



## بررسی عددی رفتار جریان دوفازی داخل لوله‌های تبخیرکننده عمودی

ماتده دیبادین - دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی - دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان

کمال عباسپورثانی - استادیار گروه تبدیل انرژی - دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان

E-mail: [m.dybadin@yahoo.com](mailto:m.dybadin@yahoo.com)

چکیده: در این تحقیق، حل عددی رفتار جریان دوفازی در لوله‌های عمودی با سطح مقطع دایروی به قطر ۳/۵ سانتی‌متر، طول ۰/۲۸ متر و ضخامت دیواره ۰/۰۲۴ سانتی‌متر در جریان آشفته بررسی و کسر حجمی بخار و ضریب انتقال حرارت به‌ازای تغییر پارامترهای مختلف مقایسه شده‌است. لوله عمودی به صورت دوبعدی، متقارن با جریان رو به بالا با استفاده از آب به عنوان سیال عامل مدل شده‌است. نیروی گرانش و کشش سطحی در نظر گرفته شدند. انرژی و انتقال جرم به‌عنوان مکانیزم غالب در این تحقیق برگزیده شده‌اند که در کنار تقریب اویلر- اویلر بصورت یک کد تعیین‌شده UDF بکار رفته‌اند. نتایج حل با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند و نتایج همخوانی خوبی باهم دارند.

واژه‌های کلیدی: جریان دوفازی، لوله عمودی، تبخیر، آشفته، مدل حجم سیال.

## Numerical Analysis of Two Phase Flow Behavior through Vertical Tubes of a Evaporator

M. Dibadin, MS. Student, Dept. of Energy Conversion, Faculty of Mech. Eng., TIAU

K. Abbaspoursani, Ass. Prof., Dept. of Energy Conversion, Faculty of Mech. Eng., TIAU

**Abstract:** In this research, the numerical solution of two-phase flow behavior in vertical tubes with a diameter of 3.5 cm, 0.28 m in length and a wall thickness of 0.024 cm have been carried out in turbulent flow. The volume fraction of vapor and heat transfer coefficient for various mass flow rates is compared. Vertical pipe is modeled as two-dimensional, symmetric with upward water flowing is using water as working fluid. The effects of gravity and surface tension were considered. In this study, we have chosen the energy and mass transfer as the dominant mechanism that are used by approximation of the Euler - Euler which has implied by UDF routine. Solution results were compared with available experimental data and results were agreed well together.

**Keywords:** Two Phase Flow, Vertical Tube, Evaporation, Turbulent, and VOF Model.

## ۱- مقدمه

فرآیندهای جوش و تقطیر در مجراهای عمودی تحت شرایط جابجایی آزاد و اجباری از جمله مسائل بسیار مهم در انتقال حرارت و سیالات میباشند که کاربرد وسیعی در صنایع شیمیایی و نیروگاهی، طراحی بویلر، دستگاههای تقطیر، تجهیزات تبرید، تبخیر کننده ها، مبدل های حرارتی، دستگاههای آب شیرین کن و غیره دارند.

با توجه به اثرات مهم جوشش در لوله های عمودی، در سال ۱۹۹۹، ریورا (Rivera) و بست (Best) عملکرد مکانیزم جوشش در ضریب انتقال حرارت را برای سیالات مختلف آب/آمونیاک و آمونیاک/نیترات لیتیوم مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، ضریب انتقال حرارت برای جوشش با جابجایی اجباری بررسی شد [۲]. در سال ۲۰۰۴ تاثیر مکانیزم جوشش بر ضریب انتقال حرارت توسط چن (Chen) و هو (Huo) مورد بررسی قرار گرفت و این بررسی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای سیال کاری R134a انجام شد [۳].

در سال ۲۰۰۵، لئونگ (Leung) و گرونولد (Groeneveld)، افت فشار را برای ترکیب آب و بخار مورد بررسی قرار دادند و کاهش افت فشار اصطحاککی با افزایش شار گرما برای جریان در ناحیه تک فاز در یک سطح مقطع مشابه بدست آمد و با شروع فرآیند جوشش، ضریب اصطحاک در جریان دو فازی برای رژیم جریان حباب دار (Bubbly flow)، با افزایش شار گرما افزایش یافت. در ناحیه جریان دو فازی، اثرات گرمایش و تبخیر روی افت فشار اصطحاککی بستگی به شرایط و الگوهای جریان داشت [۴].

در سال ۲۰۰۷ مورنو (Moreno) و جان (John) اثر افت فشار بر الگوهای جریان دوفازی را مورد بررسی قرار دادند و

الگوی جریان جدیدی برای جریان دوفازی در شرایط آدیاباتیک به وجود آمد [۵].

همچنین در سال ۲۰۰۷، وانگ (Wang) اثر جوشش را در افت فشار کلی در لوله های عمودی جریان رو به بالا برای سیال نیتروژن با شار جرمی ثابت و شار گرمای متغیر مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که با افزایش شار حرارتی، مقدار افت فشار در نقطه گذرا (Transition point) (تبدیل رژیم جریان حباب دار به رژیم جریان اسلاگ)، افزایش می یابد [۶].

در سال ۲۰۰۸، لئو (Leo) اثرات پیوستگی و ناپیوستگی ضریب انتقال حرارت را در محاسبه طول لوله به صورت تابعی از کیفیت بخار خروجی مورد بررسی قرار داد. و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل های موجود توانست مدل جدیدی را برای ضریب انتقال حرارت ارائه دهد [۷].

چن (Chen) و همکارانش در سال ۲۰۰۹، به شبیه سازی سه بعدی جریان سیال و انتقال حرارت در میکرو کانالهای غیر دایروی پرداختند. مقایسه افت فشار و عدد ناسلت در هندسه های مختلف در این کار ارائه شده است [۸].

در سال ۲۰۱۰، صفاری به بررسی اثر تبخیر و جوشش در افت فشار و ضریب انتقال حرارت در لوله عمودی برای جریان رو به بالا در شرایط کاری کمتر از فشار اتمسفر پرداخت. و با استفاده از الگوریتمی که برای برنامه کامپیوتری استفاده نمود به این نتیجه رسید که ظرفیت انتقال گرمای جریان به صورت تابع ضمنی از سرعت می باشد [۹].

در این تحقیق، جریان دوفازی در لوله های عمودی مدل شده است و اثر شار جرمی ورودی روی کیفیت بخار و ضریب

انتقال حرارت نشان داده شده است.

در روش حجم سیال، مجموع کسر حجمی تمام فازها برابر واحد است.

## ۲- شکل هندسی :

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu} \quad (1)$$

$$\alpha_g + \alpha_f = 1 \quad (2)$$

که  $\alpha_g$  و  $\alpha_f$  بترتیب کسر حجمی مایع و بخار هستند.

معادله پیوستگی برای کسر حجمی هر یک از فازها به فرم زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u} \alpha_f) = \frac{-S}{\rho_f} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u} \alpha_g) = \frac{S}{\rho_g} \quad (4)$$

که  $S$  منبع جرم برحسب  $kg/m^2.s$  است.

معادلات ناویر-استوکس برای اندازه حرکت در سلولها حل شده اند. معادلات اندازه حرکت از طریق  $\rho$  و  $\mu$  به کسر حجمی هر یک از فازها وابسته است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F}_\sigma \cdot \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] \quad (5)$$

$\vec{F}_\sigma$  نیروی کشش سطحی وابسته به حجم برحسب  $(N/m^3)$  است و به شکل زیر محاسبه می شود:

$$F_\sigma = 2\sigma \frac{\alpha_f \rho_f k_g \nabla \alpha_g + \alpha_g \rho_g k_f \nabla \alpha_f}{\rho_f + \rho_g} \quad (6)$$

لوله با تعداد شبکه‌بندی‌های مختلف؛ با ۸۰۰۰، ۱۱۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۲۲۰۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۴۲۰۰۰ مش به صورت عددی حل شده که با تغییر تعداد مش‌ها از ۳۲۰۰۰ به ۴۲۰۰۰ تنها ۰/۲۵ درصد اختلاف در مقدار کسر حجمی بخار و ۰/۷۲ درصد اختلاف در مقدار ضریب انتقال حرارت مشاهده شده است، بنابراین، تحلیل عددی برپایه ۴۲۰۰۰ مش حاصل شده است. در تحقیق حاضر، لوله عمودی به صورت دو بعدی با تقارن محوری با شبکه‌بندی ای با ۴۲۰۰۰ مش ( $42 \times 1000$ ) به عنوان شبکه مستقل شناخته شد. شرایط مرزی برای ورودی و خروجی بترتیب شار جرمی ورودی و فشار خروجی است. نمونه‌ای از شبکه مورد استفاده را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید.

## ۳- معادلات حاکم:

### ۳-۱- فرضیات

فرضیات حاکم بر این تحقیق عبارتند از:

- دمای آب ورودی ۵۸۳ K و ۴۰۰ K.
- فشار ورودی برای دماهای فوق بترتیب ۹۹/۷ و ۲/۵ بار
- اختلاف دمای دیواره و دمای ورودی ۳۰ K است.
- رژیم جریان آشفته (با اعداد رینولدز از مرتبه  $10^5$ ).
- دبی جریان ورودی در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۷  $kg/s$
- دمای دیواره در طی فرایند تبخیر ثابت می باشد.
- نیروی کشش سطحی بر اساس دمای ورودی است.
- شتاب جاذبه مقدار  $9.81 m/s^2$  اختیار شده است.
- معادلات فوق با استفاده از الگوریتم پیرو حل شده‌اند.
- در انفصال معادلات از تقریب پسر دو مرتبه دوم استفاده شده

### ۳-۲- روش حجم سیال (VOF) و معادلات حاکم

همچنین معادله انرژی به شکل زیر نشان داده می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\bar{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q \quad (7)$$

$$E = \frac{\alpha_f \rho_f E_f + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g} \quad (8)$$

خواص  $\rho$  و  $k_{eff}$  (جرم مخصوص و ضریب هدایت گرمایی موثر) بین دو فاز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g \quad (9)$$

$$\mu = \alpha_f \mu_f + \alpha_g \mu_g \quad (10)$$

$$k_{eff} = \alpha_f k_f + \alpha_g k_g \quad (11)$$

$E_f$  و  $E_g$  بوسیله گرمای ویژه و دما به صورت زیر تعریف

میشوند:

$$E_f = C_{p,f} \cdot (T - 298.15) \quad (12)$$

$$E_g = C_{p,g} \cdot (T - 298.15) \quad (13)$$

۳-۳- انتقال جرم:

در این تحقیق، به دلیل تغییر فاز از مایع به بخار، انتقال جرم و انرژی صورت می گیرد، به همین دلیل از یک کد عددی استفاده شده است. لی (Lee) [۱] یک مدل انتقال جرم درباره فرآیندهای تبخیر و چگالش پیشنهاد کرد. در این مدل فرض می شود که تغییر فاز ثابت رخ می دهد.

مدل لی برای تغییر فاز: اگر  $T \geq T_{sat}$  بتدریج از فاز مایع کاسته شده و به فاز بخار اضافه می گردد و داریم:

$$s = c_f \alpha_f \rho_f \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (14)$$

و اگر  $T < T_{sat}$  در این حالت چگالش اتفاق می افتد و

بتدریج از فاز بخار کم و به فاز مایع افزوده می گردد.

$$s = c_g \alpha_g \rho_g \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (15)$$

که  $C_f$  و  $C_g$  ضرایب ثابتی هستند که روی همگرایی مساله تاثیر می گذارند. مقادیر بیش از حد بزرگ  $C_f$  و  $C_g$  منجر به مشکلات همگرایی می شود. در کار حاضر این ضرایب در  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  تنظیم شده اند.

### ۳-۴- انتقال انرژی:

انتقال حرارت بر اساس انتقال جرم به صورت زیر بدست

می آید:

$$Q = Sh_{fg} \quad (16)$$

### ۴- تحلیل عددی مساله:

در این تحقیق، جریان دوفازی مایع به بخار در کانال هائی با سطح مقطع دایروی با قطرهای مختلف و طول ۱ متر به صورت دوبعدی برای لوله عمودی و سه بعدی برای لوله افقی با دبی جرمی در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۷ کیلوگرم بر ثانیه مدل شده است. همانطور که قبلا اشاره کردیم، از تقریب اوایلر- اوایلر و روش جریان دوفازی حجم سیال برای مدل سازی استفاده کرده ایم. برای منفصل سازی جملات اندازه حرکت، انرژی و پخش از تقریب پرسو مرتبه دوم و برای فشار و کسر حجمی به ترتیب از Peresto و Modified HRSG استفاده شده است.

مدل چندفازی حجم سیال در فلونت ۶.۳ با رینولدزهای بالا با مدل آشفتگی SST K-W در این تحقیق بکار رفته است.

محاسبه شده بود مقایسه شد. همانطور که از شکل بالا مشخص است نتایج کار عددی حاضر جز در ناحیه ورودی همخونی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. ضریب انتقال حرارت در ناحیه ورودی دارای افت شدیدی شده است که در واقع از ناحیه شروع جوشش هسته ای تا ناحیه ای که جوشش فیلمی شروع می شود، چنین نوساناتی دور از انتظار نیست.

#### ۶- نتایج و بحث:

در این بخش نتایج حاصل از حل عددی کسر حجمی بخار و ضریب انتقال حرارت به ازای شار گرمی ها مختلف در دو دما مختلف مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

#### ۶-۱- بررسی تاثیر نرخ های گرمی جریان

دمای ورودی لوله در شکل (۵)  $583\text{ K}$  و در شکل (۶)  $400\text{ K}$  است با توجه به شکل های (۵) و (۶)، می توان به بررسی اثر تغییرات پارامتر کسر حجمی بخار به ازای نرخ های جریان گرمی مختلف در یک لوله با طول مشخص پرداخت. می توان گفت که با افزایش نرخ جریان گرمی در ورودی لوله، طول ناحیه جوشش جریان زیر سرد افزایش یافت و با تأخیر بیشتری وارد ناحیه جریان دو فازی شدیم، بطوریکه با افزایش نرخ جریان گرمی در ورودی لوله در شرایط یکسان، میزان کسر حجمی بخار در مقایسه با نرخ جریان گرمی کمتر در مرکز لوله کاهش یافت. با توجه به اینکه سطح مقطع ثابت است بنابراین افزایش یا کاهش نرخ جریان گرمی، مستقیماً بر سرعت جریان ورودی تأثیر گذاشته و سبب افزایش یا کاهش سرعت ورودی جریان شده است، در نتیجه منجر به افزایش یا کاهش طول ناحیه جوشش جریان زیر سرد شد، و با افزایش طول ناحیه جوشش جریان زیر سرد، کسر حجمی بخار در مرکز لوله کاهش یافت. با افزایش نرخ جریان گرمی و در نتیجه افزایش سرعت جریان ورودی، بر میزان ناپایداری و نوسانی شدن کسر حجمی

همچنین از طرح کوپلینگ پیرو با استفاده از ضرایب زیر تخفیف فشار ( $0/8$ )، چگالی ( $0/5$ )، نیروی حجمی ( $0/2$ )، اندازه حرکت ( $0/2$ )، انرژی جنبشی ( $0/2$ )، پراکندگی ( $0/2$ )، ویسکوزیته ( $0/3$ ) و انرژی ( $0/5$ ) استفاده شده است.

در شکل (۲) نمونه ای از هندسه لوله مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

#### ۵- الگوریتم حل و اعتبار یابی:

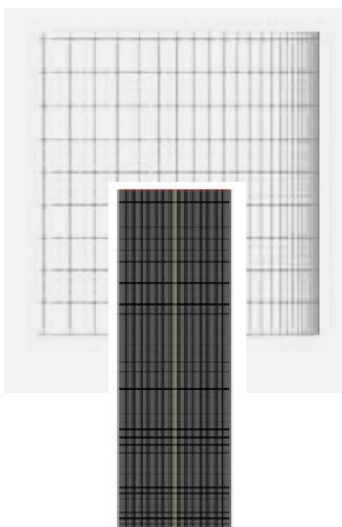
قبل از تحلیل و بررسی نتایج، باید از صحت آنها اطمینان حاصل شود، بنابراین میزان تطابق نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی موساد و همکاران در شکل زیر مقایسه شده است. یک سری آزمایش ها توسط موساد و همکارانش بر روی یک لوله عمودی بطول  $0/28$  متر و قطر  $12$  میلی متر با ضخامت دیواره  $3$  میلی متر انجام گرفت و جریان رو به بالای آب در فشار آتمسفر برای بررسی خواص انتقال گرما در ناحیه زیر سرد در نظر گرفته شد. دقت ضریب انتقال گرما در این آزمایش ها  $7\%$  تخمین زده شده است. در این آزمایش ها اثر عوامل مختلف مانند تغییر شار گرمی، دمای دیواره و اختلاف دمای دیواره با دمای ورودی روی ضریب انتقال حرارت شار گرمایی بررسی شده است. حدود شار گرمی بین  $50-500\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$  و درجه حرارت ورودی بین  $30-0$  کلوین است. ماده مورد استفاده در این آزمایش دارای مقاومت در مقابل اکسیداسیون و خوردگی است.

موساد و همکارانش ضریب انتقال حرارت را به ازای اختلاف دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اختلاف دما ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. کاهش ضریب انتقال حرارت در طول لوله نشان دهنده رشد بخار است. مقایسه دیگری صورت گرفت که در آن ضریب انتقال حرارت بدست آمده از حل عددی در طول لوله با مقادیر بدست آمده از روابط که توسط موساد و همکارانش

Nuclear Engineering and Design, (2005), Vol. 235, pp. 53-65.

- [5] "Fluent 6.3 User's Guide" Fluent Inc., (2006).
- [6] Moreno, R., "Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model". Journal of Heat and Fluid Flow, (2007), Vol. 28, pp. 1060-1072.
- [7] Zambrana, J., Teresa, Leo, J., "Vertical tube length calculation based on available heat transfer coefficient expressions for the subcooled flow boiling region". Applied Thermal Engineering, (2008), Vol. 28, pp. 499-513.
- [8] Saffari, H., Ghobadi, M., "Calculation of Convective Boiling in a Vertical Tube at Sub-atmospheric Pressures". Australian Journal of Basic and Applied Sciences, (2010), Vol. 4(5), pp. 687-697.

[۹] وطنی، علی، سعادت، سعید، "اصول طراحی هیدرولیکی خطوط لوله انتقال جریانهای دوفازی" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران، چاپ چهارم، پاییز ۱۳۸۹.



شکل (۱) - شبکه محاسباتی برای لوله عمودی به صورت دوبعدی

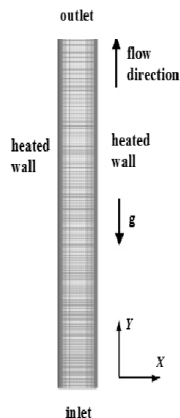
بخار افزوده شده است، بطوریکه تغییر ناگهانی خواص هدایت گرمایی فازهای مایع و بخار روی سطح دیواره لوله بدلیل مکانیزم تشکیل حباب روی سطح، خود نیز عاملی برای تشدید نوسان بوده است. نمودار ضریب انتقال حرارت نیز بر حسب شار جرمی در شکل (۵) نشان داده شده است. رفتار ضریب انتقال حرارت نیز در طول لوله برعکس کسر حجمی بخار است، یعنی با رشد بخار ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد.

#### ۷- نتیجه گیری

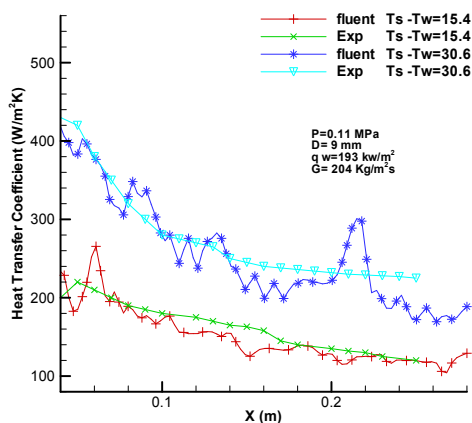
در این تحقیق ضمن ارائه اهم تحقیق در مورد رفتار جریان دوفازی در داخل لوله های عمودی، کسر حجمی بخار و ضریب انتقال حرارت به ازای شار جرمی و نتایج در نمودارهایی ثبت شد. این نتیجه حاصل شد که به ازای شار جرمی ورودی بیشتر، میزان کسر حجمی بخار روی محور کمتر شده و ضریب انتقال حرارت دیواره افزایش می یابد. همچنین با بررسی کسر حجمی بخار در دو دما و فشار مختلف این نتیجه حاصل شد که که میزان کسر حجمی بخار در دما و فشار پایین تر بیشتر است.

#### ۸- مراجع

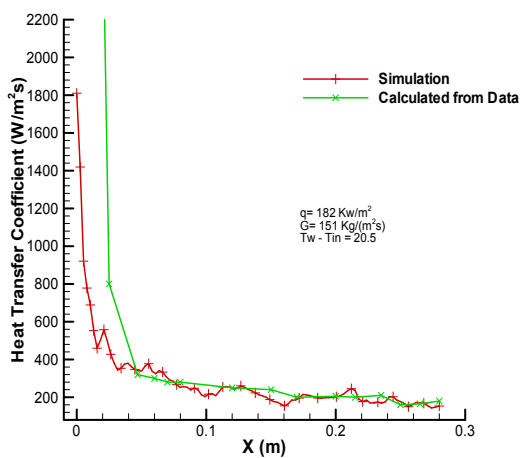
- [1] Lee, W.H., 1980. "A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling". In: Veziroglu, T.N. (Ed.), Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications. Hemisphere Publishing, Washington, D.C.
- [2] Rivera, W., Best, R., "Boiling heat transfer coefficients inside a vertical smooth tube for water/ammonia and ammonia/lithium nitrate mixtures". Journal of Heat and Mass Transfer, (1999), Vol. 42, pp. 905-921.
- [3] Chen, L., Huo, X., "Flow boiling and flow regimes in small diameter tubes," Applied Thermal Engineering, (2004), Vol. 24, pp. 1225-1239.
- [4] Leung, L.K.H., Groeneveld, D.C., "Pressure drops for steam and water flow in heated tubes".



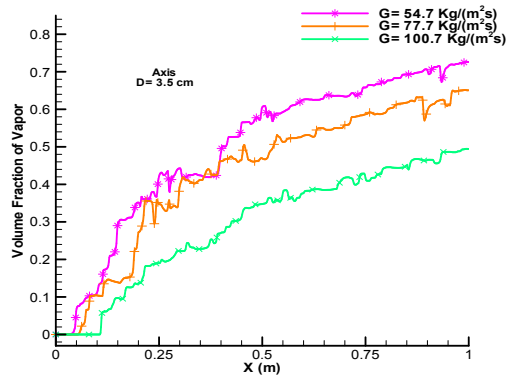
شکل (۲): شکل هندسی برای لوله عمودی به صورت دوبعدی



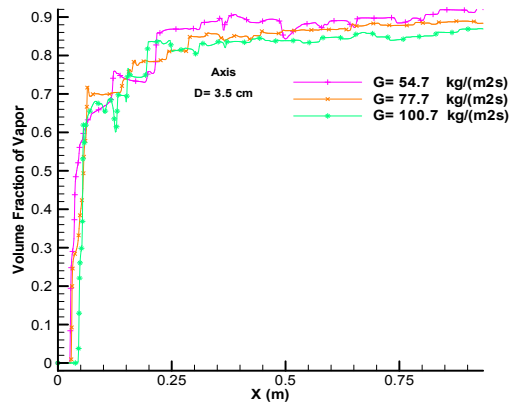
شکل (۳): مقایسه ضریب انتقال حرارت نتایج آزمایشگاهی با داده های عددی



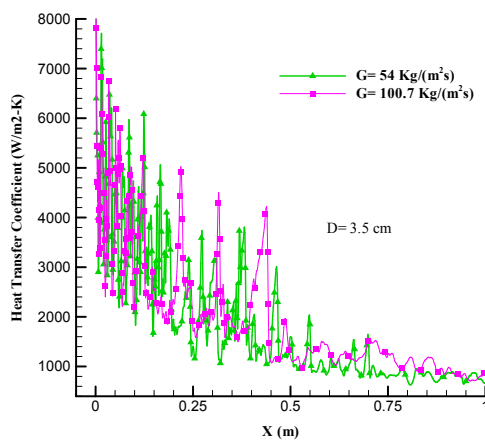
شکل (۴) - مقایسه ضریب انتقال حرارت نتایج آزمایشگاهی با داده های عددی



شکل (۵): اثر نرخ جرمی جریان بر کسر حجمی بخار روی محور لوله عمودی در دمای ۵۸۳ K



شکل (۶): اثر نرخ های جرمی جریان بر کسر حجمی بخار روی محور لوله عمودی در دمای ۴۰۰ K



شکل (۷) - اثر نرخ های جرمی جریان بر ضریب انتقال حرارت دیواره