

افت فشار در جوشش جابجائی R-134a داخل لوله های افقی مارپیچ

محمد علی اخوان بهابادی¹، فرزین ملاقاسم شمیرانی²

¹دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی-دانشگاه تهران؛ Akhavan@ut.ac.ir
²دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی-دانشگاه تهران farzin.shemirani@gmail.com

چکیده

تهویه مطبوع، تبرید، راکتورهای شیمیایی و صنایع غذایی و لبنی اشاره کرد. مزیت لوله های مارپیچ نسبت به لوله مستقیم نرخ انتقال حرارت بیشتر آنها می باشد ولیکن لوله های مارپیچ با افزایش افت فشار، بطور غیر مستقیم باعث مصرف انرژی بیشتر می شوند. بنابراین لازم است در زمینه افت فشار جریان داخل لوله مارپیچ و مقایسه آن با افت فشار لوله مشابه مستقیم نیز بررسی و مطالعه شود ویژگی های افت فشار در حین چگالش لوله های مارپیچ توسط محققین بسیاری بررسی شده است. این در حالی است که تاکنون به افت فشار جوششی درون لوله های مارپیچ توجه چندانی نشده است. بنابراین در این تحقیق افت فشار در جوشش جابجائی R-134a داخل لوله های افقی مارپیچ و مستقیم به صورت تجربی مورد بررسی قرار می گیرد.

ژاو و همکاران (2003) [1] به بررسی افت فشار و ویژگی های انتقال حرارت مایع و بخار آب در جریان دو فاز در لوله های مارپیچ افقی کوچک پرداختند. آنها آزمایشات خود را بر روی کویل با قطر 292 میلیمتر و قطر لوله 9 میلیمتر انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقدار انتقال حرارت جوششی به میزان سرعت جرمی و شار حرارتی وابستگی دارد و این دلالت بر این دارد که هر دو مکانیزم انتقال حرارت هسته ای و جابجایی نقش مهمی در انتقال حرارت جوششی لوله مارپیچ کوچک دارند، بر خلاف آنچه در لوله مارپیچ با قطر کویل بزرگ دیده می شود. آنها همچنین مشاهده کردند که افت فشار اصطکاکی نه تنها به کیفیت بخار و فشار بستگی دارد، بلکه به دبی جرمی هم بستگی دارد. آنها روابطی برای افت فشار و ضریب انتقال حرارت در این لوله ها ارائه کردند.

کولرآدو- گاریدو و همکاران (2008) [2] 0 به بررسی جوشش آب در یک اوپراتور مارپیچ دو لوله ای عمودی به صورت عددی پرداختند و نتایج خود را با داده های آزمایشگاهی صحه گذاری کردند. سیال تحت بررسی آنها در قسمت آزمایشگاهی آب با غلظتهای متفاوت از LiBr می باشد که این ترکیبات مربوط به فرآیند خالص سازی آب است. فرضیات آنها بدین شرح بود که سیال را آب، خواص را تابعی از طول لوله و زمان، تشعشع را ناچیز، هدایت حرارت محوری را ناچیز و هندسه و زبری سطح را ثابت در نظر گرفتند. سپس آنها نتایج عددی خود را با ضرایب انتقال حرارت و ضرایب تصحیح افت فشار بدست آمده از محققان قبلی مقایسه نمودند. در ناحیه تک فاز برای جریان آرام از ضریب اصطکاک پیشنهاد شده

این مقاله به بررسی افت فشار جریان جوششی مبرد R-134a در اوپراتورهای مستقیم و مارپیچ افقی می پردازد. اوپراتور مارپیچ تحت بررسی یک تبادل گر حرارتی دو لوله ای هم محور به شکل کویل مارپیچ (فتری) با قطر کویل 305 mm، ارتفاع کویل 270 mm و گام کویل 45 mm می باشد. لوله داخلی کویل از جنس مس با قطر خارجی 9/52 میلیمتر، ضخامت 0/62 میلیمتر و طول 5/78 متر می باشد. قطر داخلی لوله خارجی نیز 29 میلیمتر است. مبرد R-134a جاری در لوله داخلی بوسیله آب گرمی که در قسمت حلقوی و در جهت مخالف جریان دارد، تبخیر می شود. کیفیت بخار ورودی اوپراتور از 0/1 تا 0/8 تغییر می کند و آزمایشات در سه سرعت جرمی متفاوت $112, 132$ و 152 kg/m^2s می شود. هندسه تبادل گر حرارتی دو لوله ای مستقیم و شرایط کارکردی آن عیناً مشابه تبدیل گر مارپیچ می باشد، با این تفاوت که طول آن 1/2 متر است. بررسی و تحلیل نتایج حاکی از آن است که افت فشار اصطکاکی لوله مارپیچ افقی از لوله مستقیم افقی بیشتر بوده و افت فشار اصطکاکی دو فازی با افزایش کیفیت بخار و سرعت جرمی مبرد افزایش می یابد. استفاده از لوله مارپیچ، گرادیان فشار را نسبت به لوله مستقیم به طور متوسط تا 100٪ افزایش می دهد.

کلمات کلیدی: افت فشار، جوشش، لوله های مارپیچ

مقدمه

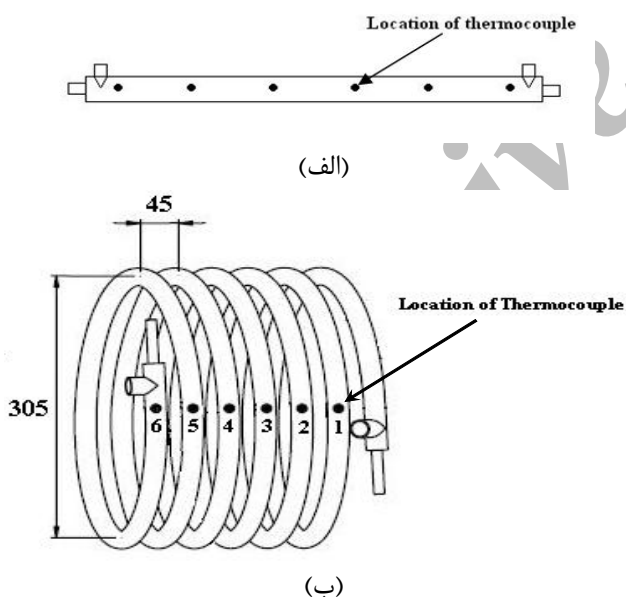
وظیفه اصلی لایه اوزون موجود در استراتوسفر، جذب اشعه کشنده فرابنفش ساطع شده از خورشید می باشد. به همین دلیل است که از بین رفتن لایه اوزون در حال تبدیل شدن به یکی از اصلی ترین نگرانی های بشر است. اصلی ترین عامل این پدیده آزاد شدن مقادیر زیاد CFC می باشد، به این دلیل که این ترکیبات قابلیت تبدیل کردن اوزون به اکسیژن و از بین بردن لایه اوزون را دارا می باشند. از این رو است که ادامه کاربرد CFC ها به عنوان مبرد ممنوع شده است. از آنجا که مبرد R134a مخرب لایه اوزون نیست و خواص ترموفیزیکی آن بسیار شبیه به CFC های متداول دارد، بهترین انتخاب برای جایگزینی آن هاست. بنابراین نیاز به بررسی هر چه بیشتر خواص R134a نمود پیدا می کند.

از طرفی لوله های مارپیچ به عنوان یکی از روش های غیر فعال افزایش انتقال حرارت شناخته شده اند و به علت حجم کم و ضریب انتقال حرارت بالا به طور گسترده ای در صنایع مختلف به کار می روند. از کاربردهای این نوع لوله ها می توان به کاربرد در سیستم های

¹ validation

کالیبره شده با دقت 2kPa اندازه گیری می شود. از آنجا که طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تست اوپراتور قابل حصول می باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه ای طراحی شده است که کیفیت های متفاوت بخار، در ورود به تست اوپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک پیش اوپراتور در بین شیر انبساط و تست اوپراتور محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به المنت های حرارتی بر روی پیش اوپراتور می توان کیفیت بخار را در ورود به تست اوپراتور تنظیم کرد. جهت حرارت دهی برای جوشش مبرد در تست اوپراتور از یک چرخه جداگانه آب گرم استفاده گردیده است. به علاوه جهت جوشش (تبخیر) کامل مبرد از اوپراتور ثانویه بعد از تست اوپراتور استفاده شده است.

برای جلوگیری از اتلاف حرارت به محیط، مجموعه هر سه اوپراتور به طور کامل عایق شده اند. ترمو کوپل های استفاده شده از نوع سری T بوده که با دقت $0/1^{\circ}\text{C}$ کالیبره شده اند. برای اندازه گیری افت فشار جریان عبوری از تست اوپراتور، از یک دستگاه اندازه گیری اختلاف فشار که قادر به اندازه گیری افت فشار تا 3 bar بوده و برای 0 تا 150 kPa توسط شرکت سازنده کالیبره گردیده است، استفاده شد. نمای شماتیک تست اوپراتورهای مستقیم و مارپیچ در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1: نمای شماتیک لوله تحت آزمایش، (الف) لوله مستقیم (ب) لوله مارپیچ

شیوه محاسبه

کیفیت بخار. کیفیت موضعی بخار در ورود و خروج از اوپراتور اولیه و تست اوپراتور همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است به صورت زیر محاسبه می شود.

توسط اشمیت¹ و در ناحیه مغشوش از ضریب اصطکاک پیشنهادی ایتو² استفاده شد. برای انتقال حرارت از عدد نوسلت پیشنهادی چرچیل برای ناحیه آرام در لوله مارپیچ و در ناحیه مغشوش از رابطه سباس³ و مکلاکلین⁴ استفاده گردید. در مورد جریان دو فاز آنها از فرمول ضریب وید پیشنهادی روحانی و اکسلسن و ضریب تصحیح دو فازی فریدل استفاده کرده و ضریب انتقال حرارت را توسط رابطه کزکی⁵ محاسبه نمودند. آنها برای نتایج خود رابطه ای ارائه نکردند. وونگوایز و پولسونگگرام (2006) ضرایب انتقال حرارت دو فازی و افت فشار R-134a را حین تبخیر در مبدل مارپیچ دو لوله ای هم مرکز به صورت آزمایشگاهی بدست آوردند. طول لوله مارپیچ آنها 5/8 متر بود. مبرد در داخل لوله و آب گرم به دور آن در قسمت حلقوی جریان داشت. جنس لوله داخلی از مس به قطرهای خارجی و داخلی 9/52 mm و 8/28 mm و قطر کوپل آنها 305 mm بود. آزمایشات آنها در دمای اشباع میانگین بین 10°C و 20°C انجام گردید. همچنین سرعت های جرمی مبرد آنها از 400 تا $800\text{kg/m}^2\text{s}$ تغییر می کرد. شار حرارتی دیواره نیز محدوده تغییراتی از 5 تا 10kW/m^2 داشت. آنها کیفیت بخار ورودی به لوله آزمایش را توسط دما و فشار بدست آمده از آزمایش محاسبه کرده و تأثیر شار حرارتی، سرعت جرمی و دمای تبخیر را بر ضرایب انتقال حرارت و افت فشار جوششی لوله مارپیچ بررسی کردند. تحقیقات آنها نشان داد که افت فشار لوله مارپیچ با افزایش کیفیت بخار میانگین، سرعت جرمی و شار حرارتی افزایش می یابد و در عوض افزایش دمای اشباع تبخیر از افت فشار می کاهد. مقایسه داده های آنها با دیگر محققان نشان داد که افت فشار اصطکاکی مبدل آنها از 10٪ تا 73٪ از مبدل مستقیم متناظر بیشتر بوده است. همچنین آنها محل خشک شدگی جزئی را در کیفیت بخار بالاتری نسبت به لوله صاف حدس زدند.

دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد نیاز می باشد. در مطالعه حاضر تست اوپراتورهای دستگاه آزمایش شامل مبدل های حرارتی دو لوله ای مستقیم و مارپیچ می باشد، لوله داخلی یک لوله مسی با قطر داخلی 8/3 mm و قطر خارجی 9/52 mm و طول 1200 mm برای لوله مستقیم و طول کل 5870 mm برای لوله مارپیچ می باشد که مبرد R-134a از درون آن عبور می کند. لوله خارجی یک لوله فولادی با قطر داخلی 29 mm و قطر خارجی 34 mm می باشد. آب گرم از درون قسمت حلقوی تست اوپراتور عبور می کند. اوپراتور مارپیچ یک تبادل گر دو لوله ای به شکل کوپل مارپیچ (فتری) با قطر کوپل 305 mm، طول کوپل 270 mm و گام کوپل 45 mm می باشد. فشار مبرد در ورودی و خروجی تست اوپراتور توسط فشار سنج های

¹ Schmidt

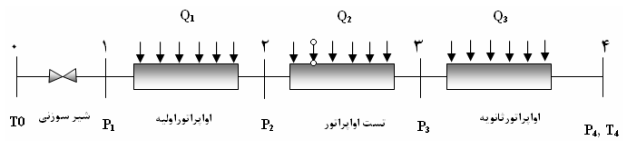
² Ito

³ Sebas

⁴ Mclaughlin

⁵ Kozeki

1- با توجه به دمای (T_o) اندازه‌گیری شده در قبل از شیر سوزنی مقدار آنتالپی مربوطه از جدول R-134a در حالت مادون سرد خوانده می‌شود ($h_o = h_f$).



شکل 2: نمودار جریان عبوری از شیر سوزنی و اوپراتور ها

2- با توجه به فشار (P_1) اندازه‌گیری شده در بعد از شیر سوزنی مقادیر (h_{f1} , h_{g1}) حالت دو فاز از جدول مربوط بدست می‌آید. آنگاه با استفاده از رابطه آنتالپی ثابت دو سر شیر سوزنی، مقدار کیفیت بخار ورود به اوپراتور اولیه حاصل می‌گردد:

$$h_1 = h_o \quad (1)$$

$$h_1 = h_{f1} + x_1 (h_{g1} - h_{f1}) \Rightarrow x_1 = \frac{h_1 - h_{f1}}{h_{fg1}} \quad (2)$$

3- با توجه به مقدار Q داده شده به اوپراتور اولیه و تست اوپراتور، مقدار کیفیت بخار در ورود و خروج تست اوپراتور به صورت زیر محاسبه می‌شود.

کیفیت ورودی به تست اوپراتور:

$$h_2 - h_1 = \Delta h_1 = \frac{Q_1 \eta}{\dot{m}} \Rightarrow x_2 = \frac{h_1 + \Delta h_1 - h_{f2}}{h_{fg2}} \quad (3)$$

کیفیت خروجی از تست اوپراتور:

$$h_3 - h_2 = \Delta h_2 = \frac{Q_2 \eta}{\dot{m}} \Rightarrow x_3 = \frac{h_2 + \Delta h_2 - h_{f3}}{h_{fg3}} \quad (4)$$

کیفیت بخار متوسط تست اوپراتور، میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی آن خواهد بود:

$$x_{ave} = \frac{x_2 + x_3}{2} \quad (5)$$

افت فشار. مقدار کل افت فشار ایجاد شده در تست اوپراتور (ΔP_{tot}) توسط دستگاه اندازه‌گیری افت فشار قرائت می‌شود. این مقدار متشکل از سه ترم افت فشار اصطکاکی ΔP_{fri} ، افت فشار در اثر تغییر ممنتوم ΔP_{mom} و افت فشار استاتیکی ΔP_{sta} می‌باشد (4).

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{fri} + \Delta P_{mom} + \Delta P_{sta} \quad (1)$$

افت فشار ناشی از تغییر ارتفاع توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta P_{sta} = gL \sin \theta (\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l) \quad (2)$$

در این تحقیق به علت آنکه زاویه جهت گیری صفر است، میزان افت فشار استاتیکی صفر می‌باشد. افت فشار ناشی از سرعت در لوله بوسیله معادله (3) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta P_{mom} = G_t^2 \times \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_f (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_f (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right]_{in} \right\} \quad (3)$$

که α ضریب وُید بوده و با استفاده از فرمول ارائه شده توسط استینر¹ به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \times \left[(1 + 0.12(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_f} \right) + \frac{1.18(1-x) [g \sigma (\rho_f - \rho_g)]^{0.25}}{G_t^2 \rho_f^{0.5}} \right]^{-1} \quad (4)$$

بنابراین برای محاسبه افت فشار اصطکاکی کافی است طبق معادله (1)، مقدار افت فشار ناشی از تغییر ارتفاع و تغییر ممنتوم بدست آمده از معادلات (2) و (3) را از مقادیر افت فشار قرائت شده توسط دستگاه اندازه‌گیری افت فشار کم کرده تا میزان افت فشار اصطکاکی داخل تست اوپراتور بدست آید.

بررسی نتایج

در شکل 2 به منظور بارز نمودن اثر سرعت جرمی در لوله‌های مستقیم افقی، نمودارهای افت فشار بر حسب کیفیت بخار رسم شده است. شکل 2 عموماً نشان دهنده این موضوع است که اگر سایر شرایط بدون تغییر باقی بماند، افت فشار با افزایش سرعت جرمی، زیاد می‌شود. این امر با توجه به رابطه مستقیمی که بین افزایش سرعت جرمی با افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش افت فشار وجود دارد، قابل توجیه می‌باشد (رابطه زیر).

$$\Delta P (\pi r^2) = \tau 2\pi r L \rightarrow \Delta p = \frac{2\tau L}{r} \quad (5)$$

ویژگی شکل 2 این است که در سرعت جرمی یکسان، اثر افزایش فشار افت با افزایش کیفیت بخار بسیار چشمگیر است. رفتار مشابهی نیز توسط دیدی و همکارانش (2002) [5] مشاهده شده است. این پدیده بدین سبب است که با افزایش کیفیت بخار، مقدار دانسیته جریان (ρ) کاهش یافته و طبق رابطه بقای جرم باعث افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می‌شود. از طرفی با افزایش کیفیت بخار، سرعت نسبی بین فاز مایع و گاز نیز زیاد شده که منجر به افزایش نیروی برشی در سطح مشترک آن دو و در نتیجه باعث افزایش بیشتر میزان افت فشار می‌گردد.

تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله‌های مارپیچ در سرعت جرمی‌های متفاوت در شکل 3 نشان داده شده است. با مشاهده شکل 3 می‌توان نتیجه گرفت که افت فشار با افزایش سرعت جرمی و ثابت ماندن سایر پارامترها افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند به این دلیل باشد که افزایش سرعت جرمی سرعت جریان دو

¹ Steiner

کم تنها در دو حالت رخ می‌دهد، یکی در سرعت جرمی $112 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار $0/26$ ، به مقدار 46% و دیگری در سرعت جرمی $132 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار $0/81$ و به مقدار 47% می‌باشد.

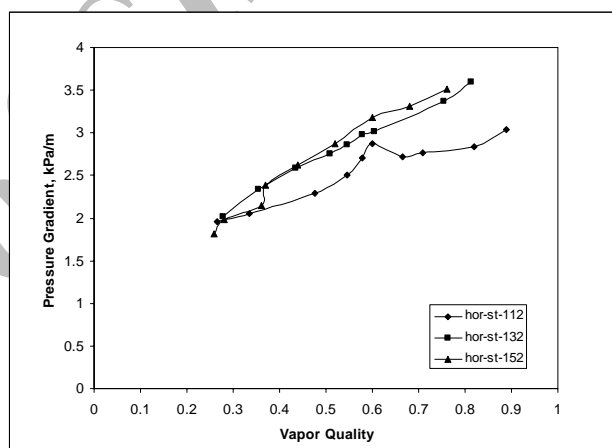
نتیجه گیری

1. در لوله‌های مارپیچ و مستقیم به طور کلی با افزایش کیفیت بخار و سرعت جرمی، افت فشار افزایش می‌یابد. این پدیده به علت تأثیر جریان ثانویه و افزایش تنش برشی میان فازی و تغییر الگوی جریان به الگوی حلقوی می‌باشد.
2. کمترین مقدار افزایش افت فشار لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم در حالت افقی رخ می‌دهد. این افزایش کم تنها در دو حالت رخ می‌دهد، یکی در سرعت جرمی $112 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار $0/26$ ، به مقدار 46% و دیگری در سرعت جرمی $132 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار $0/81$ و به مقدار 47% می‌باشد.
3. استفاده از لوله مارپیچ گرادیان فشار را نسبت به لوله مستقیم به طور متوسط تا 100% افزایش می‌دهد.

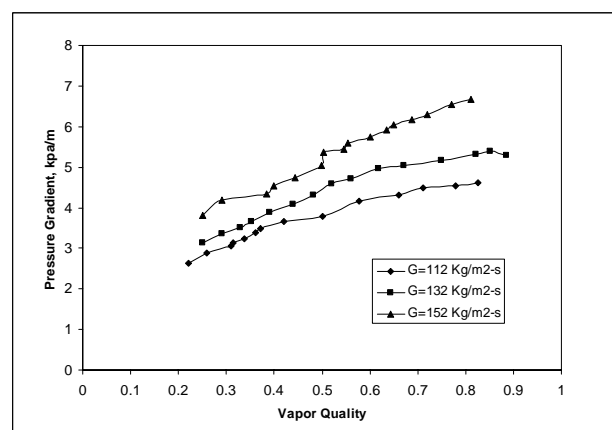
مراجع

- [1]- Zhao, L., Guo, L., Bai, B., Yucheng Hou, Ximin Zhang, "Convective boiling heat transfer and two-phase flow characteristics inside a small horizontal helically coiled tubing once-through steam generator", International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 46, Issue 25, December 2003, pp. 4779-4788
- [2]- Colorado-Garrido, D., Santoyo-Castelazo, E. Hernandez, J.A., Garcia-Valladares, O., Siqueiros, J. Juarez-Romero, D., "Heat transfer of a helical double pipe vertical evaporator: Theoretical analysis and experimental validation", Applied Energy, (2008).
- [3]- Wongwises, S., and Polsongkram, M., "Evaporation heat transfer and pressure drop of HFC-134a in a helically coiled concentric tube-in-tube heat exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, 2006, PP. 658-670.
- [4]- Collier, J., and Thome, J., "Convective Boiling and Condensation" Oxford University Press, 1994.
- [5]- Ould Didi, M.B., Kattan, N., Thome, J.R., "Prediction of Two-Phase Pressure Gradients of Refrigerants in Horizontal Tubes," Int. J. Refrigeration, Vol.25, 2002, PP.935-944.
- [6]- جمالی، مسعود، 2006 (1385) "بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت و افت فشار در جوشش اجباری R-134a با استفاده از نوار پیچیده شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- [7]- Berthoud, G., Jayanti, S., "Characterization of dryout in helical coils", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 7, 1990, PP. 1451-1463.

فازی را شتاب می‌دهد که باعث تشدید جریان ثانویه می‌شود. در نتیجه میزان پاشیده شدن قطرات و انباشته شدن مجدد آن‌ها به علت اثرات ثانویه افزایش می‌یابد. در فشارهای پائین (نسبت به فشار بحرانی که $40/56 \text{ bar}$ می‌باشد)، چگالی بخار از چگالی مایع بسیار کمتر است که با ثابت نگاهداشتن باقی پارامترها، این امر موجب سرعت‌های ظاهری بالا در فاز بخار می‌شود. این سرعت ظاهری بالا نیز به نوبه خود نرخ پاشش قطرات را افزایش می‌دهد (به علت تنش‌های برشی بزرگ میان فازی). همزمان نرخ انباشته شدن مجدد قطرات نیز زیاد می‌شود (به علت افزوده شدن نیروی جانب مرکز اعمالی به قطرات پاشیده شده). همچنین با افزوده شدن سرعت فاز بخار، گردابه جریان ثانویه به سمت سطح داخلی لوله جابجا می‌شود. این جابجایی باعث تمایل بیشتر جریان‌های ثانویه فاز بخار برای انتقال مایع داخل لوله از سطح خارجی به سطح داخلی کوئل می‌شود. تمامی موارد مذکور باعث افزایش افت فشار در سرعت‌های جرمی بالاتر می‌گردد.



شکل 2: گرادیان فشار در لوله مستقیم افقی در سرعت‌های جرمی متفاوت



شکل 3: مقایسه افت فشار در لوله مارپیچ افقی در سرعت جرمی‌های متفاوت

از مقایسه شکل‌های 2 و 3 مشاهده می‌شود که استفاده از لوله مارپیچ گرادیان فشار را نسبت به لوله مستقیم به طور متوسط تا 100% افزایش می‌دهد. کمترین مقدار افزایش افت فشار لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم در حالت افقی رخ می‌دهد. این افزایش