

تأثیر استفاده از نانو سیال در رفتار گرمایی جوش آورهای ترموسیفون عمودی

آدینه کاظمی

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۴۵۱۵ - ۷۷۵

محمدرضا جعفری نصر*⁺

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده: افزایش طول منطقه مایع متراکم در مبدل‌های ترموسیفونی و کاهش ضریب انتقال حرارت به همراه تغییر دما در لوله‌ها و در نهایت تشکیل رسوب از اصلی‌ترین مشکلات مبدل‌های ترموسیفونی است. یکی از روش‌های موفق در حل این مشکل‌ها، استفاده از نانو سیال‌های مناسب است. در این مقاله به بررسی اثر استفاده از نانو سیال در این نوع سامانه‌های گرمایی پرداخته شده است و با استفاده از شبیه‌سازی یک مبدل ترموسیفونی با هندسه مشخص، تأثیر استفاده از نانو سیال بر عملکرد گرمایی و طول منطقه مایع متراکم مورد مطالعه قرار گرفته است. نتیجه این مطالعه به خوبی نشان می‌دهد که چگونه ضریب انتقال گرما با افزایش غلظت نانو سیال افزایش یافته و سرانجام، افزون بر کاهش سطح انتقال گرمایی لازم و کوچک‌تر شدن اندازه مبدل، طول منطقه مایع متراکم نیز کاهش داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مبدل گرمایی؛ ترموسیفون؛ انتقال گرما؛ نانو سیال؛ ضریب انتقال گرما؛ منطقه مایع متراکم.

KEY WORDS: Heat exchanger; Thermosyphon; Heat transfer; Nanofluid; Heat transfer coefficient; Subcool length.

مقدمه

طول منطقه مایع متراکم در جوش آورها از فشار عملکرد جوش آور و شار گرمایی آن پیروی می‌نماید. به طوری که در فشارها و سطوح بالای شار گرمایی، طول این ناحیه به نسبت کوتاه است. از سویی امروزه تلاش می‌شود تا با اعمال فناوری‌هایی از طول این منطقه به گونه‌ای کاسته شود. یکی از روش‌های مؤثر، استفاده از روش‌های بهبود انتقال گرما مانند نصب وسایل آشفته ساز در سمت لوله‌های این نوع مبدل‌هاست که در مرجع [۱] بررسی شده است.

نانو سیال یک مخلوط کلئیدی است که ذره‌هایی در اندازه‌های نانو در یک سیال پایه معلق است. این نانو ذره‌ها از جنس فلز یا

جوش آورهای ترموسیفونی به عنوان سامانه‌های مؤثر بدون پمپ به صورت گسترده‌ای در صنایع به کار می‌روند. در بیش از ۷۰٪ زمان‌هایی که در صنایع به تبخیر نیاز است از این نوع مبدل‌ها استفاده می‌شود. فشار هیدرواستاتیکی موجود در قسمت ورودی جوش آورهای ترموسیفونی مانع از جوشش می‌شود و منطقه مایع متراکم را در قسمت ورودی صفحه لوله‌ها پدید می‌آورد. از آنجایی که میزان ضریب انتقال حرارت جوششی به طور مشخصی بزرگ‌تر از ضریب‌های جابه‌جایی تک فازی است، در نتیجه متوسط ضریب انتقال گرما در سمت لوله در نهایت کاهش می‌یابد.

+E-mail: nasrnrj@ripi.ir

*عهدہ دار مکاتبات

جدول ۱- ویژگی‌های هندسه جوش آور ترموسیفون شبیه‌سازی شده [۳].

۳۲۳,۸۰	قطر خارجی (میلی‌متر)	پوسته
۳۱۴,۶۶	قطر داخلی (میلی‌متر)	
۳۰,۶۳	طول منطقه انتقال حرارت (میلی‌متر)	
۲۵,۴۰	قطر خارجی (میلی‌متر)	لوله
۲,۷۷	ضخامت لوله (میلی‌متر)	
۱۹,۸۶	قطر داخلی (میلی‌متر)	
۳۱۳,۵	طول لوله (میلی‌متر)	
۳۰,۶۳	طول منطقه انتقال گرما (میلی‌متر)	
۵۰	تعداد لوله	
۳۱,۷۵	فاصله دو مرکز لوله (میلی‌متر)	
۳	یک تکه ای (عدد)	باقل

جوش آور ترموسیفون عمودی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار در فشار ۱ بار با بازه‌ی گرمای داده‌شده به جوش آور به مقدار ۷۶۰-۳۰ کیلووات و آب درون لوله‌ها به‌عنوان سیال سرد و بخار درون پوسته به‌عنوان سیال گرم بخار نظر گرفته شده است. شایان یادآوری است که تغییرهای ضریب انتقال گرمای کلی بر اساس گرمای داده‌شده به سامانه با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده در پژوهش‌های انجام شده در دانشگاه مورتن توسط بنسن^(۱) و پیتر هگز^(۲) در سال ۲۰۰۴ میلادی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [۳].

با توجه به اینکه نرم‌افزار در بازه‌ی ۷۶۰ تا ۱۱۰ کیلووات شبیه‌سازی شده است، گرمای داده‌شده به جوش آور دارای اختلاف کمی با داده‌های تجربی است (شکل شماره ۳). هندسه جوش آور و کلیه شرایط مرزی اولیه از جمله گرمای داده‌شده به میزان ۴۸۰ کیلووات به سامانه، فشار اولیه و میزان شدت جریان در کلیه شبیه‌سازی‌ها یکسان در نظر گرفته شده است و تنها سیال سرد به سیکلوهگزان و سیال‌های گرم آن به نانو سیال با غلظت‌های گوناگون شبیه‌سازی و تأثیرهای به دست آمده بر روی عملکرد گرمایی مبدل مورد بررسی قرار گرفته شده است.

سیال گرم درون پوسته، نانو سیال‌های Al_2O_3 - آب [۴]، MWCNT - آب^(۴) [۲] و CuO - آب و پروپیلن گلیکول (۳۰:۷۰) [۵] در سه غلظت متفاوت ۰,۱٪، ۰,۲٪ و ۰,۵٪

اکسید فلزها هستند که اغلب کرومی یا استوانه‌ای شکل هستند. سیال پایه متداول آب، روغن موتور و اتیلن گلیکول هستند که دارای انتقال گرمایی پایینی بوده و هدف افزودن نانو ذره‌ها بهبود ویژگی‌های انتقال گرمای این سیال‌ها است.

وجود نانو ذره‌ها در یک سیال پایه باعث افزایش سطح تماس، ظرفیت گرمایی، هدایت گرمایی، برهم‌کنش میان ذره‌ها و سطح عبور جریان در سیال می‌شود و در شرایط برابر انتقال گرما نانو سیال‌ها در مقایسه با سیال‌های خالص توان پمپ کمتری نیاز خواهند داشت. احتمال انباشته شدن ذره‌ها و ته‌نشین شدن ذره‌ها در اندازه‌های نانو بسیار ناچیز بوده و در نتیجه باعث کاهش هرچه بیشتر رسوب و زمان نگهداشت بیش‌تر این وسایل در سرویس خواهد شد [۲] و از برتری‌های مهم این نانو سیال‌ها افزایش چشم‌گیر ضریب انتقال گرما و همچنین ضریب جابه‌جایی انتقال گرما بدون افزایش چشمگیر در افت فشار است.

شبیه‌سازی جوش آور ترموسیفون عمودی

در این شبیه‌سازی با کمک از نرم‌افزار HTRI، مبدل ترموسیفون عمودی طراحی شده در آزمایشگاه مورتن^(۱) دانشگاه منچستر انگلستان شبیه‌سازی شد. هندسه و ویژگی‌های این جوش آور ترموسیفونی در جدول ۱ و شکل‌های ۱ و ۲ داده شده است.

(۱) Morton Lab, Chemical Engineering Department, Manchester, UK (۳) J.P. Heggs

(۲) H.R.S Benson

(۴) Multi wall carbon nanofluid

برای گرم کردن سیال سرد درون لوله که سیکلوهگزان است در شبیه‌ساز قرار گرفته است. در مطالعه‌های تجربی صورت گرفته شده میزان تأثیر افزودن نانو ذره‌ها در سیال پایه برای کلیه نانو سیال‌ها در دمای بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بر روی ویژگی‌هایی همچون هدایت گرمایی، ویسکوزیته، دانسیته و ظرفیت گرمایی محاسبه شده‌است و در این بررسی همه مورد‌های یاد شده لحاظ شده‌است و غلظت نانو سیال به عنوان یک پارامتر ورودی برای محاسبه ضریب‌های انتقال گرما در نظر گرفته شده است. به فرض اینکه نانو سیال‌ها در طول فرایند حالت تک فازی خود را حفظ می‌کنند شبیه‌سازی‌ها صورت پذیرفته است [۵، ۴، ۲].

نتیجه‌ها و بحث

الف) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سمت پوسته

شکل ۴ میزان تأثیر غلظت نانو سیال‌ها بر روی انتقال گرما جابه‌جایی سمت پوسته را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش غلظت نانو سیال میزان انتقال گرما جابه‌جایی سمت پوسته افزایش یافته است. ضریب انتقال گرمای سیال داخل پوسته از معادله زیر برای جریان سیال‌ها به صورت ناهمسو و بدون تغییر فاز، قابل محاسبه خواهد بود:

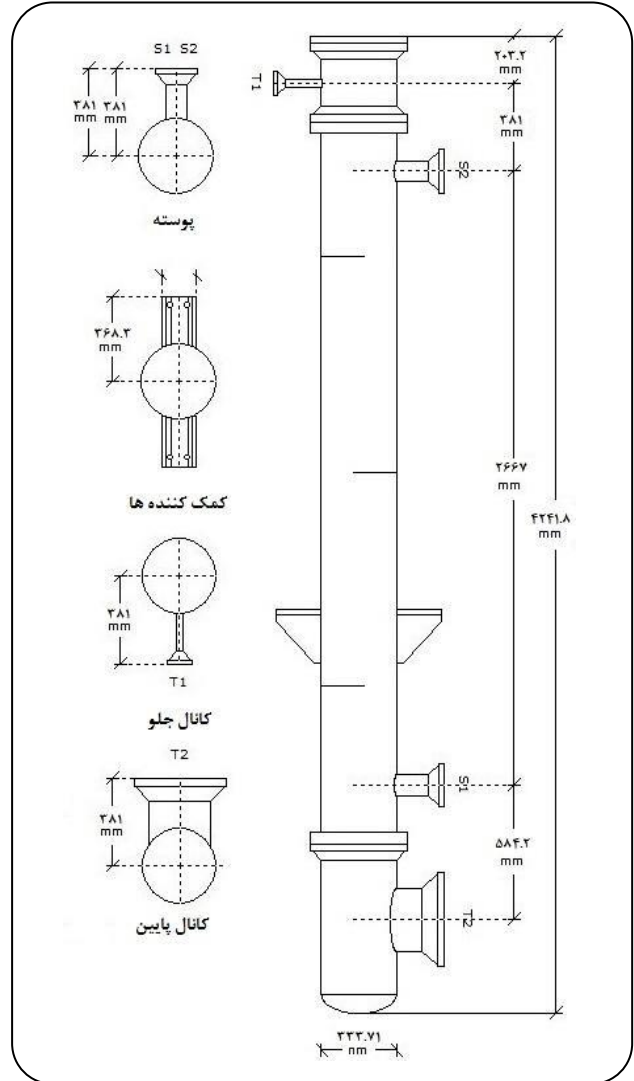
$$\frac{h_o}{CG} = 0.33 Re^{-0.4} Pr^{-1/3} \quad (1)$$

با توجه به اینکه در غلظت‌های بالاتر از نانو ذرات، تأثیر هدایت گرمایی با شیب کمتری افزایش دارد و همین رفتار در نانو سیال‌ها نیز صدق می‌کند و با افزایش غلظت نانو ذره‌ها میزان هدایت گرمایی آن‌ها در سیال پایه با شیب کمتری افزایش خواهد یافت. ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی نانو سیال‌ها با توجه به سرعت جریان و جز حجمی نانو ذره‌ها تغییر می‌کند ولی در شرایط یکسان بیشتر از مقدار همانند در سیال پایه است.

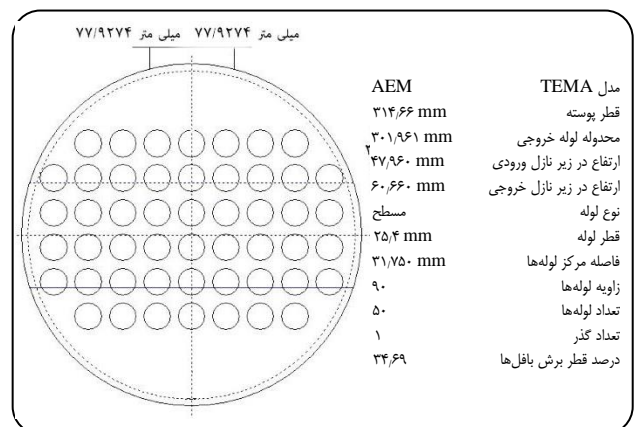
ب) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سمت لوله

در شکل ۵ میزان تأثیر غلظت نانو سیال‌ها بر روی انتقال گرمای جابه‌جایی سمت لوله نشان داده شده است. ضریب انتقال گرمای سیال داخل لوله از معادله/یگل و فرگوسن^(۱) به شرح زیر قابل خواهد بود:

(۱) Nosugre F. & Eleg E.



شکل ۱- جوش‌آور ترموسیفون طراحی شده توسط نرم افزار HTRI.



شکل ۲- نمای بالایی صفحه لوله‌ها در جوش‌آور ترموسیفون طراحی شده توسط نرم افزار HTRI.

$$h_i = 4200(1.35 + 0.02t)u_i^{-0.8}d_i^{-0.2} \quad (2)$$

با بررسی اطلاعات خروجی می‌توان دریافت که با افزایش میزان غلظت نانو سیال‌ها در سمت پوسته، میزان انتقال گرمای جابه‌جایی در سمت لوله نیز افزایش یافته است که این ناشی از میزان افزایش شار گرمایی وارده به لوله‌ها، کاهش ویسکوزیته مایع درون لوله‌ها به علت تغییر فاز مایع و اختلاف دمای ایجاد شده در سمت لوله است.

ج) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر ضریب انتقال گرمای کلی

با توجه به معادله‌های اساسی انتقال گرما، محاسبه ضریب انتقال گرمای کلی برای یک جوش آور ترموسیفون از معادله‌های زیر قابل محاسبه است.

$$q = U_d A (\Delta T)_m \quad (3)$$

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} \left(\frac{d_i}{d_o} \right) + r_{so} + r_{si} \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + r_w \quad (4)$$

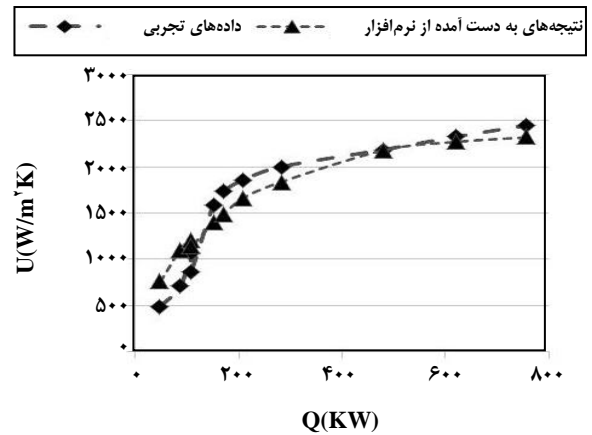
در این معادله h_i ضریب انتقال گرمای ناحیه تک فاز سمت لوله و h_o ضریب انتقال گرمای سمت پوسته است. چنانچه U_d ضریب کلی انتقال حرارت در منطقه تک فاز و U_{tp} برای منطقه دوفازی باشد در این صورت ضریب انتقال حرارت کل لوله از معادله زیر محاسبه خواهد شد.

$$U_{overall} = (U_{tp} \cdot I_{tp} + U_{sc} \cdot I_{sc}) / L_t \quad (5)$$

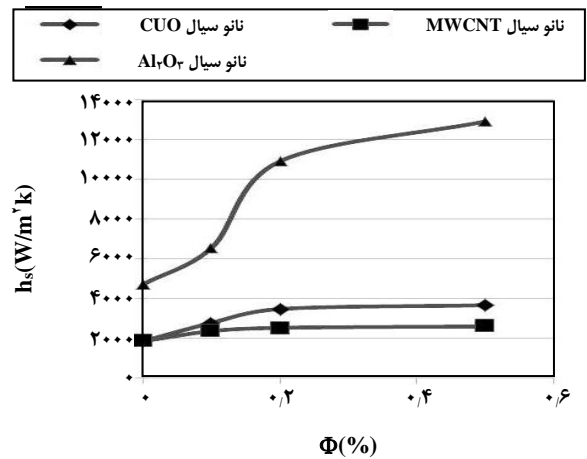
با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که ضریب انتقال گرمای کلی با افزایش میزان غلظت نانوذره‌ها در سیال پایه افزایش داشته است.

د) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر میزان سطح انتقال گرمایی

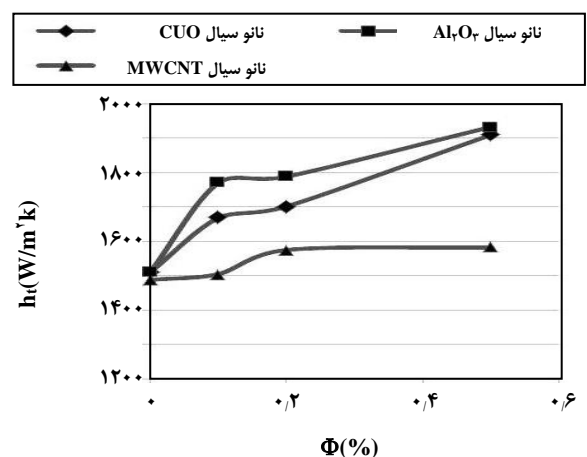
با توجه به اینکه در شبیه‌سازی هندسه جوش آور ترموسیفون عمودی به نرم‌افزار به‌عنوان اطلاعات ورودی وارد شد و با توجه به آن محاسبه‌ها صورت گرفت. حال با در دست داشتن ضریب انتقال گرمای کلی و با توجه به معادله (۳) سطح انتقال گرما قابل محاسبه خواهد بود. نتیجه محاسبه‌ها در نمودار شکل ۷ میزان تأثیر غلظت نانو سیال‌ها بر روی سطح انتقال گرما آورده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با توجه به افزایش ضریب انتقال گرما در سمت پوسته و افزایش ضریب انتقال گرمای کلی سطح انتقال گرما کاهش یافته است که باعث کوچک‌تر شدن اندازه جوش آور، کاهش هزینه‌های تولید می‌شود و همچنین فضای کمتری برای نصب جوش آور مورد نیاز خواهد بود.



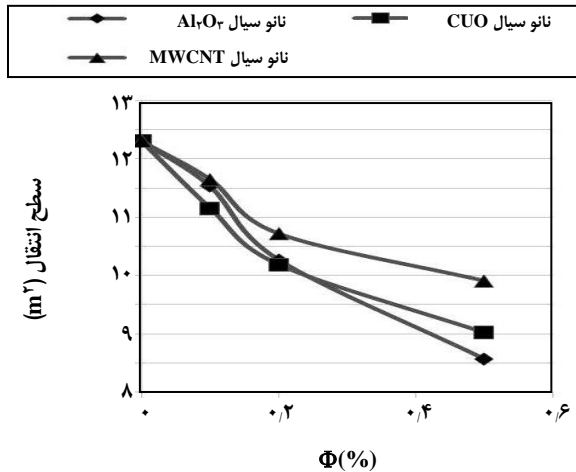
شکل ۳- مقایسه داده‌های تجربی از نتیجه‌های بنسن و هگنر با نتیجه‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار.



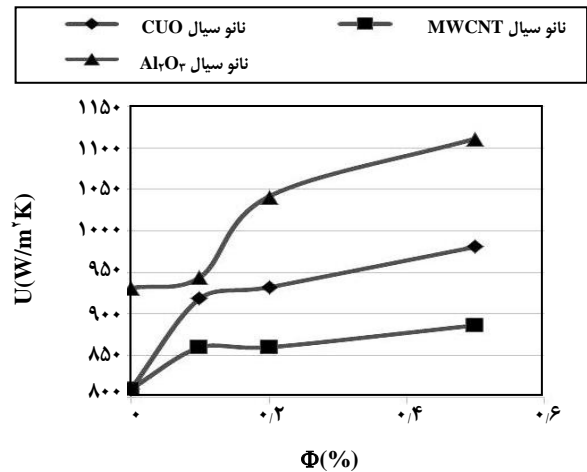
شکل ۴- میزان تأثیر غلظت نانو سیالات بر روی انتقال گرمای جابه‌جایی سمت پوسته.



شکل ۵- میزان تأثیر غلظت نانو سیالات بر روی انتقال گرمای جابه‌جایی سمت لوله.



شکل ۷- میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر روی سطح انتقال گرما.



شکل ۸- میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر روی ضریب انتقال گرمایی کلی.

ه) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر میزان افت فشار

شکل ۹ میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر روی افت فشار بر روی جوش آور ترموسیفون در سامانه‌های شبیه‌سازی شده با توجه به میزان غلظت نانو سیالها نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل نیز دیده می‌شود، میزان افت فشار در سامانه با افزایش غلظت تغییر چشم‌گیری ندارد و با افزایش غلظت با شیب بسیار کمی در حال کاهش است.

هی وای^(۱) و همکاران در سال ۲۰۰۷ میلادی به بررسی جریان و رفتار انتقال گرمایی نانو سیال TiO₂ درون یک لوله عمودی در شرایط جریان آرام و ادعا نمود افت فشار در نانو سیال بسیار نزدیک به میزان افت فشار سیال پایه است [۶].

با توجه به اندازه ذره‌ها در مقیاس نانو تأثیر نانو ذره‌ها در ضریب اصطکاک، در سیال پایه، ناچیز است و میزان ضریب اصطکاک در نانو سیالها با غلظت‌های گوناگون با سیال پایه تفاوتی چندانی ندارد و با توجه به اینکه شرایط در کلیه شبیه‌سازیها یکسان بوده است تأثیر فراوانی در میزان افت فشار دیده نشده است و تنها با شیب بسیار کمی کاهش در راستای افزایش غلظت دیده شد.

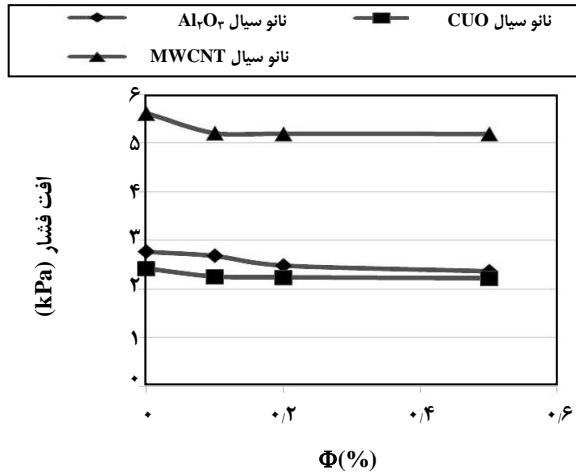
نتیجه‌گیری

استفاده از نانو سیال در طراحی جوش آورهای ترموسیفون عمودی، منجر به کاهش ناحیه مایع متراکم شده و افزایش ضریب انتقال گرما را

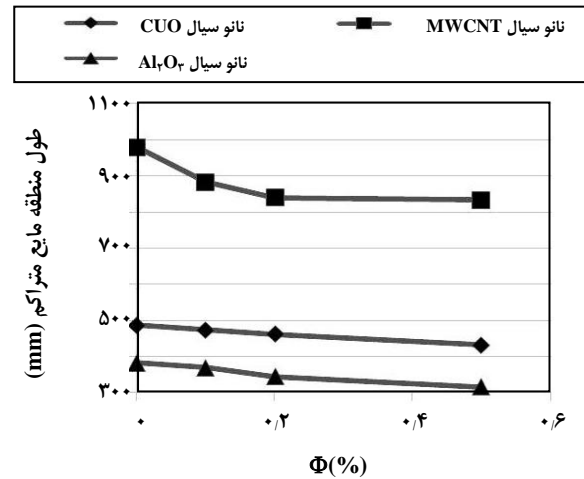
و) میزان تأثیر غلظت نانو سیال بر میزان منطقه مایع متراکم

برای محاسبه منطقه مایع متراکم از آنجایی که با استفاده از نرم افزار میزان بخار در طول لوله مشخص می‌شود، در نتیجه می‌توان نمودار میزان بخار بر حسب طول را به کمک نرم افزار MATLAB محاسبه و رسم نمود. با استفاده از روش برازش منحنی، معادله منحنی به دست می‌آید و با قرار دادن میزان بخار برابر صفر میزان طول منطقه ناحیه متراکم قابل محاسبه است. شکل ۸ میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر طول منطقه مایع متراکم را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت طول منطقه مایع متراکم کاهش می‌یابد. از آنجایی که طول منطقه مایع متراکم رابطه مستقیم با میزان افت فشار در ناحیه تک فازی دارد و با توجه به اینکه افت فشار در محاسبه‌ها با شیب کمی در حال کاهش است، کاهش منطقه مایع متراکم نیز قابل پیش‌بینی است. همانگونه که از نتیجه‌های شبیه‌سازی نیز نشان داده شده است، با افزایش غلظت نانو سیال برای هر یک از نانو سیالها، کاهش در طول منطقه مایع متراکم نیز بیش‌تر شده است. از سویی با توجه به افزایش ضریب انتقال گرما در سمت پوست و افزایش ضریب کلی انتقال گرما، میزان سطح انتقال گرما کاهش می‌یابد. در نتیجه باعث کوچک‌تر شدن اندازه جوش‌آور و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. همچنین فضای کمتری برای نصب جوش‌آور مورد نیاز خواهد بود.

(۱) He Y. et al.



شکل ۹- میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر افت فشار.



شکل ۸- میزان تأثیر غلظت نانو سیالها بر طول منطقه مایع متراکم.

l_{sc}	طول منطقه تک فازی
l_{tp}	طول منطقه دو فازی
Nu	عدد ناسلت
Pr	پرنتل عدد
q	گرمای داده شده
Re	عدد رینولدز
t	دمای متوسط سیال درون پوسته
d_i	قطر داخلی
d_o	قطر خارجی
h_i	ضریب انتقال گرمای سمت لوله
h_o	ضریب انتقال گرمای سمت پوسته
U, U_d	ضریب انتقال گرمای کلی
U_{tp}	ضریب انتقال منطقه دو فازی

به دنبال خواهد شد. با افزایش غلظت نانوذره در سیال پایه می‌توان ضریب انتقال گرما را بالا برد که در نتیجه آن افزایش شار گرمایی منطقه مایع متراکم، باعث افزایش گرما داخل لوله‌ها می‌شود و در نتیجه آن سطح جوش آور و دمای بیشینه دیواره لوله کاهش خواهد یافت و شدت جریان سیال کمتری از سیال گرم کننده، موردنیاز خواهد بود و افت فشار نیز در سامانه کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه اندازه این ذره‌ها در حد نانومتر است میزان رسوب‌گذاری آن‌ها در سامانه بسیار کم خواهد بود.

فهرست نمادها

A	سطح انتقال گرما
C	ظرفیت گرمای متوسط مایع درون پوسته
G	شار جرمی سیال سمت لوله
K	ضریب انتقال
L	لوله طول
l	طول معادل پوسته

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۱۲

مراجع

- [1] Tahmasebi M., Jafari Nasr M.R., Application of Heat Transfer Enhancement on Vertical Thermosyphon Reboiler Using Tube Insert, *Heat transfer Engineering Heat Transfer Engineering*, **27**: 58-65 (2006).

- [2] Shenbedi M., Zeinali Haris S., Baniadam M., Investigation of Heat Transfer Characterization of EDA-MWCNT/DI-Water Nanofluid in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *I&EC Research* **51**(3): 1423-1428 (2012).
- [3] Benson H.R.S., Schnabe T., Wrbb D.R., Heggs P.J., Operation of a Vertical Thermosyphon Reboiler Experimental Facility at Reduced Pressures, *Chem. Eng. Res. & Design*, **82**(4): 445-456 (2004).
- [4] Singh K., Sharma S., Gangacharyulu D., Experimental Study of Thermophysical Properties of Aluminum Oxide/Water Nanofluid, *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, **3**: 229-233 (2013).
- [5] Naik M.T., Sunder L. Syam, Investigation into Thermophysical Properties of Glycol Based CuO Nanofluid for Heat Transfer Application, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **3**: 440-446 (2013).
- [6] Barber J., Brutin D., Tadrist L., A Review on Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids, *Nanoscale Research Letter*, **6**: 280-296 (2011).
- [7] Meyer J.P, Gorte K, Mckrell T.J, The Influence of Carbon Nanotubes on Single-Phase Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Transitional Flow Regime of Smooth Tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **58**(1-2): 597-609 (2013).