

## بررسی نسبت ابعادی و غلظت نانوذره بر جریان نانوسیال در لوله با مقاطع مستطیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران  
مربی، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

محسن نوریان اردکانی  
سید امیر عباس علمی\*  
محمد حسن زارع میرک آباد

### چکیده

در این تحقیق، افزایش انتقال گرما و افت فشار در اثر افزودن نانو لوله کربنی چند دیواره به روغن انتقال گرما، به صورت عددی در شرایط دما ثابت مورد بررسی قرار گرفت. روغن انتقال گرما HT-B به همراه نانوسیال روغن انتقال گرما -MWCNT به عنوان سیالات کاری در نظر گرفته شدند. نتایج بیانگر این است که افزودن نانوذرات باعث افزایش ضریب رسانایی گرمایی روغن شده و نشان می دهد که در اعداد گراتز بالاتر با افزایش غلظت نانوذرات در روغن، میزان افزایش ضریب جابجایی انتقال گرما به مراتب بالاتر است. و همچنین نشان می دهد که میزان افت فشار به مقدار نانوذره و نسبت ابعادی لوله بستگی دارد. با افزایش میزان نسبت ابعادی لوله، ضریب جابجایی به خوبی افزایش می یابد.  
واژه های کلیدی: انتقال گرما، افت فشار، MWCNT، دما ثابت، لوله مستطیلی.

## Investigation on Aspect Ratio and Nanoparticles of Nano-fluid Flow in Rectangular Channels

M. Noorian Ardakani  
S. A. A. Oloomi  
M. H. Zare Mirok Abad

Department of Mechanical Engineering, College of Science Research Yazd Islamic Azad University, Yazd, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

### Abstract

An investigation has been carried out to study the heat transfer and pressure drop characteristics of MWCNT-Base oil Nano-fluid flow inside horizontal rectangular channels under constant wall temperature. The effect of different parameters such as mass velocity, aspect ratio of rectangular channels and Nanoparticles concentration on heat transfer coefficient and pressure drop of the flow is studied. Observations show that the numbers of Graetz higher with increasing concentration of nanoparticles in oil, the increase is much higher heat transfer switch. And also shows that the pressure drop depends on the amount of nanoparticles and aspect ratio tube. By increasing the aspect ratio tube, the convective heat transfer coefficient increases very well.

**Keywords:** Heat transfer, Pressure Drop, MWCNT, Constant Temperature, Rectangular Tube.

لذا در این مطالعه به بررسی تأثیر همزمان استفاده از نانوسیال روغن انتقال گرما - نانولوله های کربنی و جایگزین کردن لوله های دایروی با لوله های غیر دایروی (با مقطع مستطیلی شکل) بر میزان افت فشار و انتقال گرما می پردازیم.  
افزودن نانوذرات به سیالات برای افزایش انتقال گرما مشکلاتی از جمله تجمع ذرات درون سیال، ته نشینی ذرات و از همه مهمتر افزایش افت فشار را دارا است. به هر حال تحقیقات زیادی در این زمینه موجود است که در زیر برخی از آنها آورده شده است.  
کو و همکاران [1] یک تحقیق تجربی برای بررسی افت فشار نانوسیال شامل نانولوله های کربنی در لوله افقی را فراهم آوردند. آنها مقادیر مختلف لزجت برحسب نرخ برش را بدست آوردند و مشاهده کردند که با افزایش نرخ برش لزجت کاهش می یابد. بنابراین، آنها گزارش کردند که افت فشار برای این نانوسیالات به طور قابل توجهی در جریان لایه ای افزایش می یابد. به هر حال، زمانی که دبی جریان افزایش یابد افت فشار نانوسیال به سیال پایه نزدیک می شود.  
راز و اخوان [2] افت فشار و انتقال گرما نانوسیال روغن پایه-اکسید مس در داخل لوله تخت با شرایط مرزی شار ثابت برای جریان

### ۱- مقدمه

خنک کاری جزئی ناگزیر برای ثابت نگه داشتن عملکرد مورد نظر و مطمئن محدوده وسیعی از محصولات همانند کامپیوترها، موتور خودروها است. با افزایش شارهای گرمایی که در اثر تولید قدرت بیشتر و یا اندازه های کوچکتر بوجود آمده است، خنک کاری به یکی از بزرگترین چالش های پیش روی صنایع پیشرفته ای چون میکروالکترونیک، حمل و نقل، ساخت و دفاع تبدیل شده است.  
راه های مرسوم در بهبود انتقال گرما در سیستم های حرارتی عبارت از افزایش سطح تماس و تغییر مشخصات جریان می باشند، اما روش های دیگری نیاز است که پاسخگوی کامل درخواست صنایع در خنک کاری باشد. تکنولوژی نانوسیال پتانسیل بالایی را برای توسعه سیستم های خنک کاری با عملکرد بالا، در حجم کوچک و با صرفه اقتصادی ارائه می دهد. دلیل اصلی برای فراهم ساختن نانوسیال روغن انتقال گرما- نانولوله های کربنی این است که نانولوله های کربنی به عنوان افزودنی به روغن موتور به منظور کاهش دمای قسمت های بسیار داغ موتور می تواند استفاده شوند.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: amiroloomi@iauyazd.ac.ir

گردیده است. لذا خصوصیات نانوسیال به صورت  $udf$  در نرم افزار Fluent وارد شده است و از روابط زیر، استفاده شده است.

### ۳-۱- چگالی نانوسیال

چگالی نانوسیال معمولاً از طریق رابطه پاک و چو [6] بدست می‌آید:

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

که در آن  $\phi$  درصد جرمی نانوذرات،  $\rho_p$  چگالی نانوذرات و  $\rho_f$  چگالی سیال پایه است.

### ۳-۲- گرمای ویژه

کاظمی [۷] رابطه زیر را جهت محاسبه گرمای ویژه نانوسیال روغن انتقال گرما - MWCNT در بازه حرارتی ۲۵ تا ۸۰°C پیشنهاد می‌دهد.

$$C_{p,nf} = (14.62\phi^3 + 13.38\phi^2 - 4.952\phi + 1.88) e^{0.0015T} \quad (2)$$

که  $\phi$  در این رابطه درصد جرمی نانوذرات در سیال پایه و  $T$  دمای سیال پایه بر حسب سلسیوس می‌باشد.

### ۳-۳- ویسکوزیته سینماتیکی

کاظمی [۷] رابطه زیر را جهت محاسبه لزجت سینماتیکی نانوسیال روغن انتقال حرارت - MWCNT در بازه دمایی ۴۰ تا ۱۰۰°C پیشنهاد می‌دهد.

$$\frac{V_{nf}}{V_f} = (-2.1\phi^2 - 0.55\phi + 0.98) T^{(1.85\phi^2 + 0.125\phi + 0.018)} \quad (3)$$

که  $\phi$  در این رابطه درصد جرمی نانوذرات در سیال پایه،  $T$  دمای سیال پایه بر حسب سلسیوس و  $V_f$  لزجت سینماتیکی سیال پایه می‌باشد.

### ۳-۴- رسانایی گرمایی

کاظمی [۷] در تحقیقات خود به بررسی رسانایی گرمایی نانوسیال روغن انتقال گرما - MWCNT در بازه دمایی ۲۰ تا ۷۰°C می‌پردازد که رابطه آن در بالا آمده است.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = (0.066\phi + 0.958) e^{0.002T} \quad (4)$$

که  $\phi$  در این رابطه درصد جرمی نانوذرات در سیال پایه،  $T$  دمای سیال پایه بر حسب سلسیوس و  $K_f$  رسانایی گرمایی سیال پایه می‌باشد.

### ۳-۵- معادله فشار

در این تحقیق از قسمت اول معادله دارسی-ویباخ استفاده شده است که در زیر قابل مشاهده است.

$$\frac{\Delta p}{v^2} = \frac{32 \rho l}{d^3} Re \quad (5)$$

که  $Re$  عدد رینولدز،  $L$  طول لوله،  $p$  چگالی سیال،  $d$  قطر هیدرولیکی،  $\Delta p$  اختلاف فشار و  $v$  لزجت سینماتیکی می‌باشد.

آرام بررسی کرده‌اند. غلظت جرمی نانوسیال کمتر از ۲ درصد بود. آنها مشاهده کردند که افت فشار جریان با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. آنها همچنین نتیجه گرفتند تخت کردن لوله روش موثری در افزایش انتقال گرما نسبت به اضافه کردن نانوذرات به روغن پایه می‌باشد.

نقوی و همکاران [3] در پژوهش تجربی خود به بررسی افت فشار نانوسیال روغن انتقال گرما - MWCNT در لوله‌های تخت و دایره‌ای پرداختند. آنها به این نتایج رسیدند که تغییرات پارامتر افت فشار با عدد رینولدز برای تمامی نانوسیالات تقریباً یکسان است. در مورد لوله‌های مستطیلی نیز تغییرات پارامتر افت فشار به همین منوال است و برای تمامی سیالات مورد مطالعه نسبتاً یکسان به دست می‌آید همچنین، آنها نشان دادند که پارامتر افت فشار در لوله‌های مختلف با افزایش نسبت ابعادی لوله به شدت افزایش می‌یابد.

اخوان بهابادی و همکاران [4] در یک تحقیق تجربی به مطالعه انتقال گرما و افت فشار جریان آشفته نانوسیال (آب-MWCNT) در یک لوله مسی که داخل آن سیم مارپیچ (لوله کوئل دار) می‌باشد، تحت شار گرمایی ثابت پرداختند. مشاهدات آنها نشان می‌دهد که در بالاترین عدد رینولدز و در داخل لوله کوئل دار با بالاترین قطر سیم، به طور متوسط ۸۵ درصد افزایش در ضریب انتقال گرما و ۴۷۵ درصد افت فشار وجود خواهد داشت.

همچنین وانگ و همکاران [5] نشان دادند که آثار لایه لایگی سطح تماس مولکول‌های مایع و خوشه شدن نانوذرات باعث فراهم آمدن مسیریایی برای انتقال گرما سریع می‌شود. آنها در بررسی‌های خود با توجه به خوشه‌ای شدن نانوذرات در داخل سوسپانسیون و همین طور کنش متقابل نانوذرات، مدل‌های نظری را برای پیش‌بینی رسانایی گرمایی مؤثر نانوسیال در غلظت‌های پایین پیشنهاد کردند.

## ۲- مشخصات روغن و نانوذره

### ۲-۱- مشخصات روغن

روغن استفاده شده در این تحقیق، روغن (HT-B) محصول شرکت بهران می‌باشد.

### ۲-۲- مشخصات نانوذره

خواص MWCNT که توسط تولید کننده‌ی آن اندازه‌گیری شده است به قرار زیر می‌باشد.

- مساحت سطح ویژه (BET): 270 m<sup>2</sup>/gr
- طول: (میکرومتر) 10 μm
- قطر: 10-30 nm
- رسانایی گرمایی: 1500 W/mK

### ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی می‌باشد که با توجه به فراگیر بودن آنها، ذکر نشده است. با توجه به تفاوت جواب‌های حل عددی با نتایج تجربی [3] در شبیه سازی دو فازی، از شبیه سازی تکفاز برای حل مسائل استفاده

بهبود کردن تعداد مش‌های ایجاد شده در انجام مسائل عددی از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا مش‌های درشت در جواب تاثیرگذار می‌باشد و مش‌های ریز به تلاش محاسباتی بیشتر می‌انجامد. جدول ۲، استقلال حل از شبکه را بررسی می‌نماید.

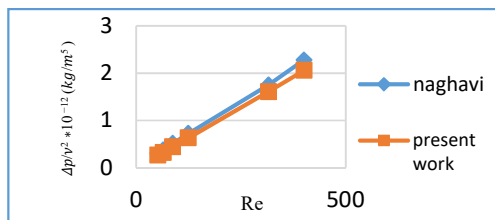
جدول ۲- استقلال حل از شبکه

شبهه استفاده شده	دمای سیال خروجی (°C)	غلظت	سرعت	تعداد شبهه	نوع لوله
756000	58.7	0.1	0.7	413000	AR=8
	58.86	0.1	0.7	756000	
	58.86	0.1	0.7	1452000	
714000	51.31	0.2	0.09	435000	AR=2
	51.37	0.2	0.09	714000	
	51.37	0.2	0.09	1452000	
6400	58.7	0.2	0.06	2500	CIRCLE
	58.86	0.2	0.06	6400	
	58.86	0.2	0.06	8500	

گام بعدی حل عددی با استفاده از نرم افزار Fluent می‌باشد که از فرمول بندی تفکیکی و روش مجزا سازی مرتبه دوم استفاده شده و ارتباط میان فشار و سرعت از طریق الگوریتم SIMPLE برقرار شده است. مبنای همگرایی جواب ها، میزان باقیمانده نسبی  $10^{-6}$  گرفته شده است.

### ۶- نتایج

برای اطمینان از صحت داده‌های حاصل شده از حل عددی نیاز به مقایسه و ارزیابی نتایج می‌باشد. به منظور اعتبار سنجی نتایج کسب شده، آنها را با نتایج حاصل از تحقیق تجربی نقوی و همکاران [3] مقایسه می‌کنیم. نتایج اعتبار سنجی را می‌توان در شکل ۲ بررسی نمود. نوآوری این تحقیق، بررسی عددی تحقیق تجربی نقوی و همکاران می‌باشد.



شکل ۲- پارامتر افت فشار نسبت به Re در لوله با (AR=2) و غلظت ۰/۲ درصد

نتایج جریان روغن انتقال گرمای خالص و نانوسیال درون لوله دایروی و لوله‌های مستطیلی در شکل های ۳ تا ۶ ارائه می‌شود.

### ۳-۶- معادله گراتز

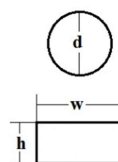
معادله گراتز به شرح زیر می‌باشد

$$(GZ)^{-1} = L / (D * Re * Pr) \quad (6)$$

که L طول لوله، D قطر هیدرولیکی، Re عدد رینولدز و Pr عدد پراتل می‌باشد.

### ۴- هندسه و شرایط مرزی

شکل ۱ و جدول ۱ لوله‌های مورد آزمایش را با ابعاد آن‌ها و قطر هیدرولیکی آن‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سطح مقطع تمامی لوله‌های غیر دایروی برابر با همان سطح مقطع لوله دایروی با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر برابر می‌باشد. در ضمن طول لوله‌ها ۶۰۰ میلی‌متر و جنس آنها مس می‌باشد.



شکل ۱- مقاطع مورد استفاده در آزمایش

جدول ۱- ابعاد مقاطع مورد آزمایش (mm)

نسبت ابعادی (AR)	عرض مقطع (W)	ارتفاع مقطع (h)	قطر هیدرولیکی (Y)
2	17.5	8.7	11.7
8	35.1	4.4	7.8

در این مطالعه شرایط مرزی به شرح زیر در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است که با توجه به سرعت کم در ورودی لوله‌ها جریان به صورت پایا و آرام فرض شده است.

- شرایط ورودی

دما: ۳۵°C

سرعت: متغییر

- شرایط خروجی

دما: ۲۵°C

فشار: ۲bar

- شرایط دیواره

جنس دیواره: مس

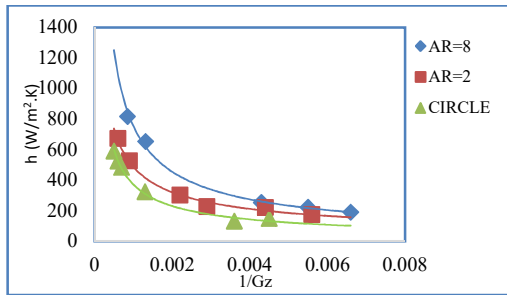
دما (ثابت): ۹۵°C

ضخامت دیواره: ۲mm

### ۵- حل عددی

در شبکه بندی لوله دایره‌ای از حالت دو بعدی و لوله‌های مستطیلی از حالت سه بعدی استفاده شده است و همچنین در هر دو نوع لوله از قسمت Mesh Edge و از نوع Successive Ratio مورد استفاده قرار گرفته شد.

بالاتر عموماً کارایی بهتری دارند و موجب افزایش بیشتری در ضریب جابجایی می‌شوند که دلیل عمده‌ی افزایش ضریب جابجایی را می‌توان به استفاده از سیالی با رسانش بیشتر نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که در اعداد گراتز کوچکتر افزودن نانوذرات تأثیری در افزایش ضریب جابجایی ندارد که این نتیجه هم به طور تقریبی در معادله سیدر و تیت هم قابل مشاهده است.



شکل ۶- تغییرات ضریب جابجایی با معکوس عدد گراتز برای نانوسیال ۰/۱ درصد جرمی در لوله‌های مختلف

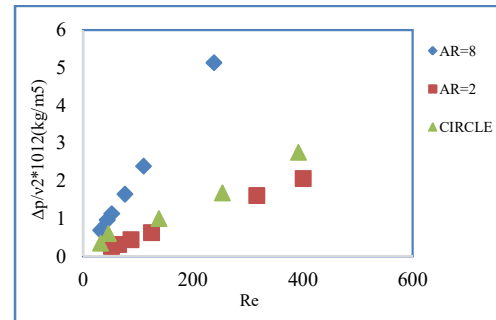
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان نسبت ابعادی لوله ضریب جابجایی به خوبی افزایش می‌یابد. علت افزایش انتقال گرما در لوله‌های مستطیلی نسبت به لوله‌های گرد این است که مغز جریان به دیواره‌ها نزدیک‌تر می‌شود. به این ترتیب حتی در جریان‌های انرژی لایه‌ای باید فاصله‌ی کمتری را طی کند تا به مرکز جریان دست یابد.

#### ۷- نتیجه گیری

- مشاهده می‌شود که علاوه بر لزجت سیال، نسبت ابعادی لوله هم بر افت فشار تأثیر زیادی می‌گذارد.
- با افزایش نسبت ابعادی لوله، پارامتر افت فشار به شدت افزایش می‌یابد.
- در تمامی لوله‌ها در اعداد گراتز بالاتر با افزایش غلظت نانوذرات در روغن انتقال گرما، میزان افزایش ضریب جابجایی انتقال گرما به مراتب بالاتر است. این در حالی است که در اعداد گراتز پایین‌تر نانوسیالات برتری مشهودی نسبت به سیال پایه ندارند.
- مشاهده می‌شود که با افزایش میزان نسبت ابعادی لوله ضریب جابجایی به خوبی افزایش می‌یابد.

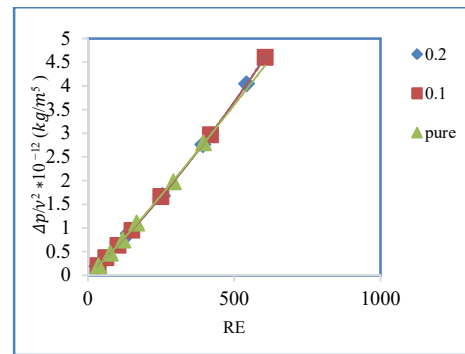
#### ۸- مراجع

- [1] Ko G.H, Lee K., Kim D.S., Kim C., Sohn Y. and Choi M., An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube, *Wear*, Vol. 265, pp.422-428, 2008.
- [2] Razi P., Akhavan-Behabad, M.A., Saeedinia M., Pressure drop and thermal characteristics of CuO-base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux, *Int. Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38(7), PP 964-971, 2011.
- [3] Naghavi M.R., Akhavan-Behabadi M.A., Pakdaman M. F., Experimental Investigation on Heat Transfer and Pressure Drop of CNT-Base Oil Nano-Fluid Flow in Rectangular Channels



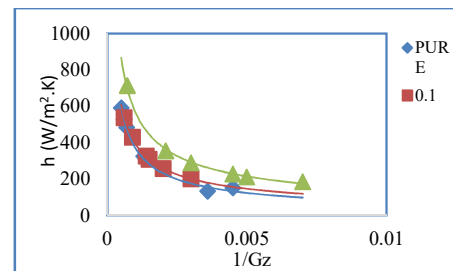
شکل ۳- پارامتر افت فشار برای جریان نانوسیال ۰/۲ درصد جرمی در لوله‌های متفاوت بر حسب Re

در شکل ۳ دیده می‌شود که پارامتر افت فشار با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و روند این افزایش با افزایش نسبت ابعادی لوله، افزایش چشمگیری دارد. علت افزایش این افت فشار، کاهش قطر هیدرولیکی و تغییر شکل از حالت دایره‌ای می‌باشد.



شکل ۴- پارامتر افت فشار برای سیال پایه و نانوسیالات در لوله‌ی دایروی بر حسب Re

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود پارامتر افت فشار با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و همچنین می‌توان فهمید که در لوله دایره‌ای از حدود عدد رینولدز ۴۰۰ به بعد، تأثیر نانوسیال، حس می‌شود. لذا از سرعت  $1 (m/s)$  به بعد تأثیر نانو سیال مشاهده می‌شود، در نتیجه برای سرعت های پایین می‌توان از اثر نانوذرات صرف‌نظر کرد.



شکل ۵- تغییرات ضریب جابجایی با معکوس عدد گراتز در جریان سیال پایه و نانوسیالات در لوله‌ی دایروی

در شکل ۵ دیده می‌شود، ضریب انتقال گرمای جابجایی با افزایش عدد گراتز افزایش می‌یابد و نانوسیال با غلظت ۰/۲٪ در اعداد گراتز

under Constant Wall Temperature, Advanced Materials Research, Vols 622-623, pp. 806-810, Dec. 2012

[4] Akhavan-Behabadi M.A., Shahidi Mohamad., Aligoodarz, M.R., An experimental study on heat transfer and pressure drop of MWCNT-water nano-fluid inside horizontal coiled wire inserted tube, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 63, PP. 62-72, April 2015.

[5] Wang X., Xu X., Choi S. U. S., Thermal conductivity of nanoparticles-fluid mixture, J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 13, No.4., pp. 474-480, 1999.

[6] Pak B. and Cho Y., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer, Vol. 11 (2), pp. 151-170, 1998.

[7] کاظمی، محمد حسن، بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال در لوله مارپیچ میکروفین دار، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، اخوان بهابادی، محمدعلی (استاد راهنما)، کوثری، فرشاد (استاد مشاور)، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.