

## مطالعه عددی تأثیر نانو سیال بر انتقال حرارت جابجایی جریان آرام و آشفته در لوله‌های مستقیم و U شکل

امیر صدقی نسب  
محمدعلی اشجاری اقدم\*  
موسی محمدپور فرد

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بین المللی جلفا، جلفا، ایران  
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بین المللی جلفا، جلفا، ایران  
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

### چکیده

در این مطالعه بر انتقال حرارت جابجایی آرام و آشفته نانوسیال درون لوله‌های مستقیم و U-شکل بصورت عددی و در حالت قائم مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از اهداف اصلی این مطالعه مقایسه کارایی حرارتی لوله های مستقیم و U-شکل در شرایط مختلف می باشد. نانو سیالات مورد بررسی حاوی سیال پایه آب و نانوذرات آلومینا با ۱ و ۴ درصد کسر حجمی می‌باشند. معادلات حاکم به روش حجم محدود و با استفاده از مدل تکفازی حل شده‌اند. نتایج حاصل بیانگر افزایش انتقال حرارت و افت فشار با استفاده از نانوسیال می‌باشد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انتقال حرارت بهبود بیشتری می‌یابد. دیگر نتیجه مهم این مطالعه بالاتر بودن انتقال حرارت در قسمت خمیده لوله U-شکل نسبت به لوله‌های مستقیم قسمت ورودی و قسمت خروجی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت جابجایی، نانو سیال، جریان آرام و آشفته، لوله U-شکل و مستقیم.

## Numerical Study of the Effect of Nanofluid on the Rate of Convective Heat Transfer in Laminar and Turbulent Flow Regime Inside the Straight Pipe and the U-bend

**A. SedghiNasab** Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Jolfa International Branch, Aras Free trade & Industrial zone, Jolfa, Iran  
**M. A. AshjariAghdam** Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Jolfa International Branch, Aras Free trade & Industrial zone, Jolfa, Iran  
**M. MohammadpourFard** Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

### Abstract

In this paper, convective heat transfer of nanofluids in vertical straight and U-bend tubes have been studied numerically in both laminar and turbulent flow conditions. One of the main goals of this study is a comparison of heat transfer efficiency between straight and U-bend tubes in various conditions. Governing equations have been discretized and solved based on the control volume technique and using single-phase model. The obtained results indicate an enhancement of heat transfer and pressure drop with using nanofluids as working fluids and the heat transfer enhancement increases with an increase in nanoparticles volume fraction. The other most important result of this study is higher heat transfer in U-bend with respect to inlet and outlet straight tubes.

**Keywords:** Convective heat transfer, Nanofluid, Laminar flow, Turbulent flow, U-bend, Straight pipe.

رسوب، سائیدگی جداره لوله‌ها و تجهیزات، خوردگی و تخریب اتصال‌ها، شیرها و پره پمپ‌ها را در پی داشت.

چوی [۲] اولین کسی بود که ایده نانوسیال را مطرح نمود. این سیالات جدید از مخلوط کردن ذرات جامد با ابعاد نانومتر در سیال پایه بدست می‌آید.

چندین راه برای تهیه نانوسیالات وجود دارد که برای به دست آوردن سوسپانسیون پایدار و با توزیع یکنواخت برخی از فعال کننده‌ها یا پراکنده‌سازهای کمکی نیز لازم می‌باشد. این ذرات بسیار ریز می‌توانند فلزی یا غیرفلزی باشند. به طور کلی نانو سیالاتی که به هدف افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شوند، در عملکرد انتقال حرارتی نانوسیال از سیال پایه‌اش به مراتب بیشتر و برتر است. زیرا ذرات معلق بسیار ریز به طور قابل توجهی هدایت حرارتی مخلوط را افزایش می‌دهند و باعث بهبود قابلیت انتقال انرژی آنها می‌شوند.

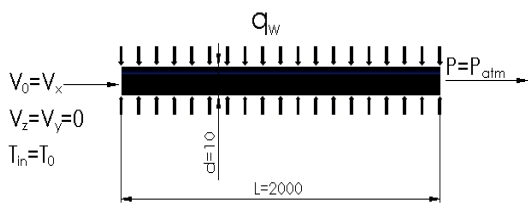
پاک و چوی [۴] اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۹۸ انتقال حرارت جابجایی نانوسیال را داخل یک لوله بررسی کردند و نتایج

### ۱- مقدمه

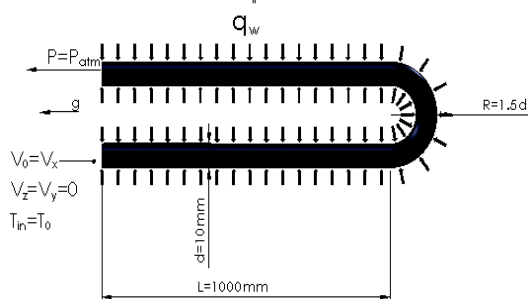
با توسعه سریع فن آوری در صنایع مختلف، افزایش انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، افزایش بهره‌وری انرژی و راندمان دستگاههای سوختی یک نیاز ضروری می‌باشد. روش‌های معمول برای افزایش انتقال حرارت گرما، (۱) افزایش سطوح، (۲) افزایش سرعت جریان، یا (۳) اضافه کردن جامد به سیال پایه می‌باشد. با توجه به اینکه افزایش سطح دارای محدودیت فضایی است و اجرایی کردن آن آسان نیست و از طرف دیگر اکثراً صرفه اقتصادی ندارد، و افزایش سرعت جریان در همه جا مقدور نیست به همین دلیل محققان به ایده جدیدی به نام نانوسیال روی آوردند.

افزودن ذرات جامد به مایع جهت بهبود انتقال حرارت، روشی بود که صد سال قبل ماکسول از آن استفاده کرد [۱]. قبل از تولید نانو ذرات از ذرات با اندازه میکرومتر و حتی میلی‌متر استفاده شده است که به علت درشتی ذرات علاوه بر راندمان حرارتی پایین مشکلاتی همچون

سرعت یکنواخت  $V_0$  در جهت جریان و دمای یکنواخت  $T_0$  می‌باشد. همچنین در دیواره شرط مرزی شار حرارتی یکنواخت اعمال شده است. در خروجی لوله، فشار برابر فشار محیط ( $p_{atm}$ ) در نظر گرفته شده است که این شرایط در جریان آرام و متلاطم یکسان هستند. به دلیل تقارن در وسط لوله از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. لازم به ذکر است که کلیه شرایط مرزی ذکر شده برای لوله U-شکل نیز به طریق مشابه به کار برده شده است [۹ و ۱۰]. در شکل ۱ و ۲ ابعاد و شرایط مرزی بررسی شده نشان داده شده است.



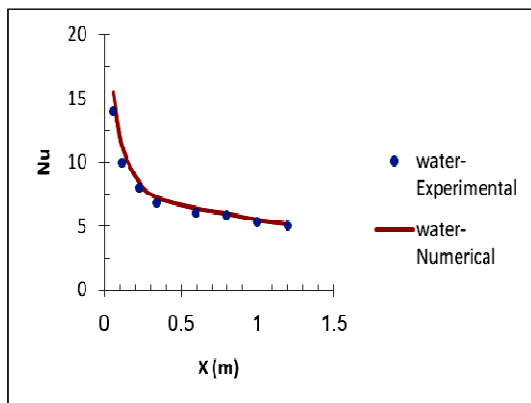
شکل ۱- نمایی از لوله مستقیم با شرایط مرزی



شکل ۲- نمایی از لوله U-شکل با شرایط مرزی

### ۳- اعتبار سنجی

مقاله تجربی حاصل از کار کیم و همکاران [۶] به عنوان مقاله مرجع انتخاب شده است. در این بررسی جریان آرام و آشفته نانو سیال در یک لوله به طور تجربی بررسی شده است. که با افزودن ۳٪ ذرات نانو آلومینا افزایش ۱۵٪ انتقال حرارت در جریان آرام و افزایش ۲۰٪ در حالت آشفته برای انتقال حرارت را مشاهده کردند. برای جریان آرام آب خالص، تغییر عدد نوسلت با فاصله محوری با نتایج موجود در مقاله مقایسه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه نتایج بررسی عددی با نتایج آزمایشگاهی برای جریان آرام آب در لوله ( $Re=1600$ )

تجربی را برای ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان آشفته یک نانوسیال به دست آوردند. آنها اولین رابطه تجربی را برای عدد ناسلت با استفاده از ترکیب آب و نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم ارائه دادند. نتایج آنها نشانگر افزایش قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت سیال با نانو ذرات در رینولدزهای یکسان است. به عنوان مثال از نانو ذرات ۱۳ نانومتری اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۱/۳۴ درصد، افزایش حدود ۲۷ درصدی برای عدد ناسلت به دست آوردند. مطالعه ای که توسط چوی و همکاران [۵] روی انتقال گرمای جابجایی نانوسیال در جریان مغشوش انجام شده است نشان داد که میزان انتقال گرمای نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش قابل ملاحظه ای دارد. اخیراً کیم و همکاران [۶]، انتقال حرارت جابجایی اجباری دو نوع نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-کربن را در رژیم آرام و آشفته تحت شار حرارتی یکنواخت دیواره داخل یک لوله ای افقی مستقیم بررسی کرده‌اند. آنها با افزایش ۳ درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم، افزایش ۸ درصدی در رسانش گرمایی سیال پایه و ۲۰ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت مشاهده کردند.

چوی و همکارانش [۷] در یک بررسی عددی بر روی یک لوله خمیده، در حالت آرام اکسید آلومینا با نانو ذرات انجام دادند به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز افزایش می‌یابد. در ادامه کار نیز مقایسه ای بین لوله خمیده و لوله مستقیم و یک کانال مربع شکل را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان انتقال حرارت جابجایی حدود ۱۰٪ در حالت کلی در لوله خمیده از لوله مستقیم و کانال مربع شکل بیشتر می‌باشد. در مطالعه حاضر جریان و انتقال حرارت نانوسیالات با سیال پایه آب و دو کسر حجمی مختلف نانو ذرات درون لوله های مستقیم و U-شکل بررسی شده است. برای این منظور از مدل تکفازی و از نرم افزار ANSYS FLUENT 14 استفاده شده است. و همچنین جریان سیال به دو صورت آرام و آشفته در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در حالت آشفته از مدل k-ε استاندارد به همراه قانون دیواره دو ناحیه ای استفاده شده است، و الگوریتم بکار رفته در این مقاله SIMPLEC می‌باشد.

### ۲- معادلات حاکم

با بررسی های مختلف ثابت شده است که معادلات کلاسیک مکانیک سیالات برای نانوسیالات نیز صادق هستند [۸، ۹ و ۱۰]. این معادلات برای جریان نانوسیال در یک مجرا (در اینجا لوله) شامل معادلات ناویه-استوکس و انتقال گرما است.

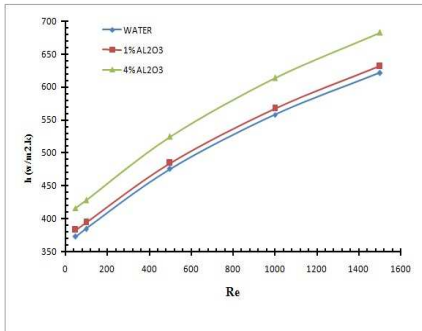
در این مقاله از مدل تک فازی برای بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال داخل لوله استفاده شده است. با استفاده از این مدل فرض می‌شود که نانو ذرات و سیال پایه در تعادل هیدرو دینامیکی و گرمایی بوده و هیچگونه سرعت لغزشی بین این دو فاز وجود ندارد [۹، ۱۰ و ۱۱].

### ۱-۲- شرایط مرزی

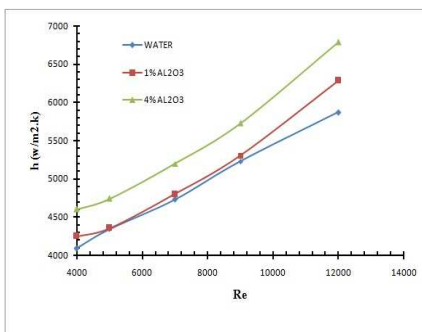
معادلات حاکم برای حل نیاز به شرایط مرزی مناسب دارند. در جریان نانوسیال گذرنده از داخل لوله ها شرایط مرزی در ورودی،

#### ۱-۴- ضریب انتقال حرارت

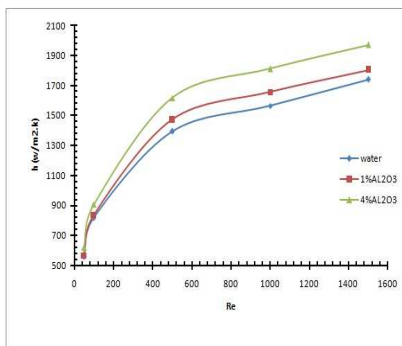
در شکل‌های ۶ تا ۱۳ ضریب انتقال حرارت ارائه و بحث شده است.



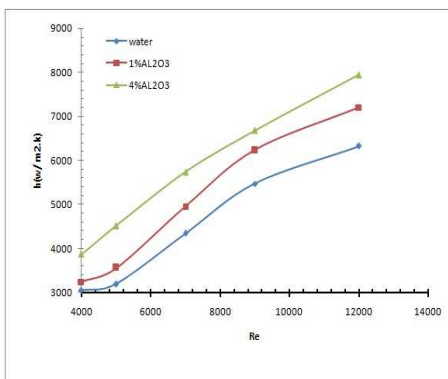
شکل ۶- ضریب انتقال حرارت در لوله مستقیم- جریان آرام



شکل ۷- ضریب انتقال حرارت در لوله مستقیم-جریان آشفته



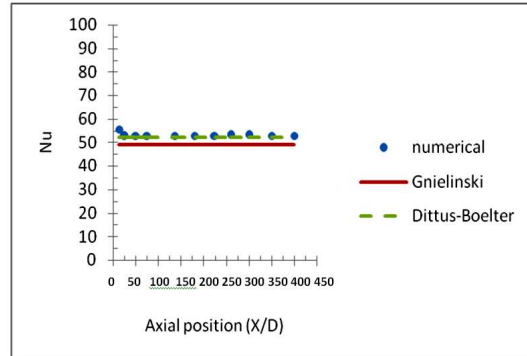
شکل ۸- ضریب انتقال حرارت لوله U-شکل در زانویی-جریان آرام



شکل ۹- ضریب انتقال حرارت لوله U شکل در زانویی-جریان آشفته

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نتایج عددی با دقت نسبتاً بالایی از نتایج تجربی تبعیت می‌کنند.

برای جریان آشفته در لوله نیز نتایج حاصل از تحلیل عددی انجام شده در این مقاله برای عدد نوسلت با رابطه معروف دیتیوس- بولتر و کیلینسکی [۱۲] با فاصله محوری مقایسه شده و در شکل ۴ نشان داده شده است.

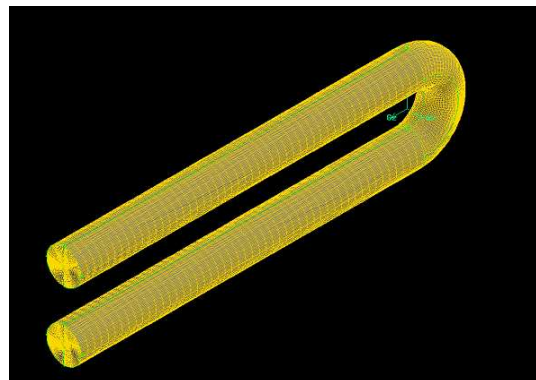


شکل ۴- مقایسه نتایج بررسی عددی با روابط تجربی موجود برای جریان آشفته آب در لوله (Re=6000)

#### ۴- نتایج و بحث

بررسی‌های انجام شده برای لوله مستقیم و لوله U-شکل در جریان آرام با رینولدزهای (۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰، ۵۰) و در جریان آشفته با رینولدزهای (۹۰۰۰، ۷۰۰۰، ۵۰۰۰، ۴۰۰۰) و (۱۲۰۰۰) و بصورت قائم با اعمال شار حرارتی  $2000 \text{ W/cm}^2$  به صورت یکنواخت در هندسه زیر انجام گرفته است. جهت حصول اطمینان از صحت نتایج، ابتداء استقلال شبکه از تعداد گره‌ها بررسی گردید.

بدین منظور چند نوع شبکه بندی مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت مشاهده شد که نتایج حاصل از شبکه‌ی  $10 \times 16 \times 1063$  به ترتیب در راستای شعاعی، محیطی، محوری، مستقل از افزایش تعداد گره‌ها می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از هندسه بررسی شده را مشاهده می‌شود که نیروی گرانشی در خلاف جهت محور Xها اعمال شده است.



شکل ۵- نمایی از هندسه بررسی شده که در نرم افزار گمبیت رسم و شبکه بندی شده

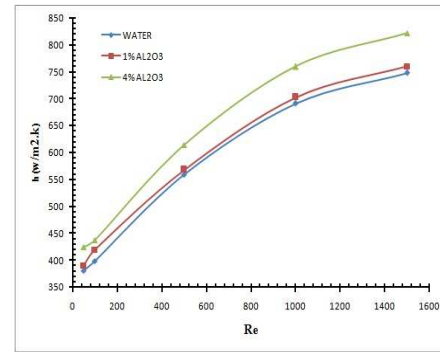
افزایش ۱۲/۵۵ درصدی در جریان آشفته مشاهده می شود. همچنین در قسمت زانویی با افزودن ۱ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۲/۶۴ درصدی در جریان آرام و افزایش ۳/۶۸ درصدی در جریان آشفته مشاهده می شود، همچنین با افزودن ۴ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۱۲/۱ درصدی در جریان آرام و افزایش ۱۷ درصدی در جریان آشفته انتظار می رود.

در قسمت خروجی لوله U-شکل با افزودن ۱ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۲/۵ درصدی در جریان آرام و افزایش ۵/۹ درصدی در جریان آشفته وجود خواهد داشت، افزودن ۴ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۱۱/۵۳ درصدی در جریان آرام و افزایش ۱۲/۷ درصدی در جریان آشفته خواهد داشت.

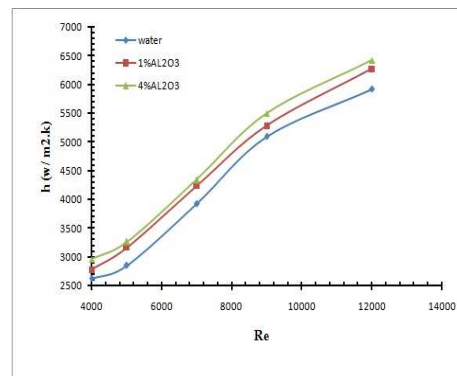
در قسمت ورودی لوله U-شکل با افزودن ۱ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۲/۲ درصدی در جریان آرام و افزایش ۳/۸ درصدی در جریان آشفته به دست می آید، همچنین با افزودن ۴ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۳/۹ درصدی در جریان آرام و افزایش ۴/۱۱ درصدی در جریان آشفته حاصل می گردد.

## ۵- نتیجه گیری

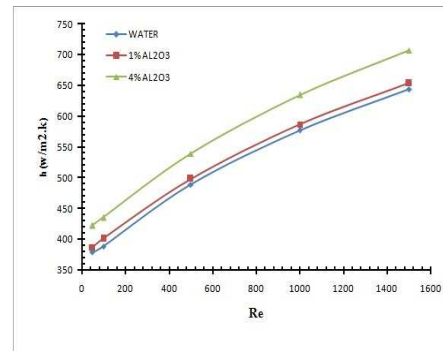
جریان نانوسیال شامل سیال پایه آب و ذرات اکسید آلومینا در درون لوله های مستقیم و U-شکل در حالت قائم و مدل تک فازی بصورت عددی شبیه سازی شدند. یعنی با اعمال اثر گرانشی تاثیر چندانی در نتایج بدست آمده به وجود نمی آید. نتایج نشان می دهد در لوله مستقیم با افزودن کسر حجمی یکسان نانو ذرات نرخ انتقال حرارت در جریان آشفته نسبت به جریان آرام افزایش بیشتری دارد و همچنین افت فشار در این حالت نسبتا کم است. در لوله های U-شکل با افزودن کسر حجمی نانو ذرات میزان افزایش انتقال حرارت همین روند را دارد، با این تفاوت که در قسمت زانویی بیشترین نرخ افزایش انتقال حرارت را نسبت به قسمت ورودی و قسمت خروجی به دست می آید، در این حالت انتقال حرارت نسبت به قسمت ورودی ۳۷ درصد بیشتر و نسبت به قسمت خروجی ۲۷ درصد افزایش از خود نشان می دهد. عوامل زیادی در افزایش انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات دخیل می باشد، با افزودن نانوذرات ضریب رسانش نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش می یابد که این امر منجر به افزایش انتقال حرارت می شود. با توجه به نتایج به دست آمده، افت فشار لوله U شکل در مقایسه با لوله های مستقیم افزایش چندانی نداشته در حالی که انتقال حرارت جابجایی آن به صورت چشمگیری بیشتر از لوله های مستقیم است. بنابراین در مواردی از صنعت که قدرت پمپاژ محدودیتی نداشته باشد می توان برای رسیدن به انتقال حرارت بیشتر از لوله های U-شکل استفاده کرد. در جداول ۱ تا ۳ تمامی نتایج با هم مقایسه شده اند.



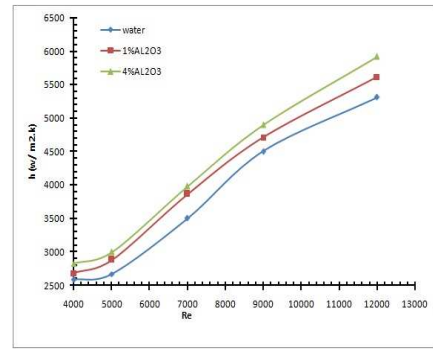
شکل ۱۰- ضریب انتقال حرارت لوله U شکل در خروجی-جریان آرام



شکل ۱۱- ضریب انتقال حرارت لوله U شکل در خروجی-جریان آشفته



شکل ۱۲- ضریب انتقال حرارت لوله U شکل در ورودی-جریان آرام



شکل ۱۳- ضریب انتقال حرارت لوله U-شکل در ورودی-جریان آشفته

با توجه به دو نمودار فوق متوجه می شویم که با افزودن ۱ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۲/۶۴ درصدی در جریان آرام و افزایش ۳/۶۸ درصدی در جریان آشفته داریم، همچنین با افزودن ۴ درصدی اکسید آلومینیوم افزایش ۵/۱۱ درصدی در جریان آرام و

جدول شماره ۱- مقایسه افزایش انتقال حرارت با در صدهای کسر

حجمی در لوله مستقیم

لوله مستقیم	درصد حجمی ۱	درصد حجمی ۴
جریان آرام	۲/۶۴	۵۸/۱۱
جریان آشفته	۳/۶۸	۱۲/۵۵

جدول شماره ۲- مقایسه افزایش انتقال حرارت با کسر حجمی در لوله

U-شکل

لوله U شکل		ورودی لوله	خروجی لوله	زانویی
کسر حجمی ۱	جریان آرام	۲/۲	۲/۵	۳/۴
	جریان آشفته	۳/۸	۵/۹	۶/۳۸
کسر حجمی ۴	جریان آرام	۹/۳	۱۱/۵۳	۱۲/۱
	جریان آشفته	۱۱/۴	۱۲/۷	۱۷/۱

۶- مراجع

- [1] Maxwell J. C., A treatise on electricity and magnetism Vol. 1: Clarendon Press, 1881.
- [2] Choi, S.U.S, whang. Z.G.Yu, W, Lock wood, F,E,Grulke, E.A. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube Suspension, Appl, phys. Lett, Vol, 79: 2252-2254.
- [3] N. Karthikeyan, J. Philip, and B. Raj, "Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids," Materials Chemistry and Physics, Vol. 109, PP. 50-55, 2008.
- [4] Pak B.C., Choi Y.I, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluid with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat transfer, 1998.
- [5] Jongwook Choi a,\*1, Yuwen Zhang b Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>water nanofluid in a pipe with return bend International Journal of Thermal Sciences 55 2012.
- [6] Kim D., Kwon Y., Cho Y., Li C., Cheong S., Hwang Y., Lee J., Hong, D., and Mo S., 2009, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbule flow conditions CurrAppl. Phys, Vol. 9:119-123, 2012.
- [7] Jongwook Choi, Yuwen Zhang Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>water.nanofluid in a pipe with return bend. International Journal of Thermal Sciences 55, 2013.
- [8] Xuan Y., Li Q., Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, J. Heat Transfer., Vol. 125(1): 151-155, 2003.
- [9] Qu W. and Mudawar I., Analysis of Three-Dimensional Heat Transfer in Micro- Channel Heat Sinks, Int. J. Heat Mass Transfer, 45, 3973-3985, 2002.
- [10] Manninen M., Taivassalo V. and Kallio S., On the mixture model for multiphase flow, VTT Publications 288. Technical Research Center of Finland, 1996.
- [11] Hamilton R.L & crosner, O.K, Thermal conductivity of Heterogeneous Two-Component system, 1962.
- [12] Wang. X,Xu,X, Choi, S.U.S, Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture, J. 1999.
- [13] Xuan Y., Li G., Experimental research on the viscosity of nanofluids Report of nanjing university of sinence and Technology. 1999.