



مطالعه عددی اثر اندازه نانوذرات بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی جریان نانوسیال آب - Al_2O_3 در داخل کانال‌های عمودی

کوروش جواهرده - استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان E-mail: javaherdeh_k@yahoo.com

حبیب کریمی - باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان E-mail: habib_karimi63@yahoo.com

چکیده: در این مقاله جریان اجباری و آرام نانوسیال آب - Al_2O_3 درون یک کانال عمودی شبیه‌سازی شده و اثرات اندازه نانوذرات اکسیدفلزی بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی جریان بررسی شده‌است. در این مطالعه، همچنین اثر درصد حجمی نانوذرات اکسیدآلومینیوم در یک محدوده‌ای از اعداد گراشف و رینولدز بر روی توزیع سرعت و دما مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دارای دقت خوبی می‌باشد. بررسی توزیع سرعت در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که در جابجایی اجباری زودتر از جابجایی آزاد به شکل سهموی در می‌آید. چنین حالتی نیز برای توزیع دما مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، شبیه‌سازی عددی، کانال عمودی، جابجایی آزاد و اجباری

Numerical Study of the Particle Size Effect on the Thermal and Hydrodynamic Characteristics of the Water- Al_2O_3 Nano-Fluid Flow through Vertical Channels

K. Javahedeh, Faculty Member, Faculty of Mech. Eng., Islamic Azad University of Takestan, TIAU
H. karimi, Member of Young Researchers Club, Islamic Azad University of Takestan, TIAU

Abstract: This paper deals with the simulation of the developed forced and free convection flow inside vertical channels using Al_2O_3 nano-fluid, in which, the effects of nano-particles size on the thermal and hydrodynamic characteristics of the flow has been investigated. Also, the effects of Al_2O_3 particle volume fraction, on the velocity and temperature profiles has been carried out by numerical solution of governing equations over a wide range of the Grashof and Reynolds numbers. The results of present work are compared with the previously numerical works on force and free convection in channels and it shows a good agreement between these results. Analyzing velocity profile, we found that velocity profile in the forced convection changes to the hyperbolic scheme sooner than that of free convection. This situation also exists in temperature profile.

Key words: Nano-fluid, numerical study, vertical channel, free and forced convection

۱- مقدمه

عموماً سیال‌ها، عامل اساسی برای انتقال حرارت در بسیاری از دستگاه‌ها و تجهیزات حرارتی هستند. در این میان، بالا بودن ضریب هدایت حرارتی در سیال‌ها مزیت مهمی محسوب می‌شود. ماکسول [۱] نشان داد که می‌توان ضریب هدایت حرارتی را با اضافه کردن ذرات جامد افزایش داد. این ذرات در ابتدا در ابعاد میکرو یا میلی‌متر ساخته می‌شدند که با پیشرفت فناوری در ابعاد نانو تهیه شد به طوری که منجر به عرضه سیال جدیدی به نام نانوسیال گردید. نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط لی و همکاران [۲] نشان می‌دهد که نانوسیال ذرات اکسید آلومینیم و یا اکسید مس بر پایه آب باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود. به عنوان مثال استفاده از ذرات بزرگتر از میانگین قطر ۴۰ نانومتر منجر به افزایش ۱۰ درصدی هدایت حرارتی می‌گردد. شبیه‌سازی‌های انجام یافته در مورد جریان نانوسیال در طی دهه اخیر در زمینه رفتار حرکتی و حرارتی نانوسیال‌ها صورت گرفته است. اکبری و بهزاد مهر [۳] توسعه جابجایی دوگانه نانوسیال را در درون لوله‌های افقی و شیب‌دار با شار حرارتی ثابت بررسی کردند. مایگا و همکارانش [۴] نشان دادند که افزودن نانوسیال به سیال پایه موجب افزایش اثر نامطلوب تنش برشی در دیواره می‌گردد. هو و همکاران [۵] در یک مطالعه تجربی برای نانوسیال اکسید آلومینیم بر پایه آب در محفظه بسته با انتقال حرارت جابجایی آزاد، کاهش نرخ انتقال حرارت را به جز در مواردی که نسبت حجمی ذرات کمتر از ۱٪ بوده گزارش داده‌اند. آنوپ و همکاران [۶] تاثیر اندازه نانو ذرات را بین دو ناحیه توسعه یافته و در حال توسعه بررسی کرده و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت در ناحیه در حال توسعه بالاتر از ناحیه توسعه یافته می‌باشد. ایاز و همکاران [۷] تاثیر نانوسیال مختلف را بر خواص سیال در جابجایی آزاد در درون یک محفظه بسته بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی عددی اثرات اندازه ذرات بر روی مشخصه‌های حرارتی و هیدرودینامیکی در

محدوده‌ای از اعداد رینولدز و گراشف مختلف بررسی و نتایج با دستاوردهای دیگر محققین مقایسه شده است.

۲- شرح مسئله

مطابق شکل (۱) هندسه مسئله عبارت است از یک جریان دو بعدی در داخل یک کانال عمودی که نسبت طول به قطر ورودی آن (L/D) برابر ۴ است. در نانوسیال‌ها به دلیل کوچکی ابعاد نانو ذرات، عقیده بر این است که می‌توان رفتار آنها را به مانند یک سیال ساده فرض کرد. بنابراین در این مسئله نانوسیال را به صورت سیال تک فازی الگو نموده و توزیع ذرات را در درون سیال پایه یکنواخت در نظر می‌گیریم. همچنین خواص فیزیکی سیال نیز ثابت فرض می‌شود.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی:

معادلات بی‌بعد شده پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی برای جریان آرام در حالت پایا به صورت زیر ساده سازی می‌شوند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت در جهت X:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت در جهت Y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \times T$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re} \times \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

خواص نانوسیال‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند [۳]:

چگالی:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۵)$$

ضریب هدایت حرارتی:

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f \quad (۶)$$

که n فاکتور حالت می باشد و مقدار آن برابر ۳ برای نانوذرات کروی است [۸].

گرمایی ویژه:

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (۷)$$

لزجت نانوسیال:

$$\mu_{nf} = (123\phi^2 + 7.3\phi + 1)\mu_f \quad (۸)$$

روابط فوق با روابطی که توسط وانگ و همکاران [۹] ارائه شده، مقایسه شده است. در روابط حاکم (۱) الی (۴) اعداد گراشف، رینولدز و پراتل به ترتیب از روابط ذیل تعریف می شوند:

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu^2} \quad (۹)$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (۱۰)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۱۱)$$

برای حل مسئله مورد نظر از شرایط مرزی ذیل استفاده شده و برای دیواره ها شرایط آدیاباتیک در نظر گرفته شده است:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x=0.5} = 0$$

$$0 < x < 0.5 \rightarrow \begin{cases} y = 0 \rightarrow u = U_0, T = T_0 \\ y = L \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید آلومینوم (Al_2O_3)

در جدول (۱) درج شده است [۱۰].

۳- روش حل عددی:

در انجام شبیه سازی از دو روش مختلف استفاده می شود. در حالت اول نانوسیال تکفازی در نظر گرفته می شود و معادلات حاکم بر سیال رایج را می توان برای آن به کار برد. در روش دوم یک الگوی دوفازی برای بیان رفتار نانوسیال بکار گرفته می شود. برای حل عددی معادلات حاکم بر مسئله مورد نظر از روش حجم محدود، برای گسسته سازی روابط در شبکه بندی یکنواخت و از طرح اختلاف بالادست استفاده شده است. برای ارتباط بین عبارات سرعت و فشار، الگوریتم simple که توسط پاتنکار [۱۱] معرفی شده، به کار رفته است. همگرایی برای حل هنگامی برقرار می شود که معادله پیوستگی با دقت 10^{-6} برقرار باشد. به منظور دقت و سازگاری نتایج عددی چندین شبکه یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی نشان داد که نتایج حاصله مستقل از شبکه بندی هستند و افزایش تعداد شبکه در جهات مختلف تغییر چشمگیری را در نتایج پروفیل های سرعت و دما ندارد و فقط باعث افزایش زمان محاسبه می شود. بنابراین در این روش عددی با مقایسه انواع شبکه بندی ها، شبکه بندی 20×20 مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۲- الف) شبکه بندی مورد استفاده در کانال را نشان می دهد. در این تحقیق برای حل معادلات حاکم از روش حل تفکیکی (Segregated) استفاده می شود [۱۱].

۴- نتایج:

فرآیند شبیه سازی عددی در محدوده ای از اعداد رینولدز و گراشف در جابجایی آزاد و اجباری و سه نسبت حجم مختلف از نانوذرات (۲٪، ۴٪ و ۶٪) انجام شده است.

دمای سیال ورودی برابر با $20^\circ C$ در نظر گرفته می شود. برای تعیین اثر غلظت های نانوذرات بر رفتار هیدرودینامیکی و

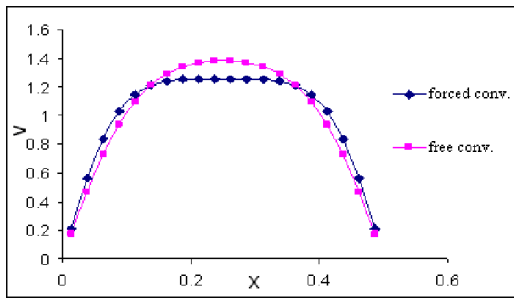
نیز وجود دارد. تمام این حالات برای نسبت حجمی نانوذره ۲٪ می‌باشد. V_4 ، سرعت در مقطع انتهایی کانال می‌باشد. با توجه به شکل (۷) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، لایه‌مرزی سریع‌تر رشد می‌کند که دلالت بر افزایش تنش برشی در دیواره کانال با افزایش نسبت حجمی نانوذرات می‌باشد. بطوریکه در شکل (۸) نشان داده شده است، حجت و فیروزفر [۱۰] نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

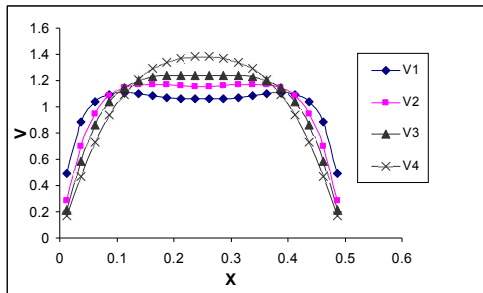
در این پژوهش اثر افزایش نانوذره به سیال پایه بر رفتار هیدودینامیکی و حرارتی جریان در یک کانال عمودی با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت است. از روش Simple برای ارتباط سرعت و فشار استفاده شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج بدست آمده از کارهای قبلی موجود در ادبیات پژوهش انطباق خوبی دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذره به سیال پایه باعث تغییر در پروفیل‌های سرعت و دما می‌شود. همچنین بر طبق نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش نسبت نانوذرات پروفیل‌های سرعت در ناحیه توسعه‌یافتگی سریع‌تر تشکیل شده که این حالت با افزایش نانوذره نسبت مستقیم دارد، البته به نوع جابجایی (اجباری و یا آزاد بودن جریان) بستگی دارد، که در جریان آزاد این امر سریع‌تر اتفاق می‌افتد. برای پروفیل‌های دما نیز این نتیجه صادق بوده و طول ورودی گرمایی در مقاطع نزدیک‌تر کانال ایجاد می‌شود. در نتیجه می‌توان این گونه نتیجه گرفت که این دو پروفیل با افزایش نسبت نانوذره لایه‌مرزی سریع‌تر رشد می‌کند. این حالت نشان می‌دهد که تنش برشی در دیواره کانال با افزایش نسبت نانوذره افزایش می‌یابد.

حرارتی جریان، شبیه‌سازی در غلظت‌های مختلف (۲٪، ۴٪ و ۶٪) انجام شده است. نتایج بدست آمده به وضوح نشان می‌دهد که وجود نانوذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی رفتار حرارتی و هیدودینامیکی جریان دارد. در جابجایی آزاد با در نظر گرفتن مقدار $10^5 \times 7$ و $10^4 \times 7$ به ترتیب برای اعداد رینولدز و گراشف و سه مقدار مختلف از نسبت نانوذرات و همچنین برای جابجایی اجباری با در نظر گرفتن اعداد $10^4 \times 5$ و $10^3 \times 5$ به ترتیب برای اعداد رینولدز و گراشف، شبیه‌سازی انجام شده است. شکل (۳) منحنی‌های سرعت قائم ثابت در راستای کانال را نشان می‌دهد. به‌طوریکه از شکل (۲-ب) مشخص است، با جاروب کردن طول کانال سرعت در مقاطع انتهایی بیشتر شده و به حالت سهموی نزدیک‌تر می‌شود. اولین نکته قابل ملاحظه اینکه صرف‌نظر از مقدار عدد رینولدز، افزودن نانوذره، موجب بهبود رفتار حرکتی نانوسیال می‌شود. به تدریج در جهت جریان سیال، حالت سهمی پروفیل سرعت بیشتر می‌شود. با مقایسه پروفیل‌های دما مشخص می‌شود که در ابتدای کانال این پروفیل تقریباً بر یکدیگر منطبق بوده ولی به تدریج در جهت جریان سیال مشخص می‌شود که پروفیل‌های دما در جابجایی آزاد سریع‌تر از پروفیل‌های جابجایی اجباری به شکل سهموی در می‌آیند. این نتیجه را می‌توان اینگونه بیان کرد که هر چقدر جریان به انتهای کانال نزدیک‌تر می‌شود، پروفیل‌های دما در جابجایی آزاد نسبت به جابجایی اجباری دارای شیب بیشتری می‌شوند. شکل (۴) پروفیل‌های دما در جابجایی آزاد و اجباری را در مقاطع انتهایی کانال نشان می‌دهد. در شکل (۵) پروفیل سرعت در جابجایی آزاد نسبت به جابجایی اجباری سریع‌تر به شکل سهموی می‌رسد. در شکل (۶) پروفیل سرعت در جابجایی آزاد برای نانوسیال با ۲٪ نسبت حجمی و در شکل (۷) همین پروفیل‌ها در جابجایی اجباری برای نسبت‌های حجمی مختلف نشان داده شده است. با بررسی دقیق شکل‌های (۶) و (۷) ملاحظه می‌شود که شرایط تغییر شکل پروفیل حرکتی برای پروفیل‌های حرارتی

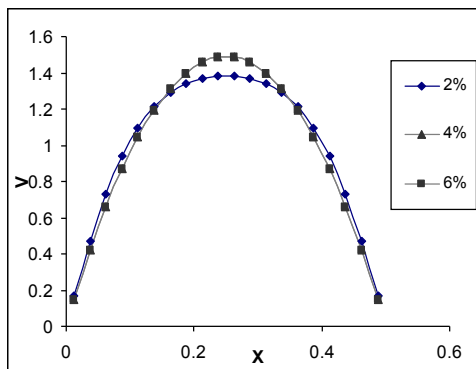
- Convection Flows”, *Int. J of Heat Fluid Flow*, Vol. 26, pp. 530-546, 2005.
- [5] Ho, C. J., Lin, C. C., “Experiments on Natural Convection Heat Transfer of a Nano-fluid in a Square Enclosure: Effects due to Uncertainties of Viscosity and Thermal Conductivity”, *Int. J. of Heat Transfer*, Vol. 51, pp. 363-371, 2008.
- [6] Anoop, K. B., Sundararajan, T. and Sarit, K. Das., “Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nano-fluid in the Developing Region”, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2189–2195, 2009.
- [7] Eiyad, A. N., Ziyad, M. C., Hakan, F., Oztop, D. and Antonio, C. “Effect of Nano-fluid Variable Properties on Natural Convection in Enclosures”, *Int. J. of Thermal Sciences*, pp. 1–13, 2009.
- [8] Zhang, Z., Gu, H. and Fjii, M., “Effective Thermal Conductivity and Diffusivity of Nano-fluids Containing Spherical and Cylindrical Nano-particles”, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 31, pp. 5593-5599, 2007.
- [9] Wang, X., Xu, X., and Choi, S. U. S., “Thermal Conductivity of Nano-particle Fluid Mixture”, *J. of Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 13(4), pp. 474-780, 1999.
- [10] حجت، م. و فیروزفر، ا.، “شبیه‌سازی جریان آرام و انتقال حرارت نانوسیال در مجاری با مقطع مستطیل با دمای ثابت دیواره”، همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست ۱۳۸۶.
- [11] Patankar, S. V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Co., New York. 1980.
- ۶- فهرست علائم:
- C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot ^\circ K$)
- k هدایت گرمایی، ($W/m \cdot ^\circ K$)
- g شتاب جاذبه (m/s^2)
- H ارتفاع (m)
- L طول (m)
- u سرعت بی بعد در جهت x
- v سرعت بی بعد در جهت y
- T دمای بی بعد
- Gr عدد گراشف
- Re عدد رینولدز
- Pr عدد پرانتل
- علائم یونانی:
- α نفوذ گرمایی
- ϕ نسبت حجمی نانوذرات
- ρ چگالی (kg/m^3)
- μ ویسکوزیته ($kg/m \cdot s$)
- زیرنویس‌ها:
- p نانوذره
- f سیال پایه
- nf نانوسیال
- ۷- مراجع
- [1] Maxwell, J., “Electricity and Magnitism”, Clarendon press, C1873, Oxford, UK.
- [2] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., “Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nano-particles”, *J. of Heat Transfer*, Vol. 121, 280-289, 1999.
- [3] Akbari, M., Behzadmehr, A., “Fully Developed Mixed Convection in Horizontal and Inclined Tubes with Uniform Heat Flux Using Nano-fluids”, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29 , pp 545-556, 2008.
- [4] Maiga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G., and Galanis, N., “Heat Transfer Enhancement by Using Nano-fluids in Forced



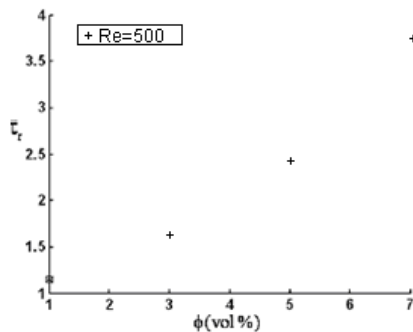
شکل (۴): پروفیل سرعت در مقطع انتهایی کانال ($\phi = 2\%$)



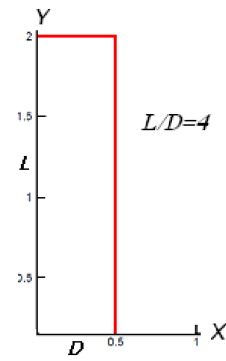
شکل (۵): پروفیل سرعت در جابجایی آزاد کانال ($\phi = 2\%$)



شکل (۶): پروفیل سرعت در جابجایی آزاد کانال برای نسبت حجمی های مختلف نانوذرات



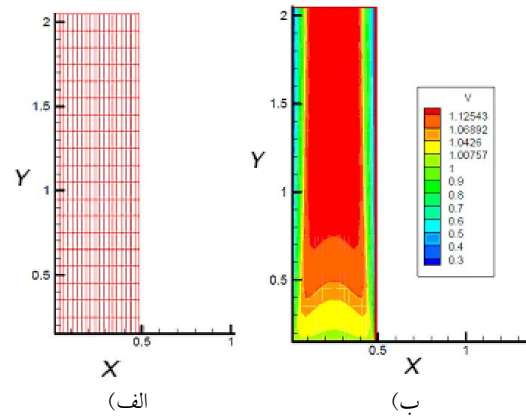
شکل (۷): نسبت تنش برشی متوسط دیواره بر حسب اندازه نانوذرات [۱۰]



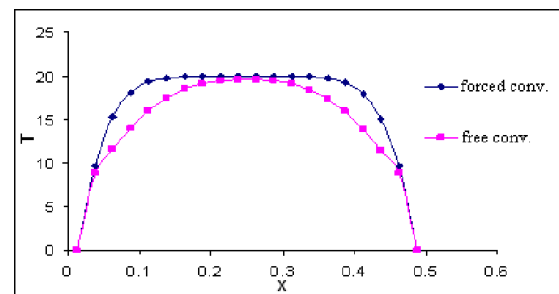
شکل (۱): هندسه مسئله

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم [۱۰]

اکسید آلومینیوم	آب	خواص ترموفیزیکی
۳۷۰۰	۹۹۸/۲	چگالی (kg/m^3)
۴۶	۰/۶	ضریب هدایت حرارتی ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$)
۰/۸۸	۴/۱۸	گرمای ویژه ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$)
	۰/۰۰۱	لزجت ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)



شکل (۲): شبکه بندی کانال و کانتور سرعت ورودی به کانال



شکل (۳): پروفیل دما در مقطع انتهایی کانال ($\phi = 2\%$)