنایع الکترونیکی محسوب می‌شود. از این رو بهبود عملکرد چاه‌های حرارتی میکروکانال با توجه به افزایش انتقال حرارت، توسط بسیاری از محققان مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا هندسه‌های مختلفی برای چاه‌های حرارتی، طراحی و مورد آزمایش قرار گرفته است. چاه حرارتی میکروکانال که در سال ۱۹۸۱ توسط توکرمن و پیز [۱] ارائه شد، یک دستگاه رسانای حرارتی است که برای جذب و دفع گرما از یک جسم با دمای بالا مانند یک سیستم میکروالکترومکانیکی طراحی شده است. به طور کلی دو روش برای افزایش عملکرد حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال استفاده می‌شود؛ روش اول ایجاد تغییر در هندسه میکروکانال است و روش دوم اصلاح خواص حرارتی سیال کاری است.

به عنوان مثال، اثر فاصله بین فین‌ها در یک چاه حرارتی میکروکانال توسط جاجا و همکارانش [۲]، مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه‌ای دیگر [۳]، آنها نشان دادند که با استفاده از نانولوله‌های کربنی می‌توان دمای پایه میکروکانال را کاهش داد. در پژوهش دیگری ماهیان و همکارانش [۴]، اثر نانوسیال  $TiO_2$ /آب بر عملکرد حرارتی میکروکانال برای پیش‌بینی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در مدل‌های ویسکوز را مورد بررسی قرار دادند. ارشاد و علی [۵]، [۶]، در پژوهشی اثرات

نانوذرات  $TiO_2$  را به همراه نانوصفحات گرافنی در یک میکروکانال مستقیم پیوسته برای رژیم جریان آرام، مورد بررسی قرار دادند. تفرجی و همکاران [۷]، از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت جریان نانوسیال  $TiO_2$ /آب در میکروکانال استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که یک شبکه به خوبی آموزش دیده، می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای آزمایش‌های پر هزینه و وقت‌گیر نانوسیال در میکروکانال باشد. یک مطالعه عددی روی رفتار جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌های  $CuO$ /آب و  $Al_2O_3$ /آب روی میکروکانال پین-فین دار توسط سیف و فیض بخشی [۸] انجام شد. آنها گزارش دادند که استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه، سبب بهبود عملکرد میکروکانال می‌شود. توکیت و همکاران [۹]، عملکرد نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $CuO$  و  $SiO_2$  به عنوان افزودنی به سیال پایه آب را به صورت عددی بررسی کردند. پارامترهای انتقال حرارت و افت فشار در یک چاه حرارتی با استفاده از نانوسیال  $Al_2O_3$ /آب، توسط سلواکومار و همکارانش [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفت. عملکرد چاه‌های حرارتی دارای پین-فین با ساختارهای مختلف (مربعی، مثلثی و دایره‌ای) و نانوسیال‌های  $Al_2O_3$ /آب/الماس و  $Al_2O_3$ /آب را به صورت عددی توسط حسن [۱۱]، مورد بررسی قرار گرفت. ژای و همکاران [۱۲]، ساختارهای مختلف و نانوسیال  $Al_2O_3$ /آب را در یک میکروکانال تحت شار حرارتی ثابت، مورد مطالعه قرار دادند. استفاده همزمان از کانال‌های موجی و نانوسیال به عنوان روش ترکیبی توسط ساکانوا و همکارانش [۱۳]، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. اثر پارامترهای هندسی مختلف (دامنه موج و طول موج) و نانوسیال (آب/الماس،  $Al_2O_3$ /آب و  $SiO_2$ /آب) مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد یک میکروکانال با ترکیب خطی پین-فین‌های دایره‌ای و در حضور نانوسیال‌های  $ZnO$ /آب و  $SiO_2$ /آب به صورت آزمایشگاهی توسط دوانگ تونگ ساک و وانگ وایزس [۱۴] و [۱۵]، مورد بررسی قرار گرفت. اثرات ریب با طراحی‌های مختلف بر عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه حرارتی نانوسیال به صورت عددی توسط قال و همکارانش [۱۶]، مورد بررسی گرفت. طراحی جدید چاه حرارتی با کانال‌های دولایه مستطیلی و مثلثی با نانوسیال‌های  $Al_2O_3$ /آب و  $SiO_2$ /آب توسط احمد و همکارانش [۱۷]، مورد آزمایش قرار گرفت.

<sup>۱</sup> Micro Chips

### ۳- ایجاد شکل هندسی و تولید شبکه

در این پژوهش از دو هندسه کلی میکروکانال (مستقیم، ۷ شکل) با چهار حالت متفاوت (پیوسته، پیوسته-منقطع، منقطع خطی و منقطع غیرخطی) استفاده شده است که در مجموع هشت هندسه خواهیم داشت که سه حالت اول از هندسه مستقیم توسط خوشوقت و همکاران [۲۱]، مورد بررسی قرار گرفته است که در این پژوهش به منظور مقایسه بین حالت‌های مختلف تمامی ساختارها شبیه‌سازی شده است. به دلیل صرفه‌جویی در فضا و تشابه ابعاد و جزئیات هندسه‌ها، یک هندسه با جزئیات در شکل ۱-الف ارائه شده است و از ارائه بقیه خودداری می‌شود.

### ۳-۱- بررسی استقلال از مش

برای بررسی استقلال از مش طبق شکل ۱ با افزایش تعداد مش در هر جهت و بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار در میکروکانال مستقیم پیوسته، به تعداد مش مطلوب خواهیم رسید. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مقادیر ضریب انتقال حرارت و افت فشار در دو مقدار مش چهارم و پنجم بسیار نزدیک به هم و تفاوت میانگین آنها کمتر از ۱٪ است؛ بنابراین برای کاهش زمان شبیه‌سازی و کاهش حافظه مورد نیاز، مجموعه چهارم از شبکه بندی برای شبیه‌سازی اصلی استفاده شده است.

### ۴- شبیه‌سازی و حل مسئله

اثرات هندسه‌های مذکور و انقطاع پین‌ها در چیدمان‌های متفاوت در رینولدزهای مختلف (۱۰۰ تا ۹۰۰) روی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال، مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مهم از قبیل، دمای پایه، عدد ناسلت، افت فشار، ضریب انتقال حرارت، توان پمپ و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور گسسته سازی معادلات حاکم بر مسئله، از روش حجم محدود استفاده شده است. جزئیات مدل که شامل، روش عددی حل معادلات است در جدول ۱ آمده است.

نتایج نشان داد که میکروکانال مثلثی با کانال‌های دو لایه کاهش دمای ۲۷/۴٪ دیواره‌ها را نسبت به حالت مستطیلی دو لایه دارد. مطالعه آزمایشگاهی روی نانوسیال آب/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و میکروکانال با دیواره‌های موج‌دار توسط خوشوقت علی آبادی و سهامیان [۱۸] انجام گرفت. علی و ارشاد [۱۹]، یک مطالعه آزمایشگاهی را برای بررسی اثر زاویه پین روی عملکرد میکروکانال‌ها انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که میکروکانال با زاویه کانال ۲۲/۵ درجه کمترین مقاومت حرارتی را دارد. در زمینه میکروکانال افزایش انتقال حرارت از دو روش اصلاح هندسه و اصلاح خواص سیال کاری انجام می‌شود. در برخی از مراجع مطالعات انجام شده روی هندسه و سیال کاری به صورت خلاصه در جدول‌های جداگانه آورده شده است. که ما از تکرار آنها صرف‌نظر می‌کنیم [۲۰-۲۳]. در بررسی انجام شده هندسه‌های جدید با توجه به اهمیت میکروکانال‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- معادلات و روابط حاکم

در جریان داخل میکروکانال به دلیل جریان سیال، انتقال حرارت همرفتی وجود خواهد داشت که باعث تبادل گرما بین دیواره‌های کانال و محیط اطراف (سیال کاری) می‌شود. پدیده‌های مذکور توسط معادلات انرژی، پیوستگی و اندازه حرکت مدل می‌شوند. از این رو، برای یک جریان سه بعدی در مختصات کارتزین، یک معادله بقایی، سه معادله انتقالی که بیانگر انتقال ممنتوم در دامنه محاسباتی و یک معادله انرژی برای به دست آوردن مجهولات سرعت جریان در جهت  $U(x)$ ، در جهت  $V(y)$ ، در جهت  $W(z)$ ، فشار جریان  $(p)$  و دمای جریان  $(T)$  وجود خواهد داشت.

معادله پیوستگی در حالت کلی:

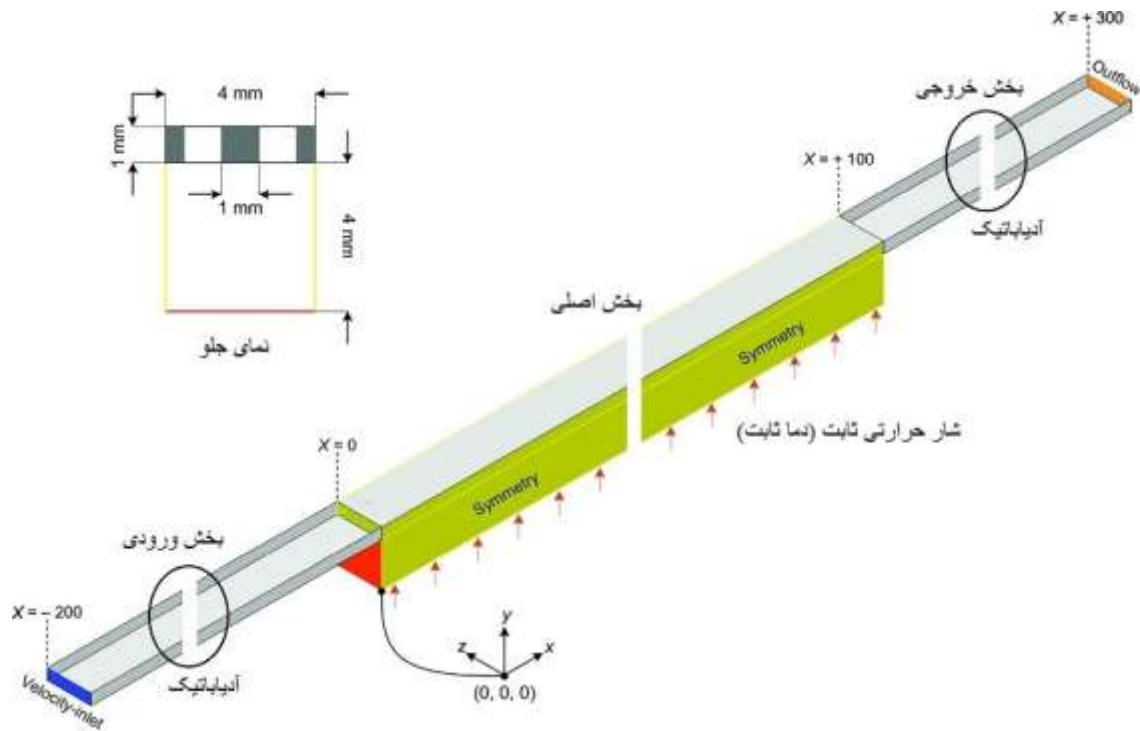
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho V) = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت در حالت کلی:

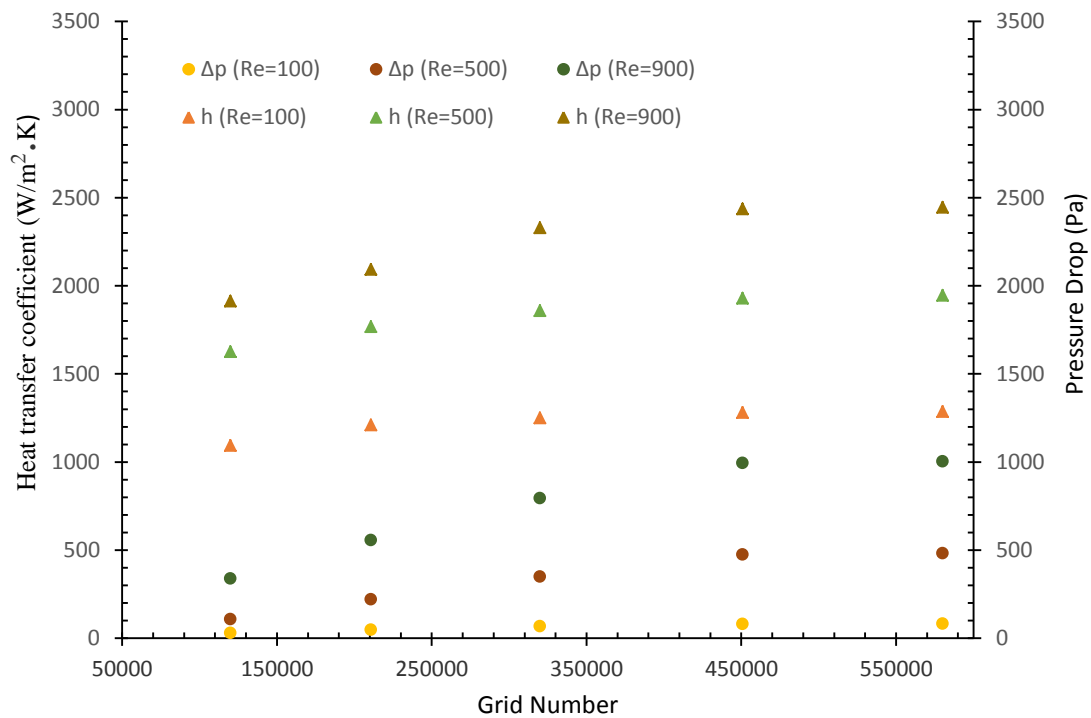
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (2)$$

معادله انرژی در حالت کلی:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - \left( \frac{\partial Ln\rho}{\partial LnT} \right)_p \frac{Dp}{Dt} - (\tau : \nabla v) \quad (3)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) ابعاد و جزئیات المان شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی [۲۱] و ب) تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار بر حسب تعداد شبکه

خواص سیال کاری (آب) مطابق جدول ۲ در دمای ۳۰۰ درجه کلوین نظر گرفته شده است.

### ۵- تحلیل نتایج

در این قسمت به ارائه و بررسی نتایج شبیه‌سازی برای هندسه‌های مذکور پرداخته‌ایم. نتایج در جداول و نمودارها و کانتورهای<sup>۴</sup> دما و بردارهای<sup>۵</sup> سرعت ارائه شده است.

### ۵-۱- اعتبار سنجی<sup>۶</sup>

برای اینکه از اعتبار شبکه‌بندی و مدل‌های ارائه شده جهت شبیه‌سازی اطمینان حاصل کنیم، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی یا میدانی مقایسه می‌شود. نتایج اعتبار سنجی در کار حاضر برای هندسه مستقیم پیوسته (شکل ۴، S<sub>۱</sub>) انجام شده و مقادیر عدد ناسلت با کارهای آزمایشگاهی خوشوقت علی‌آبادی و همکاران [۲۱] و هو و چن [۲۴] مقایسه شده است. در شکل ۲ نتایج اعتبار سنجی نشان داده شده است. طبق شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با مطالعات آزمایشگاهی سازگاری خوبی دارد. میانگین خطای نتایج شبیه‌سازی و داده‌های هو و چن، ۱۷/۱٪ است. همچنین میانگین خطای نتایج کار حاضر با داده‌های خوشوقت و همکاران، ۸٪ است. نتایج شبیه‌سازی عددی کار حاضر با نتایج خوشوقت و همکاران [۲۱] تطابق خوبی دارد.

جدول ۲- خواص آب [۲۳]

واحد	مقدار	خاصیت
$\frac{Kg}{m^3}$	۹۹۸/۲	دانسیته
$\frac{J}{Kg K}$	۴۱۸۲	ظرفیت گرمایی ویژه
$\frac{kg}{m s}$	$۹۹۸ \times 10^{-۶}$	ویسکوزیته
$\frac{g}{mol}$	۱۸	جرم مولکولی

<sup>۴</sup> Contours

<sup>۵</sup> Vector

<sup>۶</sup> Validation

جدول ۱- گسسته سازی و حل معادلات

معادله	روش حل
کوپلینگ فشار-سرعت	SIMPLE
فشار	STANDARD
ممنتوم	SECOND ORDER
انرژی	SECOND ORDER
منفصل کردن معادلات	IMPLICIT

### ۴-۱- فرضیات و شرایط مرزی

گام اول مشخص کردن فرضیات و شرایط مرزی مسئله می‌باشد. فرضیات در نظر گرفته شده به شرح زیر است.

- ❖ حالت پایا و تراکم‌ناپذیری سیال کاری
- ❖ مستقل بودن خواص فیزیکی سیال کاری از دما
- ❖ نادیده گرفتن گرانش و نیروهای حجمی
- ❖ صرفنظر کردن از انتقال حرارت تابشی

برای جریان ورودی به کانال شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۱</sup> و خروجی از کانال به صورت جریان خروجی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. دیواره‌های داخلی کانال دارای شرط مرزی دما ثابت (۳۱۰ درجه کلوین) است. در شبیه‌سازی برای کاهش هزینه محاسباتی یک المان دو کاناله در نظر گرفته شده است و برای دیواره‌های جانبی میکروکانال شرط تقارن<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است.

سرعت‌های ورودی سیال در رینولدزهای ۱۰۰ تا ۹۰۰ با استفاده از معادله (۹) محاسبه گردید.

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (9)$$

در معادله بالا  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب دانسیته و ویسکوزیته سیال کاری و  $d_h$  قطر هیدرولیکی میکروکانال است.  $d_h$  از طریق معادله (۱۰) به دست می‌آید.

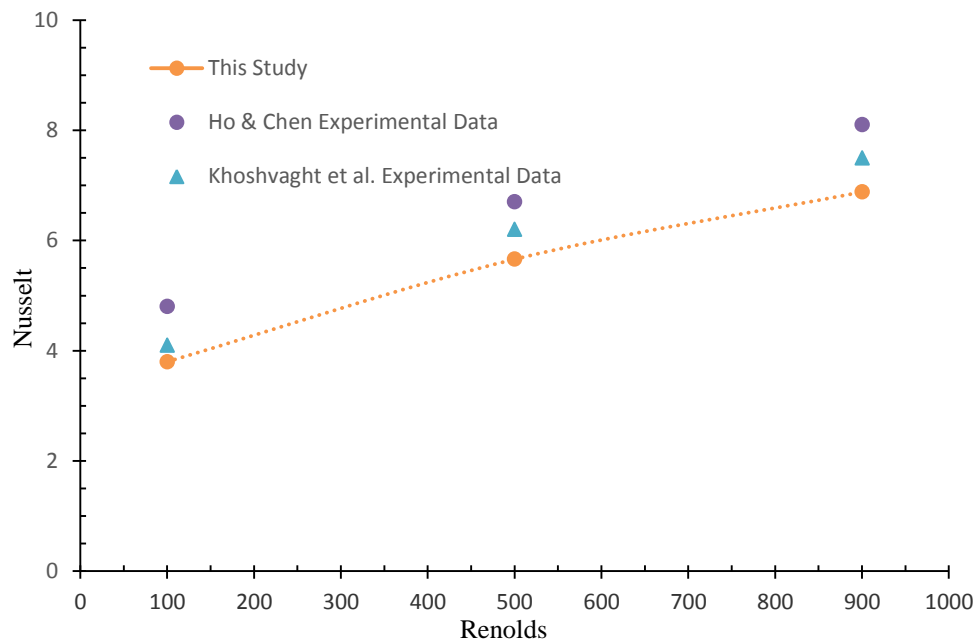
$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (10)$$

در معادله بالا  $P$  محیط و  $A$  سطح مقطع کانال می‌باشد.

<sup>۱</sup> Velocity Inlet

<sup>۲</sup> Outflow

<sup>۳</sup> Symmetric



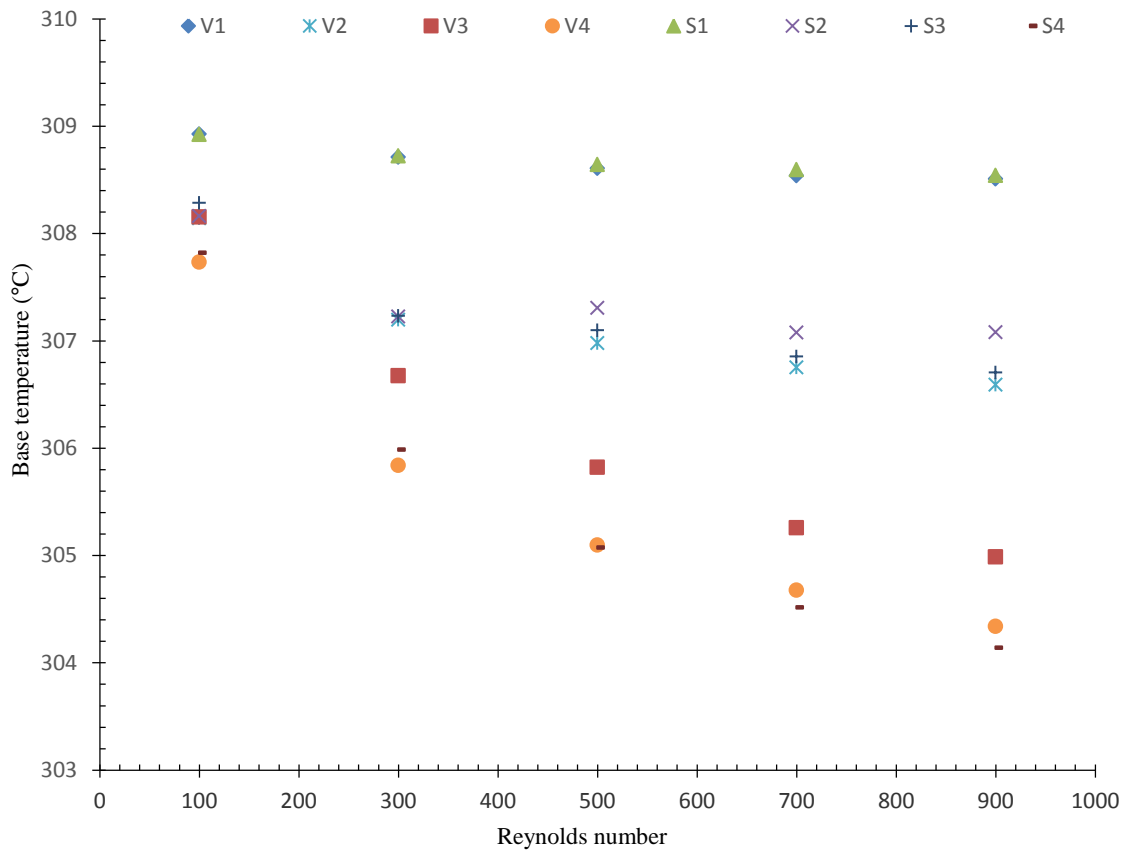
شکل ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی کار حاضر، خوشوقت علی آبادی و همکاران، هو و چن برای مدل (S<sub>۱</sub>) [۲۱ و ۲۲]

حرارتی در میکروکانال‌ها، تنها یک المان که شبیه‌سازی شده است، در شکل نشان داده شده است. واضح است که اختلاف قابل توجهی بین کانتورهای دمایی میکروکانال‌های مستقیم و V شکل وجود دارد. بیشترین مقادیر دمایی در اطراف نواحی پین-فین‌ها قرار دارد و به کار بردن انقطاع در پین-فین‌ها، سبب کاهش قابل توجه درجه حرارت در سطح پایه شده است. به عبارت دیگر، دمای سیال در مجاورت پین‌های پیوسته، به طور قابل توجهی بالاتر از نواحی مرکزی است؛ بنابراین دمای میکروکانال پیوسته به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد تا انتقال حرارت داخل لایه مرزی حرارتی از پین‌های پیوسته به آب با دمای بالا ادامه یابد. از سوی دیگر در میکروکانال‌های منقطع لایه‌های مرزی حرارتی و هیدرولیکی به طور متناوب و پی در پی در سرتاسر پین‌های منقطع شکسته شده و سبب افزایش قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. مقادیر دمای خروجی در رینولدز ۵۰۰ در شکل‌های ۴ و ۵، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر دمای خروجی چاه‌های حرارتی میکروکانال V شکل از میکروکانال مستقیم بزرگتر است و توزیع دما در خروجی برای میکروکانال V شکل یکنواخت‌تر است.

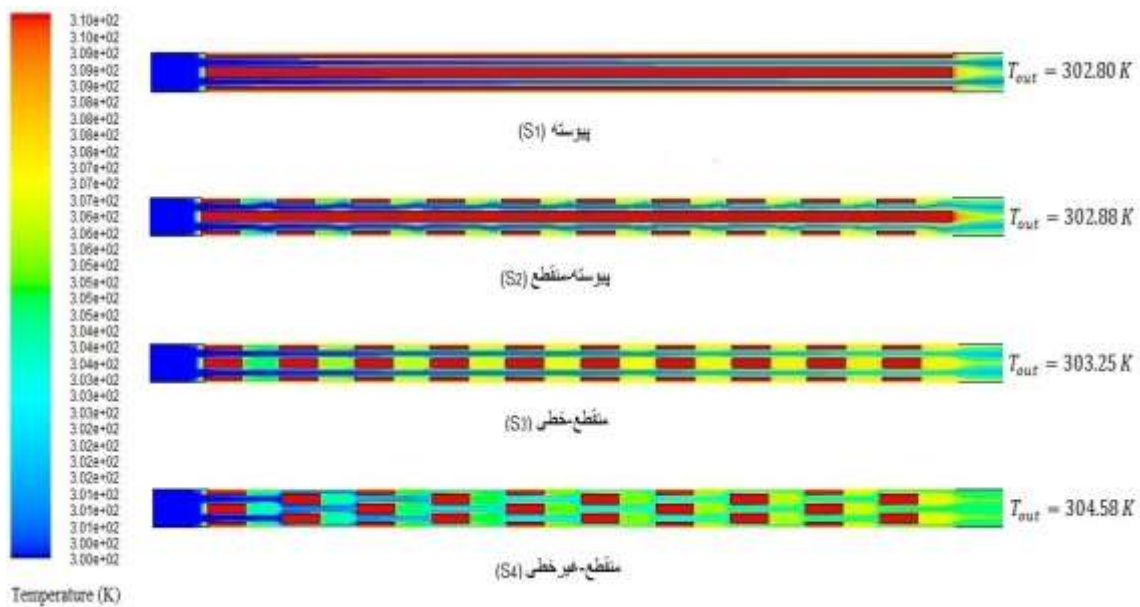
#### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

شکل ۳ تغییرات درجه حرارت متوسط دمای پایه را نشان می‌دهد که شامل، میکروکانال مستقیم و V شکل در حالت‌های مختلف است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، برای تمام حالت‌ها با افزایش عدد رینولدز، دمای پایه میکروکانال کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در میکروکانال مستقیم پیوسته با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۹۰۰، دمای پایه براساس درجه سلسیوس، ۰/۱۲ درصد کاهش می‌یابد. در همین بازه عدد رینولدز، بیشترین کاهش دمای پایه در حدود ۰/۱۲٪، برای میکروکانال V شکل منقطع غیرخطی مشاهده شده است که این تأثیر پین V شکل و انقطاع پین‌ها را بر دمای پایه چاه حرارتی میکروکانال به ویژه در اعداد رینولدز بالاتر، روشن می‌کند. به طور کلی مقادیر دمای پایه میکروکانال‌های V شکل نسبت به نوع مستقیم کمتر است. چیدمان منقطع-غیرخطی پین‌ها، منجر به بهبود قابل توجهی در دمای پایه میکروکانال در دو حالت مستقیم و V شکل می‌شود.

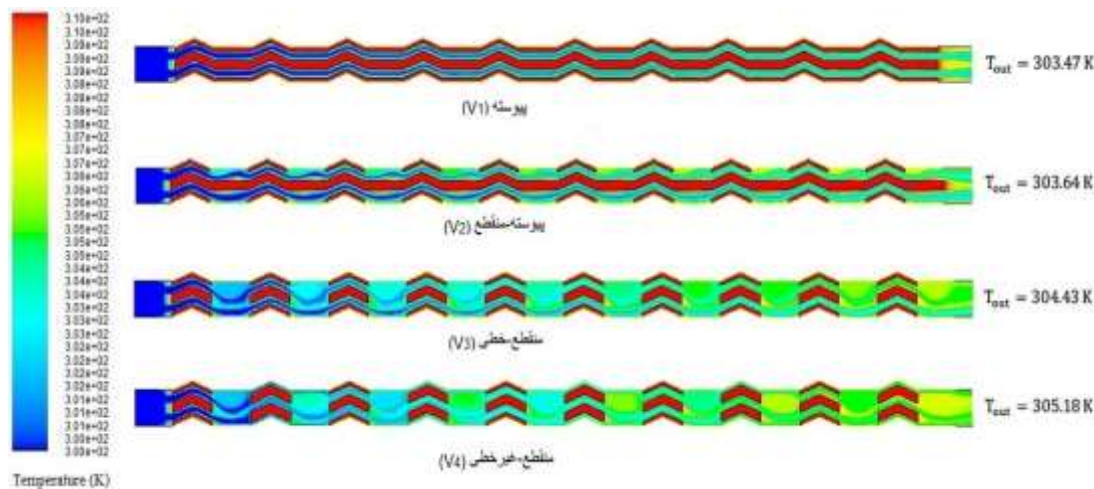
برای درک بهتر، شکل‌های ۴ و ۵ کانتورهای دما را روی سطح پایه چاه‌های حرارتی میکروکانال در رینولدز ۵۰۰ مقایسه می‌کند. با توجه به ماهیت رفتار متناوب هیدرولیکی-



شکل ۳- اثر انقطاع بین-فین‌ها در چاه‌های حرارتی میکروکانال مستقیم و V شکل روی دمای پایه میکروکانال



شکل ۴- اثر انقطاع بین-فین‌ها روی توزیع دمای میکروکانال مستقیم در چهار حالت متفاوت ( $Re = 500$ )



شکل ۵- اثر انقطاع پین-فین‌ها روی توزیع دمای میکروکانال V شکل در چهار حالت متفاوت ( $Re = 500$ )

می‌شود. به دلیل وجود پین‌های منقطع، لایه مرزی حرارتی به طور متناوب از بین می‌رود و دوباره تشکیل می‌شود که این امر سبب افزایش ضرایب انتقال حرارت محلی در سرتاسر چاه حرارتی میکروکانال می‌شود، در حالی که در میکروکانال پیوسته، سیال بدون هیچ گونه آشفتگی به آرامی پروفیل سرعت توسعه یافته را ایجاد می‌کند.

$$h = \frac{Q_{conv}}{A_t(T_w - T_m)} \quad (11)$$

ضریب انتقال حرارت از معادله (۱۱) بدست می‌آید که Q مقدار حرارت منتقل شده است.  $A_t$ ، کل سطوح در ارتباط با سیال،  $T_w$ ، دمای دیواره و  $T_m$  دمای متوسط سیال بین ورودی و خروجی است.

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (12)$$

که  $k_f$  هدایت حرارتی سیال است.  $D_h$  قطر هیدرولیکی میکروکانال است که از معادله (۱۰) بدست می‌آید.

به منظور درک بهتر جریان سیال و پدیده انتقال حرارت در پین-فین‌های منقطع، کانتورهای دما، سرعت و فشار در حالت بزرگنمایی شده در میکروکانال V شکل منقطع-غیرخطی به عنوان نمونه در شکل ۸ نشان داده شده است. وقتی که جریان اصلی به پین منقطع شده می‌رسد، با توجه به کاهش سطح مقطع عرضی کانال، محدودیت عبور جریان ایجاد شده و این موجب افزایش فشار محلی در جلوی پین می‌شود (ناحیه ۱). در کانال‌های مجاور پین منقطع، به دلیل افزایش سطح مقطع کانال افزایش فشار محلی را نشان

اثر انقطاع پین-فین‌ها روی ضریب انتقال حرارت چاه‌های حرارتی میکروکانال مختلف، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد، همچنین در رینولدزهای بالا هندسه‌های V شکل، بیشترین ضریب انتقال حرارت را ارائه می‌دهند. با افزایش عدد رینولدز همان-طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، دمای متوسط سیال در میکروکانال‌ها کاهش می‌یابد و ضخامت لایه مرزی حرارتی نیز کمتر می‌شود که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود. در واقع در رینولدزهای پایین‌تر، عملکرد انتقال حرارت میکروکانال‌ها ضعیف است. این امر می‌تواند به علت شکل-گیری نقاط داغ، سیستم میکروالکترومکانیکی را از بین ببرد. از شکل ۷ روشن است که در رینولدزهای بالاتر، حضور پین-فین‌های منقطع خطی و غیرخطی در دو میکروکانال مستقیم و V شکل می‌تواند سبب تولید جریان‌های چرخشی و ایجاد گردابه شوند. که این موضوع باعث جابجایی و انتقال سیال، بین سیال سرد در مرکز جریان و سیال داغ در مجاورت پین-فین‌ها می‌شود. اگر چه در رینولدزهای پایین جریان‌های چرخشی کوچکی در پشت پین‌ها تولید می‌شود، اما سرعت جریان اصلی به اندازه کافی نیست تا جریان چرخشی را از پشت پین‌ها به بیرون و به بالک سیال منتقل کند. از سوی دیگر از شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود که در یک رینولدز مشخص، انقطاع پین‌ها سبب افزایش ضریب انتقال حرارت چاه حرارتی میکروکانال به ویژه در میکروکانال‌های V شکل

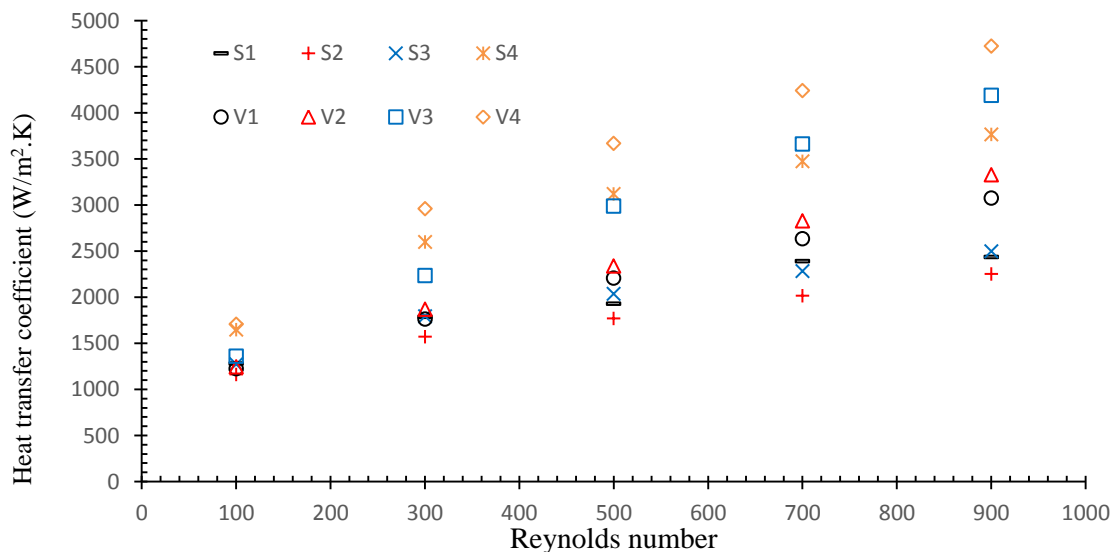


است. این نتایج برای میکروکانال مستقیم نیز، طبق نمودار به همین منوال است.

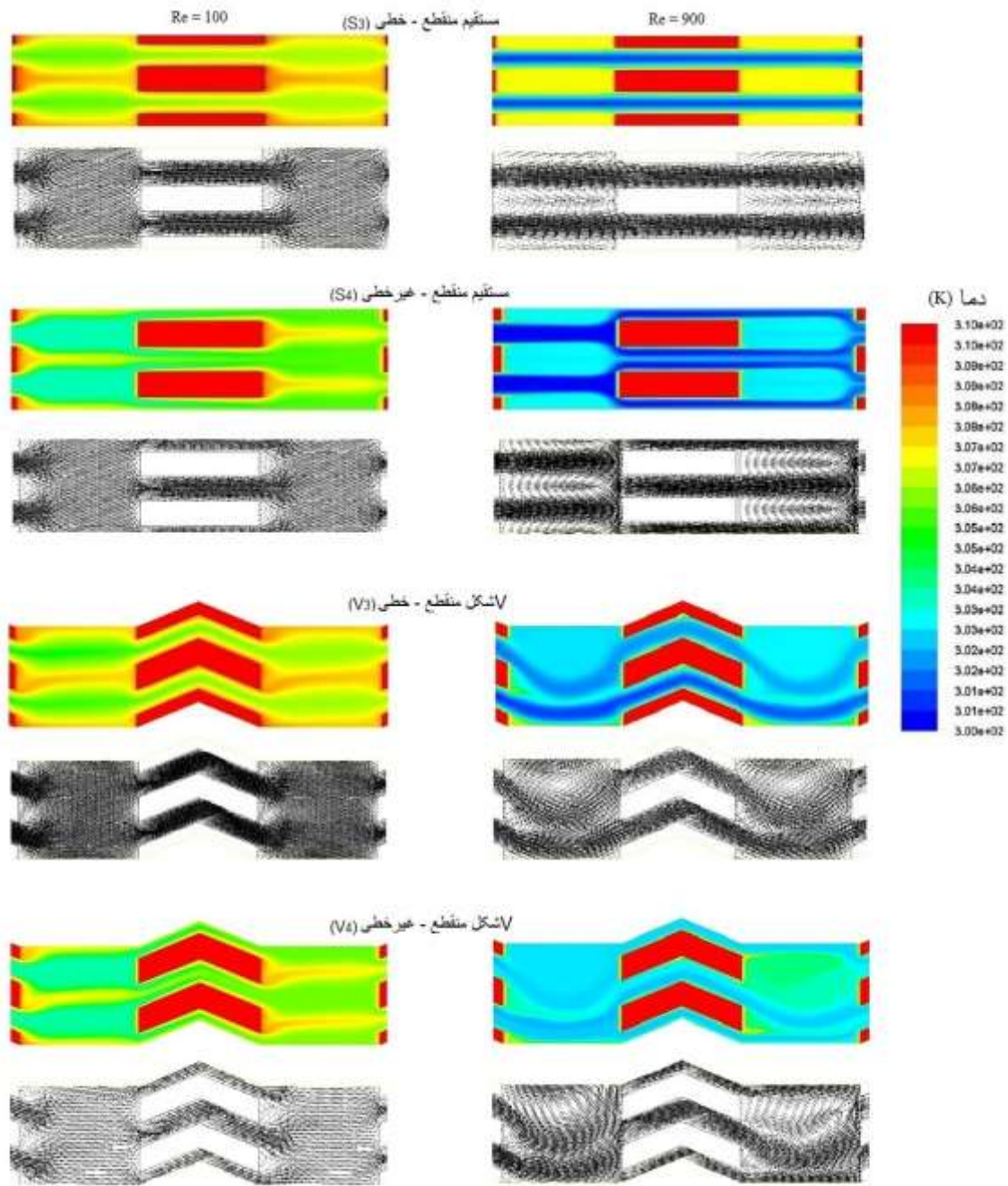
علاوه بر عملکرد حرارتی، مشخصه هیدرولیکی یکی دیگر از پارامترهای مهم در چاه‌های حرارتی میکروکانال است. از این رو باید سعی شود که توان مصرفی پمپ بهبود یابد و مصرف انرژی در استفاده از میکروکانال بهینه گردد. شکل ۱۰ افت فشار در میکروکانال‌های مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار افزایش می‌یابد و میکروکانال‌های V شکل، افت فشار بیشتری نسبت به میکروکانال‌های مستقیم دارند. بیشترین افت فشار در میکروکانال V شکل، مربوط به حالت منقطع- غیرخطی (V۴) است و کمترین مقادیر مربوط به منقطع- خطی و پیوسته است. در میکروکانال مستقیم نیز، افت فشار در حالت‌های مختلف همانند V شکل است. با این تفاوت که حالت پیوسته و منقطع- پیوسته افت فشاری نزدیک به هم را ارائه می‌دهند. در محدوده عدد رینولدز بررسی شده کمترین افت فشار مربوط به حالت مستقیم منقطع- خطی است که این با پژوهش‌های آزمایشگاهی از جمله خوشوقت و همکاران [۲۳] سازگاری دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، این حالت از چیدمان پین‌ها دارای حداقل اثرات مسدود کنندگی مسیر جریان است، به طوری که سیال خنک‌کننده به آسانی در میان پین‌ها حرکت می‌کند.

می‌دهد (ناحیه ۲). با توجه به این اختلاف فشار، جریان‌های چرخشی و گردابه تولید می‌شود (ناحیه ۳). همچنین می‌توان مشاهده نمود که جریان سیال پس از برخورد با پین تغییر جهت می‌دهد. قسمت اصلی سیال با پین برخورد می‌کند، چرخش ۹۰ درجه‌ای دارد و سپس به دو شکاف کناری پین حرکت می‌کند (ناحیه ۴). با توجه به عرض کوچک شکاف‌ها، لایه مرزی حرارتی نزدیک به دیواره سمت راست و چپ باریک می‌شود (ناحیه ۵). هنگامی که سیال وارد ناحیه پشت پین می‌شود، به علت افزایش ناگهانی سطح عبور جریان، سرعت جریان به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و به طور همزمان مولفه‌های عرضی سرعت تولید می‌شوند (ناحیه ۶). متعاقباً، یک جریان چرخشی در پشت پین-فین‌ها تولید می‌شود (ناحیه ۷). همان‌طور که در کانتور دما نشان داده شده است، جریان درهم و چرخشی سبب اختلاط سیال می‌شود و لایه مرزی حرارتی را قطع می‌کند که سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

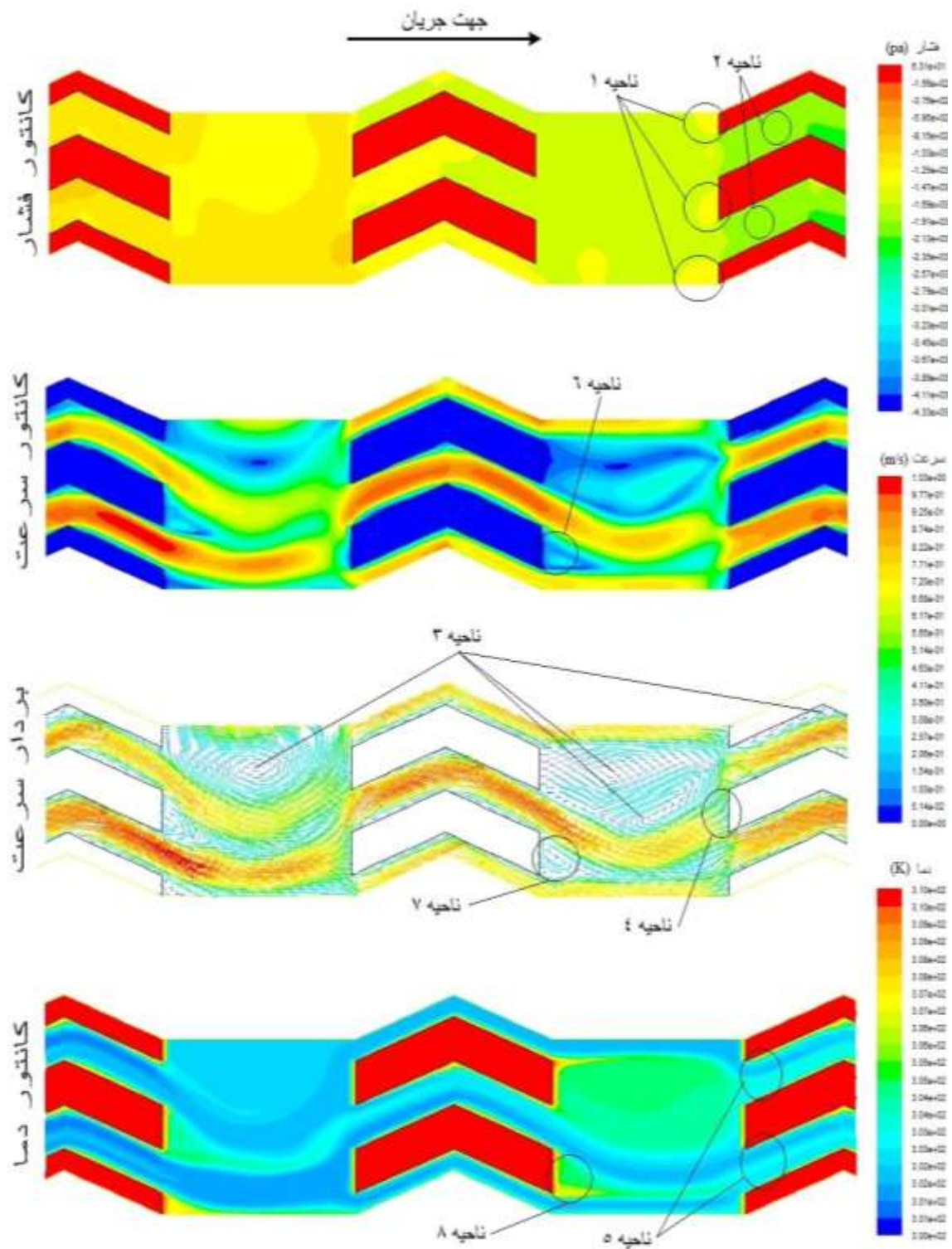
شکل ۹ افزایش عدد ناسلت را در چاه‌های حرارتی میکروکانال منقطع شده نسبت به حالت مستقیم پیوسته (حالت پایه) نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، اثرات انقطاع پین-فین‌ها بر عملکرد حرارتی هر دو نوع میکروکانال مستقیم و V شکل روشن است. در میکروکانال V شکل، حالت منقطع غیرخطی (V۴)، بیشترین افزایش عدد ناسلت نسبت به حالت پایه در تمامی مقادیر عدد رینولدز را دارا



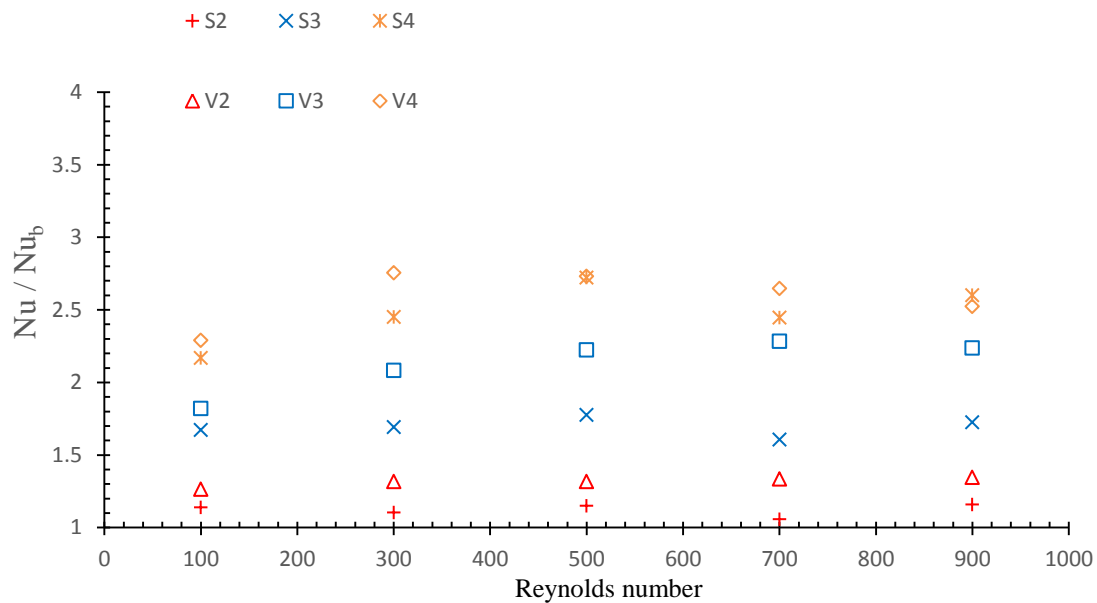
شکل ۶- اثر انقطاع پین-فین‌ها روی ضریب انتقال حرارت چاه‌های حرارتی میکروکانال مستقیم و V شکل



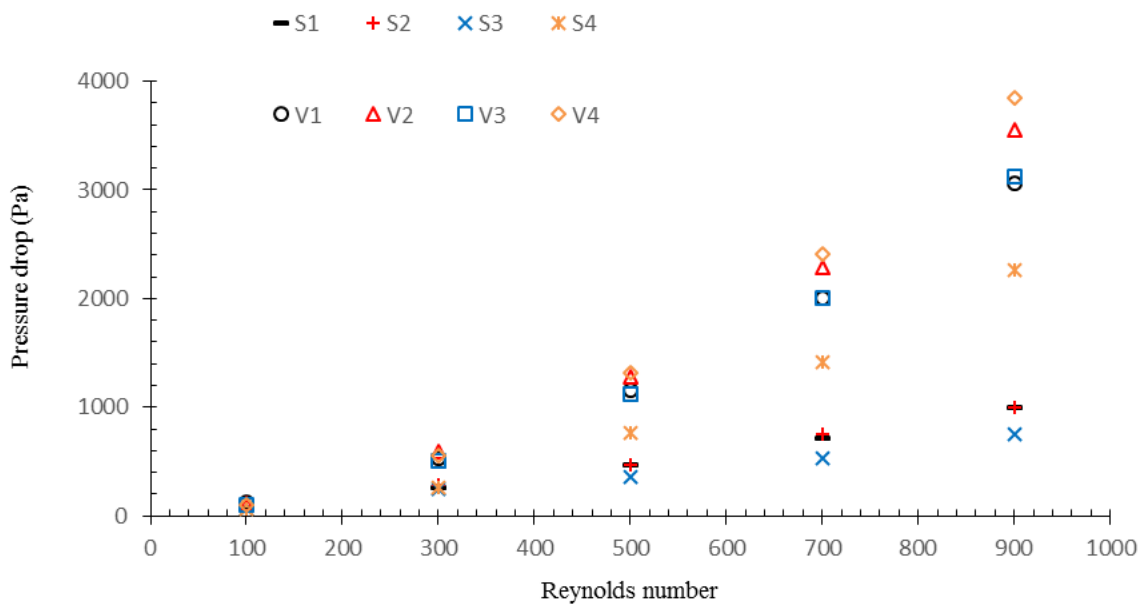
شکل ۷- کانتورهای دما و بردارهای سرعت در مجاورت پین-فین‌های منقطع در میکروکانال‌های مستقیم و V شکل در کمترین (سمت چپ) و بیشترین (سمت راست) مقادیر رینولدز



شکل ۸- کانتورهای دما، سرعت و فشار در حالت بزرگنمایی شده در میکروکانال V شکل منقطع-غیرخطی (V۴) در عدد رینولدز ۹۰۰



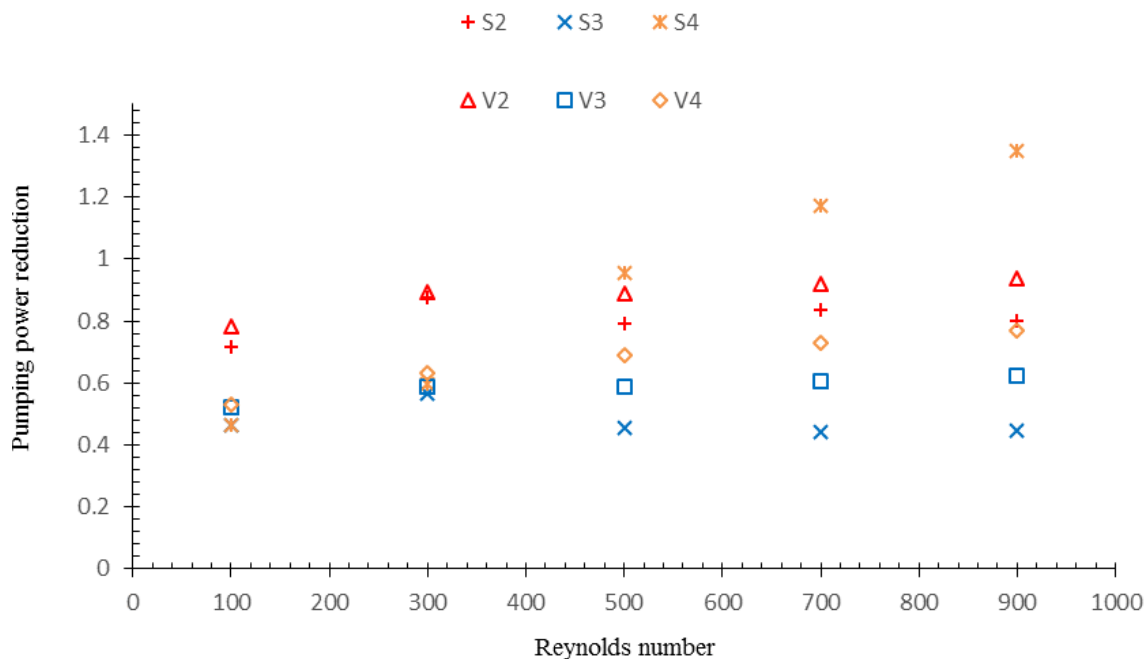
شکل ۹- افزایش عدد ناسلت در چاه‌های حرارتی میکروکانال منقطع شده نسبت به حالت پایه



شکل ۱۰- اثر انقطاع پین-فین‌ها بر افت فشار چاه‌های حرارتی میکروکانال مستقیم و V شکل

کاهش ۵۰٪ توان پمپ نسبت به حالت پایه (پیوسته) می‌شود. در همین حالت برای میکروکانال V شکل منجر به کاهش ۴۰٪ توان مصرفی در پمپ نسبت به حالت پایه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، استفاده از انقطاع پین‌ها به جای حالت پیوسته در هر دو میکروکانال مستقیم و V شکل سبب کاهش توان پمپ شده است. به عنوان مثال در شرایط عملیاتی یکسان، استفاده از حالت منقطع-خطی در میکروکانال مستقیم به طور تقریبی سبب



شکل ۱۱- کاهش توان پمپ میکروکانال های منقطع نسبت به حالت پایه (پیوسته)

نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود، ضریب عملکرد میکروکانال‌های منقطع، حدود ۱/۲ تا ۱/۸ برابر میکروکانال‌های پیوسته است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از بین‌های منقطع در چاه‌های حرارتی میکروکانال، سبب بهبود مصرف انرژی و افزایش اثربخشی در حذف حرارت می‌شوند. در میان میکروکانال‌های منقطع، میکروکانال پیوسته-منقطع V شکل کمترین مقادیر ضریب عملکرد را در محدوده اعداد رینولدز بررسی شده نشان می‌دهد و بالاترین مقادیر ضریب عملکرد برای میکروکانال منقطع-غیرخطی V شکل به دست آمده است. در محدوده مطالعاتی عدد رینولدز، به طور متوسط، ۰/۲۴/۳۸، ۰/۲۷/۳۷ و ۰/۵۳/۶۸ بهبود ضریب عملکرد به ترتیب برای حالت‌های پیوسته-منقطع، منقطع-خطی و منقطع-غیرخطی در میکروکانال مستقیم در مقایسه با حالت پایه (پیوسته) بدست آمده است. این مقادیر برای حالت‌های ذکر شده، برای میکروکانال V شکل به ترتیب برابر ۰/۲/۶۳، ۰/۳۱/۲۷ و ۰/۵۸ است. براساس ارزیابی‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که انقطاع بین-فین‌ها اثرات بیشتری بر عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه حرارتی میکروکانال V شکل دارند.

در بررسی اثربخشی میکروکانال‌ها، با توجه به عملکرد حرارتی و هیدرولیکی میکروکانال، ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی تعریف می‌شود که اثربخشی چاه‌های حرارتی میکروکانال منقطع شده را نسبت به حالت پیوسته ارزیابی می‌کند. ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی طبق معادله (۱۳) تعریف می‌شود [۲۲].

$$\eta = \frac{Nu_{\text{منقطع}} / Nu_{\text{پیوسته}}}{(f_{\text{منقطع}} / f_{\text{پیوسته}})^{\frac{1}{3}}} \quad (13)$$

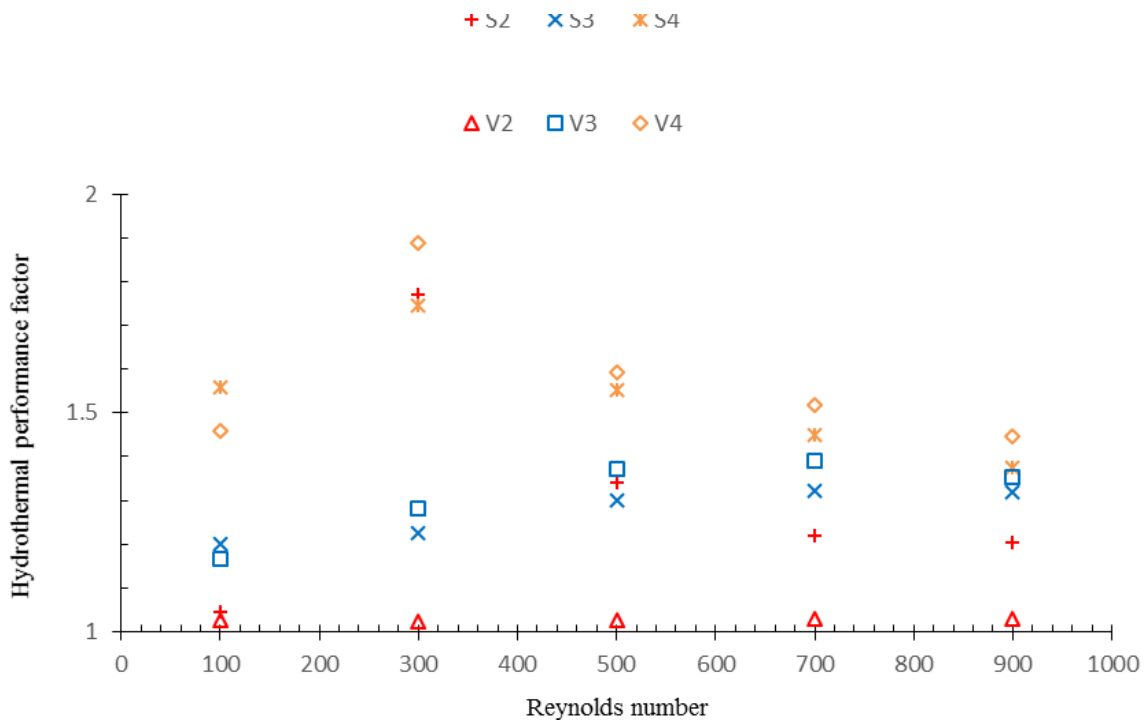
در معادله فوق  $Nu$ ، عدد ناسلت و  $f$  ضریب اصطکاک است، که از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{2\rho\Delta p d_h}{LG^2} \quad (14)$$

که در معادله فوق،  $\rho$  دانسیته،  $L$  طول میکروکانال،  $G$  سرعت جرمی می‌باشد.  $\Delta p$  افت فشار است که از معادله (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (15)$$

شکل ۱۲ ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال منقطع شده مختلف را در مقایسه با حالت پیوسته در هردو میکروکانال مستقیم و V شکل بر حسب تابعی از عدد رینولدز نشان می‌دهد. همان طور که در



شکل ۱۲- ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال منقطع شده

مقادیر افت فشار، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. خواص آب و نانوذرات در دمای ۳۰۰ کلوین در جدول ۳ ارائه شده است. نانوذرات در غلظت‌های ۱٪ و ۴٪ حجمی در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن خواص حرارتی و فیزیکی نانوسیال در غلظت‌های فوق از معادلات (۱۶) تا (۱۹) استفاده شده است که  $\phi$  در این معادلات غلظت نانوذرات در سیال پایه است. [۲۷].

### ۵-۳- اثر نانوسیال

طی سال‌های گذشته بررسی اثر نانوسیال آلومینا بر روی خواص سیستم‌های انتقال حرارت بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۲۵ و ۲۶]. در این مطالعه نیز پس از بررسی‌های انجام شده روی هندسه‌های مختلف و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی آنها و انتخاب هندسه موثر، با تغییر سیال کاری، اثرات نانوسیال آب/ $Al_2O_3$  روی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال انتخاب شده، بررسی شد. میکروکانال مورد بررسی در این بخش براساس بیشترین ضریب عملکرد انتخاب شده و با تغییر سیال کاری در آن

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (۱۶) \text{ دانسیته}$$

$$(\rho cp)_{nf} = (1 - \phi)(\rho cp)_{bf} + \phi(\rho cp)_p \quad (۱۷) \text{ ظرفیت گرمایی ویژه}$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (123\phi^2 + 7/3\phi + 1) \quad (۱۸) \text{ ویسکوزیته}$$

$$k_{nf} = K_{bf} (4/97\phi^2 + 2/72\phi + 1) \quad (۱۹) \text{ ضریب هدایت حرارتی}$$

شکل ۱۳ تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار را برای میکروکانال V شکل منقطع-غیرخطی در غلظت‌های

خواص نانوسیال در غلظت‌های ذکر شده در جدول ۴ ارائه شده است.

است. افت فشار نیز، به دلیل حضور نانوذرات جامد در سیال پایه سبب افزایش ویسکوزیته نسبت به سیال پایه می‌شود. چون ویسکوزیته رابطه مستقیمی با افت فشار دارد، با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

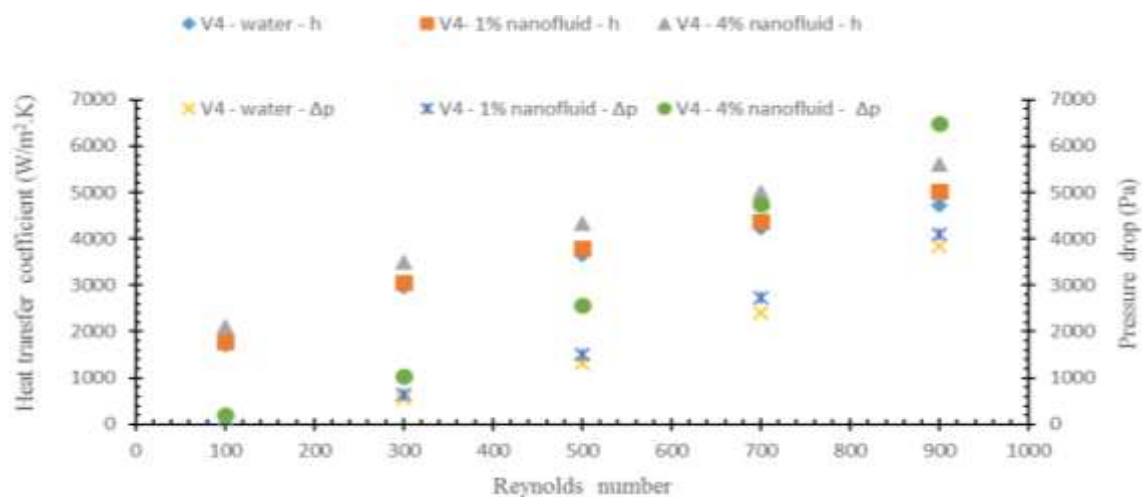
مختلف نانوذرات  $Al_2O_3$  بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات به دلیل مشارکت نانوذرات در بهبود هدایت حرارتی نانوسیال

جدول ۳- خواص آب و نانوذرات  $Al_2O_3$  [۲۷]

ماده	دانسیته ( $kg/m^3$ )	ویسکوزیته ( $kg/m s$ )	ظرفیت گرمایی ویژه ( $j/kg K$ )	ضریب هدایت حرارتی ( $w/m K$ )
آب	۹۹۸/۲	$998 \times 10^{-6}$	۴۱۸۲	۰/۵۹۷
$Al_2O_3$	۳۸۸۰	-	۷۷۳	۳۶

جدول ۴- خواص نانوسیال در غلظت‌های مختلف [۲۳]

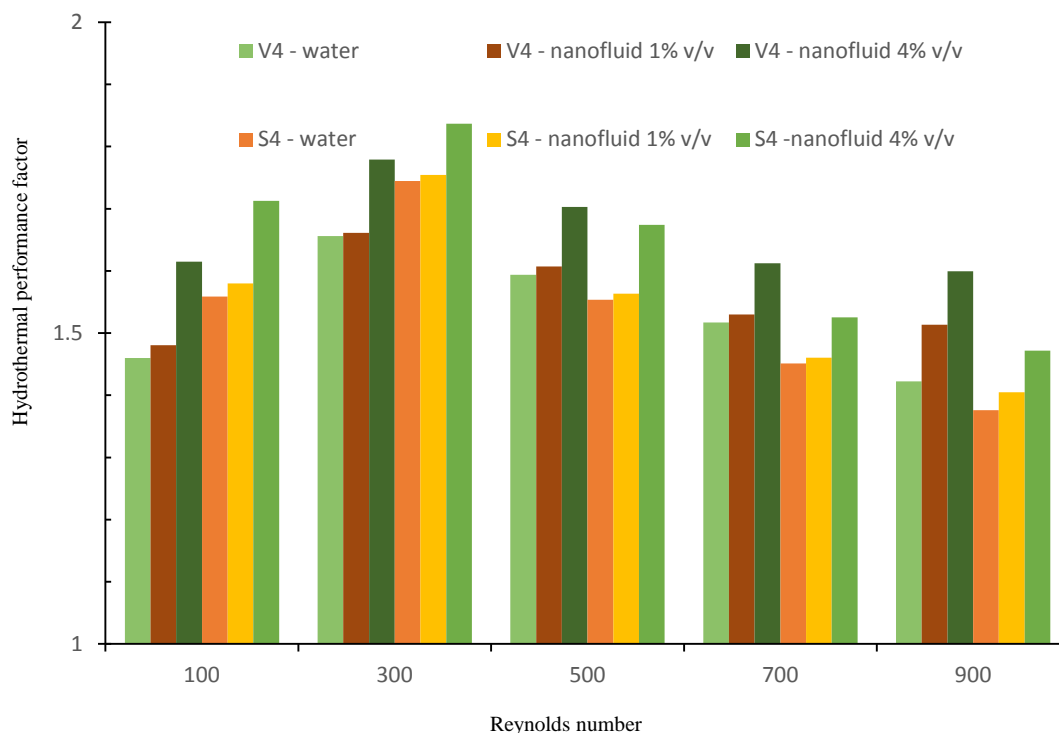
غلظت	دانسیته ( $kg/m^3$ )	ویسکوزیته ( $kg/m s$ )	ظرفیت گرمایی ویژه ( $j/kg K$ )	ضریب هدایت حرارتی ( $w/m K$ )
۰	۹۹۸/۲	$998 \times 10^{-6}$	۴۱۸۲	۰/۵۹۷
۰/۰۱	۱۰۲۷	$1083 \times 10^{-6}$	۴۰۵۳	۰/۶۱۴
۰/۰۴	۱۱۱۳	$1486 \times 10^{-6}$	۳۷۰۷	۰/۶۶۷



شکل ۱۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار برای میکروکانال V شکل منقطع- غیرخطی در غلظت‌های مختلف نانوذرات  $Al_2O_3$

شده است. بیشترین مقادیر ضریب عملکرد،  $1/83$  و  $1/77$  در  $4\%$  نانوسیال به ترتیب برای میکروکانال‌های مستقیم-منقطع-غیرخطی ( $S_4$ ) و V شکل منقطع-غیرخطی ( $V_4$ ) بدست آمده است؛ همچنین می‌توان دریافت که در رینولدزهای پایین‌تر با استفاده از نانوسیال، ضریب عملکرد  $S_4$  بیشتر از  $V_4$  افزایش یافته است و در رینولدزهای بالاتر عکس این عمل اتفاق افتاده است.

شکل ۱۴ اثر نانوسیال  $Al_2O_3$ /آب را بر ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال‌های مستقیم و V شکل منقطع-غیرخطی نشان می‌دهد. در این شکل حالت مبنای حالت پیوسته هر میکروکانال با سیال کاری آب است که محور افقی مربوط به این حالت است (دارای ضریب عملکرد ۱ می‌باشد). با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که در محدوده عدد رینولدز مطالعاتی، استفاده از نانوسیال سبب افزایش ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در هر دو حالت



شکل ۱۴- اثر نانوسیال  $Al_2O_3$ /آب بر ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال‌های مستقیم و V شکل منقطع-غیرخطی

پین-فین‌ها می‌تواند سبب تولید جریان‌های چرخشی و اختلاط بالک سیال و سیال روی دیواره گردد که دمایی بالاتری دارد. این امر منجر به توزیع دمایی یکنواخت‌تر در میکروکانال می‌شود و ضرایب انتقال حرارت بالاتری را ارائه می‌دهند؛ همچنین بررسی‌ها نشان داد که پین-فین‌های V شکل ضرایب انتقال حرارت بالاتری دارند و مقادیر بهبود عدد ناسلت در آنها نسبت به پین-فین‌های مستقیم بیشتر است. از میان حالت‌های مختلف، حالت منقطع غیرخطی برای هر دو

#### ۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثرات انقطاع پین-فین‌ها در حالت‌های مختلف روی ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال‌های مستقیم و V شکل، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که انقطاع پین-فین‌ها سبب بهبود عملکرد هیدرولیکی-حرارتی میکروکانال می‌شوند. براساس شبیه‌سازی انجام شده و کانتورهای دما و سرعت بدست آمده، انقطاع



- enhancement. Chem Eng Process Process Intens 72: 103-112.
- [11] Hasan MI (2014) Investigation of flow and heat transfer characteristics in micro pin fin heat sink with Nanofluid. Appl Therm Eng 63(2): 598-607.
- [12] Zhai YL, Xia GD, Liu XF, Li YF (2015) Heat transfer enhancement of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids flowing through a micro heat sink with complex structure. Int Commun Heat Mass 66: 158-166.
- [13] Sakanova A, Keian CC, Zhao J (2015) Performance improvements of microchannel heat sink using wavy channel and nanofluids. Int J Heat Mass Tran 89: 59-74.
- [14] Duangthongsuk W, Wongwises S (2015) An experimental study on the thermal and hydraulic performances of nanofluids flow in a miniature circular pin fin heat sink. Exp Therm Fluid Sci 66: 28-35.
- [15] Duangthongsuk W, Wongwises S (2015) A comparison of the heat transfer performance and pressure drop of nanofluid-cooled heat sinks with different miniature pin fin configurations. Exp Therm Fluid Sci 69: 111-118.
- [16] Ghale ZY, Haghshenasfard M, Esfahany MN (2015) Investigation of nanofluids heat transfer in a ribbed microchannel heat sink using single-phase and multiphase CFD models. Int Commun Heat Mass 68: 122-129.
- [17] Ahmed HE, Ahmed MI, Seder IMF, Salman BH (2016) Experimental investigation for sequential triangular double-layered microchannel heat sink with nanofluids. Int Commun Heat Mass 77: 104-115.
- [18] Khoshvaght-Aliabadi M, Sahamiyan M (2016) Performance of nanofluid flow in corrugated minichannels heat sink (CMCHS). Energy Convers Manage 108: 297-308.
- [19] Ali HM, Arshad W (2017) Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based graphene nanoplatelets nanofluids. Int J Heat Mass Tran 106: 465-472.
- [20] Naqiuddin NH, Saw LH (2018) Overview of micro-channel design for high heat flux application. Renew Sust Energ Rev 82: 901-914.
- [21] Khoshvaght-Aliabadi M, Hassani SM, Mazloumi SH (2017) Effects of nooks configuration on hydrothermal performance of zigzag channels for nanofluid cooled microelectronic heat sink. Microelectron Reliab 79: 153-165.
- [22] Khoshvaght-Aliabadi M, Hassani SM, Mazloumi SH (2017) Performance enhancement of straight and wavy miniature heat sink using pin fin interruptions and nanofluids, Chem. Eng & Processing; Process Intens 122: 90-108.
- هندسه کلی دارای بالاترین ضریب عملکرد هیدرولیکی- حرارتی است که تقریباً ۱/۵ برابر حالت پایه است. سپس با تغییر سیال کاری با نانوسیال آب/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، اثرات آن مورد بررسی قرار گرفت. نانوسیال باعث افزایش ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی تا ۱/۸۳ برابر برای هندسه مستقیم منقطع غیرخطی و ۱/۷۷ برابر برای هندسه V شکل منقطع غیرخطی نسبت به حالت پایه گردید.

#### ۷- منابع

- [1] Tuckerman DB, Pease RF (1981) High performance heat sinking for VLSI. IEEE Electron Device Lett 15(5): 126-130.
- [2] Jajja SA, Ali W, Ali HM, Ali AM (2014) Water cooled minichannel heat sinks for microprocessor cooling: effect of fin spacing. Appl Therm Eng 64(1-2): 76-82.
- [3] Jajja SA, Ali W, Ali HM (2014) Multiwalled carbon nanotube nanofluid for thermal management of high heat generating computer processor. Heat Transf Asian Res 43(7): 653-666.
- [4] Nitiapiruk P, Mahian O, Dalkilic AS, Wongwises S (2013) Performance characteristics of a microchannel heat sink using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid and different thermophysical models. Int Commun Heat Mass 47: 98-104.
- [5] Arshad W, Ali HM (2017) Graphene nanoplatelets nanofluids thermal and hydrodynamic performance on integral fin heat sink. Int J Heat Mass Tran 107: 995-1001.
- [6] Arshad W, Ali HM (2017) Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a straight minichannel heat sink using TiO<sub>2</sub> nanofluid. Int J Heat Mass Tran 110: 248-256.
- [7] Tafarroj MM, Mahian O, Kasaeian A, Sakamatapan K, Dalkilic AS, Wongwises S (2017) Artificial neural network modeling of nanofluid flow in a microchannel heat sink using experimental data. Int Commun Heat Mass 86: 25-31.
- [8] Seyf HR, Feizbakhshi M (2012) Computational analysis of nanofluid effects on convective heat transfer enhancement of micro-pin-fin heat sinks. Int J Therm Sci 58: 168-179.
- [9] Tokit EM, Mohammed HA, Yusoff MZ (2012) Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids. Int Commun Heat Mass 39(10): 1595-1604.
- [10] Selvakumar P, Suresh S, Salyan S (2013) Investigations of effect of radial flow impeller type swirl generator fitted in an electronic heat sink and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid on heat transfer

- engine oil cooler. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8: 221-223
- [26] Gholami E, Zare V, Mousavi M (2016) Numerical analysis of various nanoparticles size effects on thermal performance of nanofluid in a microchannel heat sink. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6: 275-284
- [27] Manca O, Nardini S, Ricci D (2018) A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels. *Appl Therm Eng* 37: 280-292.
- [23] Hassani SM, Khoshvaght-Aliabadi M, Mazloumi SH (2018) Influence of chaveron fin interruption on thermo fluidic transport characteristics of nanofluid cooled electronic heat sink. *Chem Eng Sci* 191: 436-447.
- [24] Ho CJ, Chen WC (2013) An experimental study on thermal performance of  $Al_2O_3$ /water nanofluid in a minichannel heat sink. *Appl Therm Eng* 50: 516-522.
- [25] Baraty Beni S, Pishkar I, Salimpour MR (2018) Study of the effect of nano fluid in the diesel