



بررسی تجربی افزایش انتقال گرمای الکتروهیدرودینامیکی در جریان جابه‌جایی طبیعی درون لوله

پوریا علمداری^۱، علی اکبر عالم رجبی^{۲*}، سید مجتبی میرحسینی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، rajabi@cc.iut.ac.ir

چکیده- الکتروهیدرودینامیک یکی از روش‌های افزایش انتقال گرما می‌باشد. در پژوهش حاضر، افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی درون یک لوله عمودی در اثر اعمال میدان الکتریکی قوی (الکتروهیدرودینامیک) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از یک الکتروود سیمی با قطبیت مثبت در راستای محور لوله استفاده شده است. این در حالی است که دیواره داخلی لوله به زمین متصل شده است. الکتروهیدرودینامیک با تولید باد یونی که از الکتروود سیمی به سمت دیواره لوله جریان دارد، موجب برهم زدن لایه مرزی گرمایی و افزایش انتقال گرما می‌شود. این پژوهش شامل بررسی اثر قطر الکتروود سیمی و میدان الکتریکی بر افزایش انتقال گرما می‌باشد. نتایج به صورت عدد ناسلت موضعی در راستای لوله و عدد ناسلت متوسط گزارش شده است. بررسی‌ها حاکی از آن بود که کاهش قطر الکتروود سیمی موجب افزایش میزان انتقال گرما از لوله می‌شود. علاوه بر این افزایش جریان الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی قوی موجب افزایش عدد ناسلت در لوله می‌شود. در کمترین قطر سیم، بیشترین عدد ناسلت مشاهده شد که ۲/۰۳ برابر حالت بدون اعمال میدان الکتریکی می‌باشد.

کلیدواژه‌گان: الکتروهیدرودینامیک، افزایش انتقال گرما، جابه‌جایی طبیعی، الکتروود سیمی.

Experimental investigation of heat transfer enhancement using EHD in internal natural convection

P. Alamdari¹, A. A. Alemrajabi^{2*}, M. Mirhosseini³

1- MSc Graduate of Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran

3- PhD Student, Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran. rajabi@cc.iut.ac.ir

Abstract- Electrohydrodynamic (EHD) is one of the techniques used for heat transfer enhancement. In the present study, the enhancement of natural convection heat transfer inside a vertical tube under applying a strong electrical field is experimentally investigated. For this purpose, a wire electrode with positive polarity is used along the pipe axis while the inner surface of the tube is the grounded. EHD disturbs the thermal boundary layer by generating ionic wind which flows from wire electrode towards the tube wall and causes the heat transfer enhancement. In this study, the effects of wire electrode diameter and also electrical field on heat transfer enhancement are investigated. Obtained data are reported as local Nusselt number along the pipe axis and mean Nusselt number. The results show that decreasing the wire electrode diameter increases the heat transfer in the tube. In addition, increasing of electrical current due to strong electrical field increases the Nusselt number. At the lowest wire electrode diameter, the highest Nusselt number was observed which was 2.03 fold the case with no electrical field applied.

Keywords: Electrohydrodynamics (EHD), Heat Transfer Enhancement, Natural Convection, Wire Electrode.

۱- مقدمه

اهمیت افزایش انتقال گرما در بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی، افزایش راندمان، کاهش اتلاف انرژی و بالا بردن عملکرد قطعات الکترونیکی و پردازنده‌ها به خوبی روشن است. طی سالیان متمادی تلاش‌های زیادی برای نیل به انتقال حرارت بیشتر در حوزه علوم و مهندسی صورت پذیرفته است و پژوهشگران با به کار بردن روش‌های مختلف برای رسیدن به این مقصد تلاش کرده‌اند. شیوه‌های افزایش انتقال حرارت به طور کلی به دو گروه فعال و غیرفعال دسته‌بندی می‌شوند [۱]. در روش‌های غیرفعال از تغییرات هندسی در سطوح یا مواد افزودنی به سیال استفاده می‌شود. اما روش‌های فعال مستلزم استفاده از نیروی‌های خارجی می‌باشد. لرزش سطح، استفاده از امواج صوتی و میدان الکتریکی نمونه‌هایی از روش‌های فعال هستند.

استفاده از میدان الکتریکی به عنوان یک روش فعال موضعی، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. گرچه سابقه کشف اثر میدان الکتریکی بر جریان سیال از قدمتی طولانی برخوردار است، لیکن استفاده از این اثر در افزایش انتقال گرما هنوز در مراحل تحقیقاتی قرار دارد. با این وجود، به تازگی تلاش‌هایی از سوی پژوهشگران برای استفاده تجاری از این اثر در خنک‌کاری قطعات کامپیوتری مدرن صورت پذیرفته است. به طور نمونه، می‌توان به گروهی که با همکاری شرکت اینتل و دانشگاه واشنگتن به سرپرستی پرفسور مامیشو^۱ کار می‌کند و تاکنون موفق به ساخت چند پیش نمونه صنعتی در این زمینه شده است، اشاره کرد. باید دانست کاربرد تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال تنها به افزایش انتقال حرارت محدود نمی‌شود و در زمینه افزایش نرخ تبخیر، پمپاژ سیال، تصفیه کردن هوا از آلاینده‌ها، کنترل لایه مرزی و آیرودینامیک نیز کاربرد دارد.

استفاده از میدان الکتریکی قوی یکی از کاربردهای دانشی بین رشته‌ای، به نام الکتروهیدرودینامیک است. الکتروهیدرودینامیک^۲ یا ای - اچ - دی^۳ علمی است که به بررسی تأثیرات میان سیال و میدان الکتریکی می‌پردازد [۲]. هنگامی که میدان الکتریکی بر سیال غیرسانا اعمال شود، ممکن است موجب اعمال نیرویی بر توده سیال گردد. در

صورت به وجود آمدن این نیرو، جریان ثانویه‌ای از سیال (علاوه بر جریان اصلی در صورت وجود) ایجاد می‌شود. جریان ثانویه تولیدی به لحاظ منشا خاص شکل‌گیری، باد یونی یا باد کرونا^۴ نام دارد. باد کرونا در واقع همان حرکت یون‌ها تحت اثر میدان الکتریکی اعمالی است. تأثیر میدان الکتریکی بر سیال و ایجاد باد کرونا که موجب برهم زدن لایه مرزی می‌شود، می‌تواند موجب افزایش ضریب انتقال گرما شود. دست‌یابی به نرخ انتقال گرمای بیشتر موجب بالا رفتن کارایی دستگاه حرارتی و نیز کاهش اندازه آن در بارهای حرارتی مشخص می‌شود. از این رو موجب افزایش صرفه اقتصادی، کاهش مواد مصرفی در ساخت وسایل و صرفه‌جویی در مصرف انرژی خواهد شد. همچنین افزایش ضرایب انتقال گرما، امکان استفاده بهینه از دستگاه‌هایی را که بین دو منبع گرمایی با اختلاف دمای پایین کار می‌کنند، فراهم می‌آورد. به عنوان نمونه‌ای از این وسایل می‌توان به مبدل‌های انرژی گرمایی اقیانوسی و نیروگاه‌های زمین گرمایی اشاره کرد [۳].

تأثیر میدان الکتریکی بر سیال اولین بار در سال ۱۷۱۹ میلادی مشاهده گردید [۴] و سپس در سال ۱۷۷۷ به وسیله کوالو گزارش داده شد [۵]. بعد از آن چاتوک در سال ۱۸۹۹ آن را مورد آنالیز قرار داد. اما کارهای استیوتزر و رایبسون در سال‌های ۱۹۵۹ و ۱۹۶۱ توانست موجب درک اساسی مبانی دینامیک سیالاتی حاکم بر این پدیده شود [۶]. اولین اثر قابل توجه در زمینه کاربرد ای - اچ - دی در افزایش انتقال حرارت به وسیله مارکو و ولکوف ارائه شد. آنان توانستند انتقال حرارت را بدین وسیله تا ۶ برابر افزایش دهند، همچنین نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با توان ۰/۲۵ جریان کرونا متناسب است [۴].

در زمینه افزایش انتقال گرما به کمک الکتروهیدرودینامیک در جریان جابه‌جایی طبیعی مطالعات مختلفی صورت گرفته است. هانگ و همکاران [۷]، در یک پژوهش تجربی، به بررسی افزایش انتقال گرما با استفاده از الکتروهیدرودینامیک در جابه‌جایی آزاد از یک صفحه پره‌دار پرداختند. در این آزمایش‌ها، برای اعمال میدان الکتریکی از الکترودهای میله‌ای که بر روی صفحه پره‌دار قرار می‌گرفت، استفاده شد. آن‌ها برای بهینه کردن تعداد الکترودها در یک سطح مشخص، از چهار

1. Mamishev
2. Electrohydrodynamic
3. EHD

4. Corona wind

در ایران نیز اسماعیل زاده و همکارانش در زمینه افزایش انتقال گرما به کمک الکترو هیدرودینامیک کارهای متعددی به صورت آزمایشگاهی انجام داده‌اند [۱۳، ۱۲، ۱۱]. با توجه به این که این کارها بیشتر در زمینه انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری می‌باشد، از معرفی بیشتر آنها پرهیز شده است.

در پژوهش حاضر افزایش انتقال گرما در جریان جابه‌جایی طبیعی درون لوله‌ی عمودی که تحت شار گرمایی یکنواخت قرار دارد، به کمک باد کرونا مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می‌رسد اطلاعات چندانی از تغییرات انتقال گرما به کمک الکترو هیدرودینامیک در جریان جابه‌جایی طبیعی درون لوله‌ی عمودی در مطالعاتی که پیش از این صورت گرفته است، وجود ندارد. در آزمایش‌ها، از یک سیم مسی در مرکز یک لوله‌ی آهنی برای اعمال میدان الکتریکی استفاده شده است. با اعمال میدان الکتریکی قوی به وسیله الکتروود سیمی و عبور جریان الکتریکی $0.2/5$ میلی‌آمپری از الکتروود سیمی، یک جریان ثانویه درون لوله ایجاد می‌شود که موجب افزایش انتقال گرما از سطح داخلی لوله می‌شود. تغییرات انتقال گرما به صورت موضعی در جریان‌های مختلف الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه قطر 150 ، 350 و 500 میکرون از الکتروود سیمی انجام شد و اثر قطر الکتروود سیمی در افزایش انتقال گرما مورد بررسی قرار گرفت.

۲- دستگاه و روش آزمایش

دستگاه آزمایش مورد استفاده در این بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای اصلی دستگاه آزمایش شامل بخش آزمایش و الکتروود سیمی باردار شده می‌باشد. یک منبع تغذیه جریان مستقیم ولتاژ بالا ساخت شرکت هایزینگر آلمان و مدل پی سی ان ۵-۴۰۰۰، الکتروود سیمی را باردار می‌کند. یک منبع جریان مستقیم نیز انرژی لازم برای گرمکن‌های نواری را فراهم می‌آورد. منبع مذکور ساخت شرکت فیلیپس و مدل پی ای ۱۶۴۶ است. از یک سیستم جمع‌آوری داده‌ها برای ثبت دمای ترموکوپل‌ها استفاده شده است. این سیستم دارای ۲۰ کانال ورودی دما می‌باشد.

جزئیات بخش آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. بخش آزمایش شامل یک لوله بدون درز از جنس فولاد است ($\rho=7832\text{kg/m}^3$ و $k=63.9\text{ W/mK}$ ، $C_p=434\text{J/kgK}$) که

چیدمان مختلف با تعداد الکتروودهای مختلف استفاده کردند. در حالت بهینه، انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی با اعمال میدان الکتریکی ۳ الی ۵ برابر حالتی بود که میدان الکتریکی اعمال نمی‌شد.

بقای و ملکی [۸] از دمنده کرونا برای خنک‌کاری موضعی و افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در یک نقطه مشخص از لوله افقی، استفاده کردند. در این کار که به صورت عددی انجام شد، از یک سیم برای ایجاد دمنده کرونا استفاده شد. با قرارگیری این سیم در نقطه‌ای خارج از مرکز لوله، یک دمنده کرونا پدید می‌آید و با توجه به محل قرارگیری سیم نسبت به مرکز لوله، جهت این دمنده مشخص خواهد شد. در این بررسی سطح لوله به چند بخش تقسیم شد. به برخی از این بخش‌ها شار یکنواخت وارد می‌شود و برای سایر بخش‌ها دمای ثابت در نظر گرفته شده است. جهت دمنده کرونا به سمت یکی از بخش‌هایی بود که دارای شار یکنواخت گرمایی می‌باشد و موجب خنک‌کاری در این بخش می‌شود. با استفاده از این روش دمای سطح در نقطه مورد نظر 10 الی 16 درجه سلسیوس کاهش یافت و ضریب انتقال گرما، 2 الی 6 برابر نسبت به حالت جابه‌جایی طبیعی و بدون دمنده کرونا افزایش یافت. شو و همکاران [۹] به بررسی تغییرات انتقال گرما در اثر اعمال ای‌اچ دی نوسانی از روی یک صفحه تخت پرداخته‌اند. در این بررسی از یک الکتروود سوزنی با قطبیت مثبت استفاده شده است. بررسی آزمایشگاهی آن‌ها نشان می‌داد که در تمام فرکانس‌ها، ای‌اچ دی ثابت نسبت به ای‌اچ دی نوسانی افزایش انتقال گرمای بیشتری داشت. هنگامی که فاصله الکتروود از صفحه در کمترین مقدار خود باشد، میزان انتقال گرما در فرکانس‌های پایین بیشتر از فرکانس‌های بالا می‌باشد؛ در حالی که با افزایش فاصله الکتروود از صفحه این روند برعکس می‌شود.

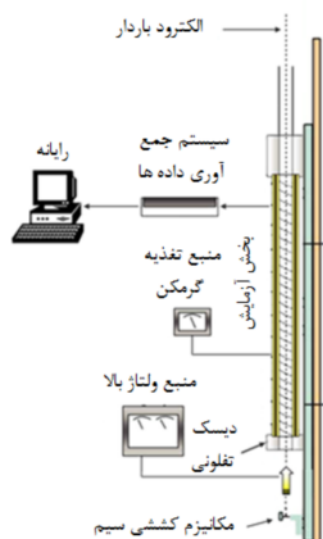
موراچو و کامپو [۱۰] به بررسی افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در یک جسم متقارن محوری افقی در اثر اعمال ای‌اچ دی و به صورت تحلیلی پرداختند. در این بررسی انتقال گرما هنگامی که میدان الکتریکی یکنواخت اعمال می‌شود، در یک جسم افقی دما ثابت و غوطه‌ور در سیال دی الکتریک، تحلیل شده است. آنها یک رابطه صریح به منظور پیش‌بینی اعداد ناسلت موضعی و متوسط استخراج نمودند.

الکترو د سیمی با پلاریته مثبت منبع تغذیه ولتاژ بالا باردار می شود و لوله ی فولادی به زمین متصل خواهد شد.

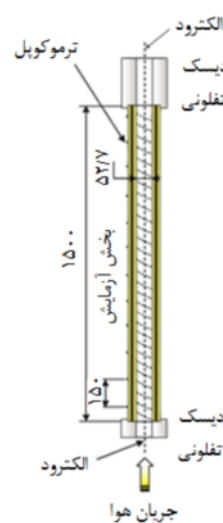
برای اعمال شار گرمایی یکنواخت روی لوله، از گرمکن های (هیتر) نواری برقی که به دور لوله پیچیده می شوند، استفاده شد. این گرمکن های نیکرومی به صورت یکنواخت به دور لوله بخش آزمایش پیچیده شده است. نحوه پیچیدن گرمکن ها برای فراهم ساختن گرمادهی نزدیک به یکنواخت روی سطح خارجی لوله بخش آزمایش مناسب است. انرژی گرمکن های نواری توسط منبع تغذیه DC که محدوده ولتاژ آن از ۰ تا ۸۰ ولت است، فراهم می شود. بیشینه جریان عبوری از این منبع تغذیه ۶ آمپر می باشد. لازم به ذکر است که گرمکن های نواری مذکور به هیچ عنوان نباید با سطح لوله تماس مستقیم داشته باشد. به علت اینکه اعمال میدان الکتریکی قوی باعث سوختن منبع تغذیه گرمکن می شود. به همین منظور دور لوله بخش آزمایش توسط پارچه نسوز چسب دار پوشانده می شود. برای اطمینان بیشتر از نداشتن اتصالی بین سیم های گرمکن نواری و لوله، گرمکن از داخل غلاف نسوز جدار نازک به قطر ۳ میلی متر عبور داده شد و سپس به دور لوله بخش آزمایش پیچانده شد.

سوراخ هایی در دیواره لوله، به منظور قرارگیری ترموکوپل ها در حدود فاصله ۰/۸ میلی متر از سطح داخلی لوله، از بیرون دریل زده شده است. محل قرارگیری ترموکوپل ها در دیواره لوله در شکل ۳- الف نمایش داده شده است. فضای بین دیواره جانبی سوراخ و ترموکوپل با ماده عایقی پر می شود، اما برای اتصال مطمئن نوک ترموکوپل ها با کف سوراخ از یک خمیر با هدایت حرارتی بالا استفاده می شود. این روش تأثیرپذیری دمای نقاط از انتقال حرارت هدایتی در طول لوله بخش آزمایش را تا حد ممکن کاهش می دهد. سؤالی که ممکن است پیش آید این است که چرا برای نصب ترموکوپل ها، دیواره لوله به طور کامل سوراخ نمی شود تا به این ترتیب نوک ترموکوپل ها، دمای هوایی را که برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت لازم است، اندازه بگیرند. می توان در جواب آن چنین مطرح کرد که در صورت قرار گرفتن ترموکوپل ها در تماس مستقیم با توده هوا با درون لوله ممکن است در آن نقطه سبب جرقه زود هنگام شود و سیگنالی که به ترمومتر ارسال می کند از سیگنال لازم جهت خواندن دما خیلی بیشتر باشد که موجب افزایش خطای اندازه گیری دما می شود،

قطر داخلی، قطر بیرونی و طول آن به ترتیب ۵۲/۷ میلی متر، ۵۷/۷ میلی متر و ۱۵۰ سانتی متر می باشد.



شکل ۱ طرح راهی از دستگاه ها و تجهیزات آزمایش



شکل ۲ جزئیات لوله بخش آزمایش (ابعاد بر حسب میلی متر هستند)

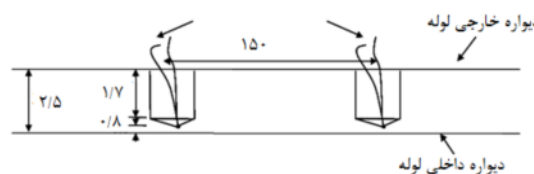
لازم به ذکر است که انتخاب قطر داخلی لوله بخش آزمایش، براساس شدت میدان الکتریکی بین لوله و الکترو د صورت گرفته است. یک الکترو د مسی از مرکز این لوله عبور داده شده است. سه قطر مختلف ۱۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ میکرون از الکترو د سیمی برای انجام آزمایش ها به کار برده شده است.

به منظور به حداقل رساندن اتلاف‌های رسانش گرمایی از دو سر لوله، دو حلقه تفلونی ($C_p=1172\text{J/kgK}$)، آزمایش قرار داده شده است. حلقه‌های تفلونی قطر داخلی یکسانی با قطر داخلی لوله دارند. همچنین قطر خارجی هر دو حلقه ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. ضخامت حلقه‌ای که در بالادست لوله قرار دارد، ۵ سانتی‌متر و حلقه‌ای که در پایین دست قرار دارد، ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. علت استفاده از طول بیشتر تفلون در قسمت پایین دست، بالا بودن دمای لوله در این بخش نسبت به بخش بالادست لوله می‌باشد. با افزایش طول حلقه در این قسمت انتقال گرمای رسانشی به محیط اطراف تا حد امکان حذف شده است. هر دو حلقه تفلونی به شکلی در دو سر لوله قرار گرفته‌اند که فاصله هوایی بین لوله و تفلون وجود نداشته باشد. با این چیدمان، طول مؤثر بخش آزمایش برابر است با طول لوله بخش آزمایش منهای طول لوله پوشیده شد توسط قطعه‌های تفلونی. همچنین برای حذف آثار ناشی از لبه‌های تیز دهانه ورودی روی جریان سیال، دهانه ورودی تفلونی که در بالادست جریان قرار دارد، به وسیله ماشین‌کاری کاملاً یکنواخت شده است.

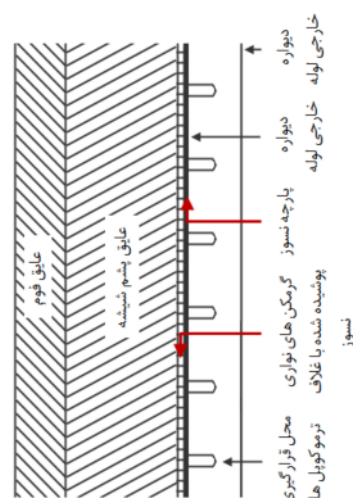
برای مهار کردن افت‌های جابه‌جایی از بخش آزمایش، عایق پشم شیشه و فوم به ضخامت ۸ و ۲ سانتی‌متر به دور لوله بخش آزمایش بسته شد. نحوه عایق‌بندی لوله‌ی بخش آزمایش در شکل ۳-ب قابل مشاهده است.

الکترودهای مسی که ۱۹۰ سانتی‌متر طول دارند، در کل بخش آزمایش در مرکز لوله قرار دارند. برای نگه داشتن الکترودهای سیمی در مرکز لوله، از دو نگه‌دارنده در دو سمت لوله استفاده شده است. ضخامت و پهنای این نگه‌دارنده‌ها تا حد امکان باریک در نظر گرفته شد تا تأثیری زیادی در جریان حاصل از جابه‌جایی طبیعی نداشته باشد. برای کاهش هرچه بیشتر تأثیر این دو نگه‌دارنده بر جریان سیال داخل لوله، نگه‌دارنده‌ای که در پایین دست قرار دارد، در فاصله ۱۲ سانتی‌متری و نگه‌دارنده‌ای که در بالا دست قرار دارد، در فاصله ۵ سانتی‌متری از لوله بخش آزمایش قرار داده شده است. نگه‌دارنده‌ها در انتهای حلقه‌های تفلونی نصب شده‌اند. در هر نگه‌دارنده یک سوراخ با قطر ۱ میلی‌متر برای عبور الکترو سیمی از آن تعبیه شده است. با کمک این نگه‌دارنده‌ها،

همچنین ممکن است نوک ترموکوپل خود عامل برهم زدن لایه مرزی و ایجاد آشفتگی اضافی و ناخواسته شود که در تحلیل تأثیر ای‌اچ‌دی، خلل ایجاد می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۳ الف- محل قرارگیری ترموکوپل‌ها (تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر است) ب- نحوه عایق‌بندی اطراف لوله بخش آزمایش

ده ترموکوپل نوع T که پیش از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده، در طول لوله‌ی بخش آزمایش و درون سوراخ‌هایی که درون بخش آزمایش تعبیه شده است، قرار گرفته‌اند. این نوع از ترموکوپل‌ها دارای محدوده کارکرد دمایی مناسبی برای انجام آزمایش‌ها می‌باشد. از سوی دیگر رفتار خطی‌تری نسبت به سایر ترموکوپل‌ها دارد. برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی، از چهار ترموکوپل که در بخش ورودی لوله بخش آزمایش قرار گرفته، استفاده می‌شود. با میانگین‌گیری از دمای خوانده شده از این چهار ترموکوپل، دمای هوای ورودی به بخش آزمایش مشخص خواهد شد. این دما با تنظیم دمای محیط آزمایشگاه در طول آزمایش‌ها در محدوده ۲۳ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، ثابت شده است. علت استفاده از چهار ترموکوپل، افزایش دقت در دمای خوانده شده به عنوان دمای توده هوای ورودی به لوله است.

۳- تحلیل عدم قطعیت

در پژوهش‌های تجربی انجام تحلیل عدم قطعیت بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌ها ضروری است. برای تحلیل عدم قطعیت نتیجه نهایی، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. می‌توان کلیه خطاها را به صورت تشدید کننده با یکدیگر ترکیب نمود تا عدم قطعیت نتیجه نهایی به دست آید که البته احتمال وقوع این حالت بسیار کم است. احتمال اینکه تمام پارامترها در یک زمان، حداکثر خطای خود را داشته باشند و در ضمن علامت‌های خطا به شکلی باشد که همه مقادیر خطا با هم جمع شوند، تقریباً وجود ندارد. یک روش دقیق‌تر برای تخمین عدم قطعیت نتایج تجربی روشی است که کلاین و مک کلین تاک [۱۴] ارائه نمودند که در اینجا نیز از این روش استفاده شده است.

در روش مورد اشاره، در صورتی که فرض شود R ، کمیتی است که عدم قطعیت آن مد نظر باشد. جهت محاسبه عدم قطعیت کمیت R بایستی آن را بر حسب کمیت‌های مستقل اندازه‌گیری شده بیان نمود. اگر W_R عدم قطعیت کمیت مورد نظر و عدم قطعیت کمیت‌های X_1 ، X_2 ، ... و X_n با w_1 ، w_2 ، ... و w_n بیان شود، آنگاه عدم قطعیت کمیت مورد نظر به کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$W_R = \left(\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \times w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \times w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} \times w_n \right)^2 \right)^{0.5} \quad (1)$$

در آزمایش‌های انجام شده، میزان خطای تجهیزات اندازه‌گیری دما، جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی در گرمکن‌ها، طول، جریان و اختلاف پتانسیل منبع تغذیه ولتاژ بالا به ترتیب برابر با ۰/۱ درجه سلسیوس، ۰/۰۰۱ آمپر، ۰/۱ ولت، ۰/۱ میلی‌متر، ۰/۰۱ میلی‌آمپر و ۱ ولت می‌باشند. بیشینه عدم قطعیت در ضریب انتقال گرمای موضعی (عدد ناسلت موضعی) و عدد ناسلت میانگین به ترتیب برابر با ۳/۶ درصد و ۴/۱ می‌باشد.

۴- نحوه انجام محاسبات

میزان ضریب موضعی انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح داخلی لوله و هوایی که در داخل لوله وجود دارد، به صورت زیر

سیم در مرکز بخش آزمایش قرار می‌گیرد.

از آنجا که تغییرات دما در طول آزمایش موجب تغییر طول الکتروود سیمی می‌شود، برای اطمینان از حفظ کشیدگی سیم‌ها در طول آزمایش از یک مکانیزم کشش ثقلی در بالادست جریان استفاده شده است. این مکانیزم کششی با اعمال یک نیروی ثابت به الکتروود سیمی، باعث می‌شود سیم در تمامی طول لوله بخش آزمایش به صورت کاملاً کشیده قرار گیرد. برای حفظ کشیدگی سیم، لازم است که نگه‌دارنده‌ای که در بالا دست جریان قرار دارد، مانع حرکت سیم در راستای محوری لوله نشود. از آنجا که در انجام آزمایش‌های جابه‌جایی طبیعی، سکون هوا در محل آزمایش از اهمیت بسزایی برخوردار است، اطراف بخش آزمایش به کمک دیواره‌های قابل حرکت، محصور شده است.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا بخش آزمایش به کمک گرمکن‌های نواری گرم می‌شود. کلیه آزمایش‌ها در شار گرمایی یکنواخت وارد بر لوله و برابر ۳۰۰ وات بر متر مربع صورت گرفت. اولین آزمایش بدون اعمال ولتاژ به الکتروود سیمی انجام می‌شود. برای این که آزمایش به حالت پایدار برسد، حدود ۵ ساعت زمان نیاز است. وضعیت پایدار هنگامی خواهد بود که دمای خوانده شده از ترموکوپل‌ها در مدت زمان ۲۰ دقیقه کمتر از ۰/۵ درجه سلسیوس تغییر کند. هنگامی که شرایط به حالت پایدار رسید، دمای ترموکوپل‌ها و گرمای اعمال شده به بخش آزمایش خوانده می‌شود. این روند مجدداً برای حالتی که الکتروود باردار است، تکرار می‌شود. در این حالت، به وسیله منبع تغذیه ولتاژ بالا، الکتروود باردار می‌شود. میزان جریان اعمالی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نزدیک جریان شروع کرونا قرار داشته باشد. پس از خواندن دمای ترموکوپل‌ها، گرمای اعمال شده به بخش آزمایش، جریان الکتریکی و ولتاژ اعمال شده به الکتروود سیمی، آزمایش‌ها، با افزایش تدریجی جریان اعمالی تا هنگام رسیدن به جریان تخلیه کرونا ادامه پیدا خواهد کرد. دمای ترموکوپل‌ها به کمک یک سیستم جمع‌آوری داده و با استفاده از کامپیوتر ثبت می‌شود. لازم به ذکر است که برای اینکه نتایج آزمایش‌ها قابل مقایسه باشد، آزمایش‌ها در شرایط محیطی تقریباً یکسان انجام پذیرفت. این آزمایش‌ها در دمای محیط ۲۳ الی ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۲۴ الی ۲۷ درصد صورت پذیرفت.

محاسبه می‌شود.

محاسبه نمود.

مقدار عدد ناسلت موضعی می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$Nu = \frac{h_x D}{k} \quad (3)$$

که k ضریب انتقال گرمای رسانشی و D قطر داخلی لوله است. متوسط مقدار عدد ناسلت (\overline{Nu}) برای انتقال گرما بین سطح داخلی و هوای داخل لوله می‌تواند به کمک رابطه (۴) محاسبه شود.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h} D}{k} \quad (4)$$

که \overline{h} ، متوسط ضریب انتقال حرارت می‌باشد و به کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\overline{h} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} h_x dx \quad (5)$$

که L معرف طول لوله می‌باشد.

دمای میانگین سطح از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\overline{T}_s = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} T_{sx} dx \quad (6)$$

عدد رایلی نیز به کمک رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$Ra = \frac{g \beta q D^4}{k \nu^2} \cdot Pr \quad (7)$$

g شتاب گرانش، β ضریب انبساط حجمی، Pr عدد پرانتل و ν ویسکوزیته سیال می‌باشد.

لازم به ذکر است که تمام خواص هوا در دمای میانگین فیلم که طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷].

$$\overline{T}_f = \frac{\overline{T}_s + T_i}{2} \quad (8)$$

۵- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و وسایل آزمایش، روند آزمایش و روند بررسی داده‌ها، پیش از انجام آزمایش‌های تعریف شده، یک سری آزمایش در اعداد رایلی مختلف صورت پذیرفت. این آزمایش‌ها بدون اعمال ای اچ دی و در نتیجه بدون وجود باد کرونا انجام شد و همان‌طور که گفته شد هدف آن بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده، بود. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با نتایج کار دایر [۱۸] مقایسه شد. دایر جریان

$$h_x = \frac{q}{T_{sx} - T_i} \quad (2)$$

که q شار حرارتی است که توسط جابه‌جایی طبیعی از سطح داخلی لوله انتقال پیدا می‌کند. T_{sx} دمای موضعی سطح و T_i دمای هوای ورودی می‌باشد. لازم به ذکر است که میزان انتقال حرارت تشعشعی از دو طرف لوله محاسبه و کمتر از ۴ درصد به دست آمد. از این رو این مقدار قابل چشم‌پوشی است. این موضوع در مقالات مشابه دیگر نیز مشاهده شده است [۱۵]. در این کار، ماوید و ابراهیم به بررسی جریان جابه‌جایی طبیعی داخلی در لوله‌های بیضوی و با شیب‌های مختلف پرداخته‌اند. این بررسی به صورت آزمایشگاهی صورت پذیرفته است.

با توجه به اینکه گرمکن‌های نواری به دور سطح خارجی لوله بخش آزمایش پیچیده شده است، شار حرارتی در سطح داخلی لوله به علت انتقال حرارت رسانشی در راستای محوری لوله، کاملاً یکنواخت نیست. زیاد بودن ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی در نزدیکی ورودی لوله باعث کاهش نسبی دمای دیواره لوله می‌شود که آن هم موجب انتقال حرارت در راستای محوری لوله می‌شود، تا گرمای مورد نیاز در این بخش را فراهم آورد [۱۶]. برای محاسبه این انتقال حرارت رسانشی از یک کد که بدین منظور نوشته شده است، استفاده می‌شود. میزان شار حرارتی روی سطح خارجی لوله از انرژی الکتریکی مصرفی به دست می‌آید و این شار حرارتی به صورت یکنواخت بر روی سطح خارجی لوله اعمال می‌شود. دما در نقاط مختلف لوله بخش آزمایش به عنوان ورودی کد می‌باشد. در واقع با استفاده از دمای خوانده شده توسط ترموکوپل‌ها و شار حرارتی یکنواختی که بر روی لوله اعمال می‌شود و همچنین میزان انتقال گرمای رسانشی در لوله، مقدار گرمای خروجی از سطح داخلی لوله محاسبه می‌شود. در این روش لوله در راستای محوری به ده حجم کنترل تقسیم‌بندی شده است. این حجم کنترل‌ها به نحوی انتخاب شده است که محل ترموکوپل در مرکز حجم کنترل قرار بگیرد و دمای حجم کنترل توسط دمای خوانده شده در ترموکوپلی که در آن حجم کنترل قرار دارد، مشخص می‌شود. با نوشتن معادلات انتقال گرمای رسانشی (فوریه) و در نظر گرفتن مقادیر گرمای ورودی و خروجی از هر حجم کنترل می‌توان مقدار گرمای خارج شده از سطح داخلی لوله که همان گرمای وارد شده به هوای داخل لوله است،

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، انطباق مناسبی بین داده های این بررسی و کار دایر وجود دارد. با این حال اندکی اختلاف بین این بررسی و کار دایر وجود دارد. علت عمده این اختلاف در نظر گرفتن انتقال گرمای رسانشی در لوله است.

۶- نتایج و بحث

اثر باد کرونا در افزایش انتقال گرما در سه قطر سیم ۱۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ میکرون به ترتیب در شکل ۵- الف تا پ نشان داده شده است. محور عمودی نمودارها مقدار عدد ناسلت موضعی را نشان می‌دهد و محوری افقی آنها حاصل تقسیم فاصله از ابتدای لوله بر طول لوله است. هر نمودار عدد ناسلت را در یک جریان الکتریکی اعمالی مشخص، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که عدد رایلی در این بررسی در محدوده 10^6 الی 10^7 تغییر می‌کند. با توجه به این که عدد رایلی گذار از جریان آرام به جریان آشفته حدود 10^9 می‌باشد، بنابراین جریان سیال در کلیه آزمایش‌ها به صورت آرام بوده است.

مقدار بالای عدد ناسلت در ورودی لوله و کاهش این عدد در طول لوله از مشخصات ناحیه در حال توسعه است. در دهانه‌ی ورودی لوله، ضخامت لایه مرزی صفر است. به همین دلیل، عدد ناسلت بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. با افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی، مقدار عدد ناسلت کاهش می‌یابد. با اعمال میدان الکتریکی توسط الکتروود سیمی و افزایش جریان الکتریکی، عدد ناسلت در هر مقطع از لوله افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش جریان الکتریکی، سرعت باد کرونای تولید شده افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باد کرونا که در راستای شعاعی، درون لوله بخش آزمایش می‌وزد، موجب خنک‌تر شدن سطح و همچنین افزایش انتقال گرما می‌شود.

در نمودارهای شکل ۵ اعداد ناسلت با اعمال جریان الکتریکی $I=0.01$ mA تقریباً بر اعداد ناسلت در حالت بدون اعمال جریان الکتریکی منطبق است. در واقع در جریان شروع کرونا افزایش انتقال گرما چندان قابل توجه نیست. در جریان شروع کرونا، شدت باد کرونا چندان افزایش نیافته که بتواند تأثیر محسوسی روی دمای سطح داشته باشد، به همین دلیل مقدار انتقال گرما چندان افزایش نیافته است.

در بخش انتهایی لوله، مقدار عدد ناسلت در هر دو حالت اعمال میدان الکتریکی و بدون اعمال آن، افزایش یافته است.

جابه‌جایی طبیعی درون یک لوله عمودی را به صورت آزمایشگاهی و تئوری مورد بررسی قرار داد. او در این کار از یک لوله عمودی که ابتدا و انتهای آن باز بود، استفاده کرد. سپس با اعمال شار حرارتی ثابت به لوله میزان انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی داخلی را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر این، دایر میزان اثرپذیری انتقال گرمای درون لوله را از شرایط مرزی ورودی لوله بررسی کرد.

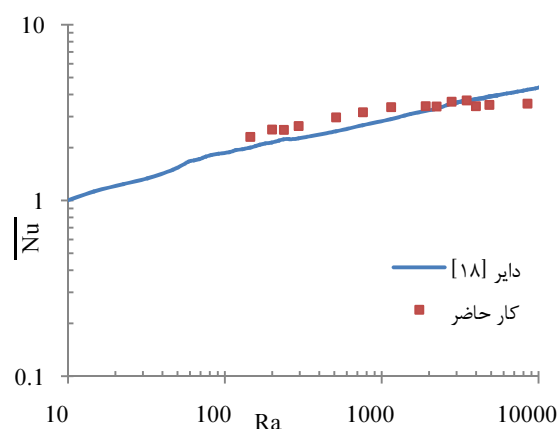
از آنجا که نتایج کار دایر در قالب عدد ناسلت متوسط گزارش شده است، بنابراین آزمایش‌هایی در اعداد رایلی مختلف صورت گرفت و عدد ناسلت متوسط در هریک از اعداد رایلی محاسبه شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده و کار دایر در شکل ۴ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که نحوه محاسبه عدد ناسلت در کار دایر با محاسبه عدد ناسلت در کار حاضر متفاوت می‌باشد. از این رو اعداد ناسلت ارایه شده در این شکل با توجه به نحوه محاسبه عدد ناسلت در کار دایر صورت گرفته است. دایر به کمک رابطه (۹) مقدار عدد ناسلت را محاسبه کرد.

$$\overline{Nu} = \frac{qr}{(T_s - T_i)k} \quad (9)$$

که در آن q شار گرمایی وارد شده، T_s دمای میانگین سطح لوله و r شعاع داخلی لوله می‌باشد. وی عدد رایلی را به کمک رابطه (۱۰) محاسبه نمود.

$$Ra = \frac{g \beta q r^5}{\nu^2 l k} \cdot Pr \quad (10)$$

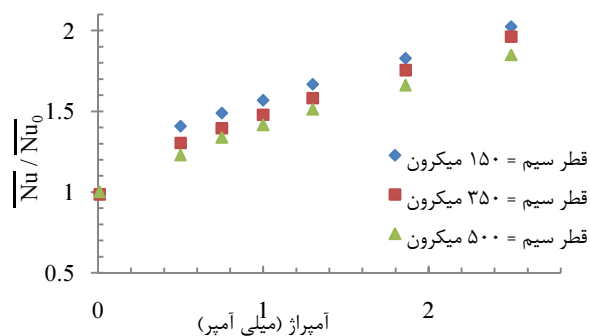
g شتاب گرانش، β ضریب انبساط حجمی، Pr عدد پراوتل، l طول لوله و ν ویسکوزیته سیال می‌باشد.



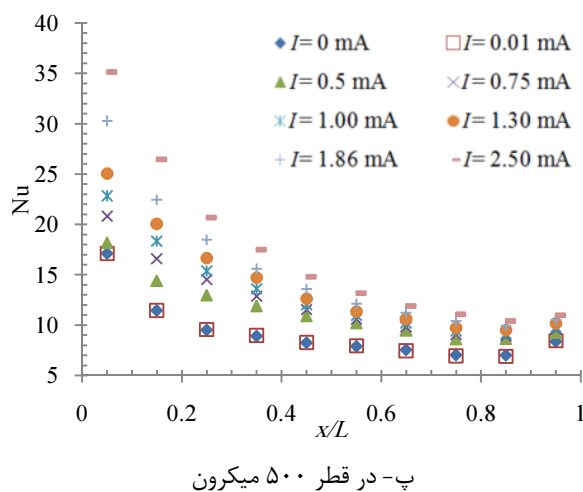
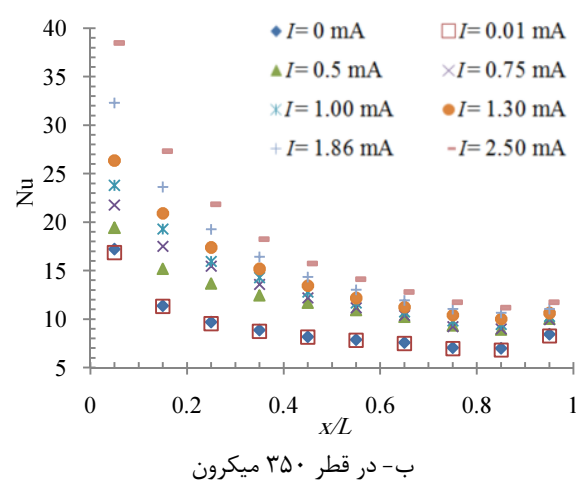
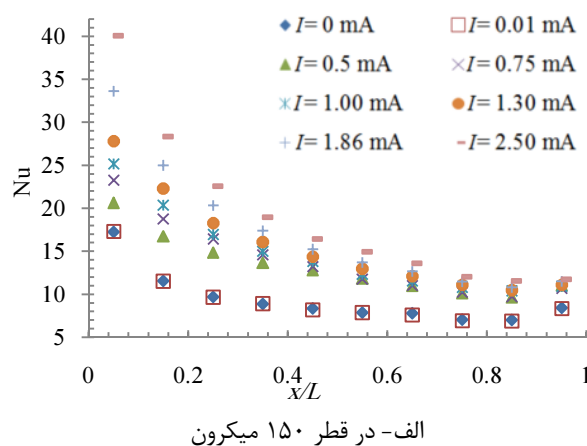
شکل ۴ مقایسه‌ی نتایج آزمایش بدون ای اچ دی با کار دایر

بخش آزمایش با استفاده از حلقه تفلونی عایق شده است، اما ممکن است بخشی از گرما به کمک رسانش از حلقه تفلونی عبور نماید. این امر موجب کاهش دمای سطح لوله در بخش پایانی لوله می‌شود. از همین رو عدد ناسلت در این بخش افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از عللی که ممکن است موجب افزایش عدد ناسلت در بخش پایانی لوله شود، تغییر خواص فیزیکی هوا در بخش انتهایی لوله است. در این ناحیه لایه مرزی حرارتی به هم رسیده است و توسعه یافتگی حرارتی اتفاق می‌افتد. به علت افزایش دما در ناحیه توسعه یافته حرارتی، خواص فیزیکی هوا دچار تغییر خواهد شد. یکی از این تغییرات، کاهش چگالی و در نتیجه افزایش حجم هوا می‌باشد. افزایش حجم موجب افزایش سرعت هوا، افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و کاهش دمای سطح و در نتیجه افزایش عدد ناسلت در این ناحیه می‌گردد. انتقال گرمای تشعشعی به محیط اطراف هر چند که ناچیز باشد، می‌تواند یکی دیگر از علل افزایش عدد ناسلت در این ناحیه گردد. تشعشع می‌تواند علت بخشی از کاهش دمای سطح در این ناحیه باشد.

شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط را با جریان اعمال شده در سه قطر مختلف الکترو سیمی که در این بررسی در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. محور عمودی این نمودار حاصل تقسیم عدد ناسلت متوسط بر عدد ناسلت متوسط در حالتی است که میدان الکتریکی اعمال نمی‌شود. به عبارت دیگر عدد ناسلت، هنگامی که میدان الکتریکی به الکترو سیمی اعمال می‌شود بر عدد ناسلت متوسط در هنگامی که میدان الکتریکی بر الکترو سیمی اعمال نمی‌شود، تقسیم شده است.



شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط با جریان الکتریکی عبوری از الکترو سیمی، با در نظر گرفتن گرمای ای اچ دی



شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول لوله عمودی

افزایش عدد ناسلت در بخش پایانی لوله می‌تواند ناشی از چند عامل باشد. یکی از عللی که ممکن است موجب افزایش عدد ناسلت در انتهای لوله شود، انتقال گرما رسانشی از بخش انتهایی لوله به محیط بیرون می‌باشد. هر چند که انتهای لوله

حاصل این تقسیم، ضریب افزایش انتقال گرما در اثر اعمال میدان الکتریکی قوی را نشان می‌دهد. محور افقی این نمودار جریان عبوری از الکتروود سیمی را نشان می‌دهد. در جریان الکتریکی $I=0.01 \text{ mA}$ مقدار $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ در سه قطر مختلف سیم، عددی نزدیک به یک را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر مقدار افزایش انتقال گرما در این جریان عبوری از الکتروود چندان محسوس نخواهد بود. این موضوع می‌تواند ناشی از ضعیف بودن باد کرونا در این جریان الکتریکی باشد. به عبارت دیگر در جریان شروع باد کرونا، چون باد کرونا شدت چندان ندارد، چندان موجب خنک شدن سطح داخلی لوله و افزایش انتقال گرما نخواهد شد. با افزایش جریان الکتریکی عبوری از الکتروود سیمی مقدار $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ نیز افزایش یافته است. علت افزایش $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ با افزایش جریان الکتریکی، افزایش شدت وزش باد کرونا درون لوله است. باد کرونا که از سوی الکتروود سیمی به سمت سطح داخلی لوله می‌وزد، موجب خنک شدن سطح و افزایش انتقال گرما خواهد شد. با افزایش شدت باد کرونا، سطح داخلی لوله خنک‌تر خواهد شد و ضریب انتقال گرما افزایش خواهد یافت.

میزان افزایش انتقال گرما از سطح داخلی لوله با افزایش قطر الکتروود سیمی، کاهش خواهد یافت. در یک جریان مشخص قطر سیم ۱۵۰ میکرون بیشترین افزایش انتقال گرما را خواهد داشت. از این رو، افزایش انتقال گرما در قطر سیم ۳۵۰ میکرون و ۵۰۰ میکرون نسبت به قطر ۱۵۰ میکرون کاهش خواهد یافت. علت افزایش انتقال گرما از سطح داخلی لوله با کاهش قطر سیم، افزایش شدت میدان الکتریکی در اطراف سیم باریک‌تر و افزایش سرعت باد کرونا می‌باشد. بیشترین افزایش انتقال گرما در جریان $I=2.5 \text{ mA}$ و برای قطر سیم ۱۵۰ میکرون مشاهده شد. در این حالت $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0 = 2.03$ می‌باشد. این مقدار نشان می‌دهد که مقدار افزایش انتقال گرما با اعمال میدان الکتریکی $2/0.3$ برابر حالتی است که میدان الکتریکی به سیم اعمال نشده است. در جریان $I=2.5 \text{ mA}$ و برای قطر سیم ۳۵۰ میکرون و ۵۰۰ میکرون مقدار افزایش انتقال گرما نسبت به حالت بدون ای‌اچ دی به ترتیب $1/96$ و $1/85$ می‌باشد.

در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط در طول لوله در سه قطر مختلف از الکتروود سیمی، بر حسب جریان عبوری از

الکتروود رسم شده است. محور عمودی این نمودار نسبت عدد ناسلت هنگام اعمال میدان الکتریکی به عدد ناسلت بدون اعمال میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. محور افقی این نمودار نیز جریان عبوری از الکتروود سیمی را نشان می‌دهد. تفاوت این نمودار با نمودار شکل ۶ در اعمال گرمای ای‌اچ دی در محاسبه‌ی عدد ناسلت می‌باشد. در شکل ۶ گرمای ای‌اچ دی در محاسبه عدد ناسلت اعمال شده بود. با توجه به اعمال گرمای ای‌اچ دی در این نمودار ممکن است، به نظر برسد که روند افزایشی عدد ناسلت به علت افزایش گرمای ای‌اچ دی ناشی از افزایش جریان عبوری از الکتروود سیمی می‌باشد. از این رو در نمودار شکل ۷، تغییرات عدد ناسلت، بدون اعمال گرمای ای‌اچ دی در محاسبه عدد ناسلت ترسیم شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که با افزایش جریان عبوری از الکتروود، میزان عدد ناسلت افزایش یافته است. میزان افزایش انتقال گرما در بیشترین جریان عبوری از الکتروود ($2/5$ میلی آمپر) در سه قطر ۱۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ میکرون به ترتیب $1/53$ ، $1/46$ و $1/35$ برابر حالتی است که ای‌اچ دی اعمال نمی‌شود. گرمای ای‌اچ دی ناشی از تخلیه کرونا در محیط است و به کمک رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$Qc = i_c \times E \quad (11)$$

که در آن i_c میزان جریان الکتریکی عبوری از الکتروود سیمی و E اختلاف پتانسیل اعمالی توسط منبع تغذیه ولتاژ بالا می‌باشد.

همانند شکل ۶ در شکل ۷ نیز با کاهش قطر الکتروود سیمی مقدار $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ در جریان الکتریکی یکسان، افزایش یافته است. به عبارت دیگر با کاهش قطر الکتروود سیمی مقدار افزایش انتقال گرما نسبت به حالت بدون اعمال میدان الکتریکی، افزایش می‌یابد. همان‌طور که پیش از این گفته شد، علت افزایش انتقال گرما با کاهش قطر الکتروود سیمی، افزایش شدت میدان الکتریکی با کاهش قطر الکتروود سیمی می‌باشد.

با توجه به این که در بسیاری از موارد از ای‌اچ دی برای خنک‌کاری سطوح استفاده می‌شود، کاهش دمای لوله بر اثر اعمال میدان الکتریکی قوی از اهمیت خاصی برخوردار است. در شکل ۸ میزان کاهش دمای ناشی از اعمال ای‌اچ دی در قطر سیم ۱۵۰ میکرون (که بیشترین افزایش انتقال گرما و کاهش دمای لوله در این قطر صورت گرفته است) را نمایش می‌دهد.

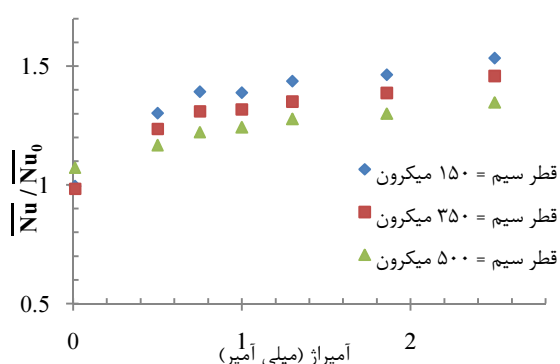
از داخل لوله عمودی به کمک الکترو هیدرودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. عدد ناسلت موضعی در طول لوله برای سه قطر مختلف از الکتروود سیمی و در شار گرمایی مشخص، ارایه شد. در هر سه قطر از الکتروود سیمی با افزایش جریان الکتریکی عبوری از الکتروود، عدد ناسلت موضعی و عدد ناسلت متوسط افزایش یافت. سپس از مقایسه اعداد ناسلت متوسط در سه قطر الکتروود سیمی و در جریان الکتریکی عبوری یکسان، مشخص شد که کاهش قطر الکتروود سیمی موجب افزایش انتقال گرما در جریان جابه‌جایی طبیعی از داخل لوله خواهد شد. بیشترین میزان افزایش انتقال گرما در کمترین قطر الکتروود سیمی (قطر ۱۵۰ میکرون) و در جریان الکتریکی ۲/۵ میلی آمپر اتفاق افتاد. میزان افزایش انتقال گرما در این حالت برابر انتقال گرما در حالت بدون اعمال الکترو هیدرودینامیک مشاهده شد. در انتها نیز با توجه به این که اعمال میدان الکتریکی قوی در بسیاری از موارد به منظور خنک‌کاری سطح انجام می‌شود، میزان کاهش دمای لوله در اثر اعمال میدان الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین کاهش دمای موضعی ۰/۲۹ برابر هنگامی بود که میدان الکتریکی اعمال نمی‌شد.

۸- فهرست علائم

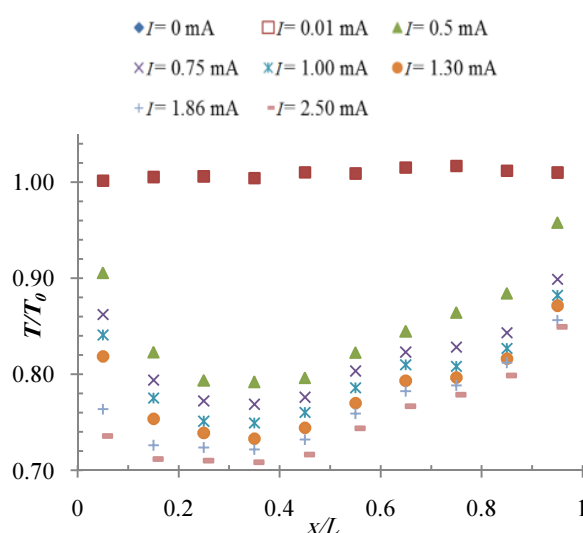
C_p	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	قطر داخلی (m)
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
k	ضریب انتقال گرما رسانشی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
l	طول لوله
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
q	شار گرمایی (Wm^{-2})
Ra	عدد رایلی
T	دما (K)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

زیر نویس‌ها:

0	بدون اعمال میدان الکتریکی
f	فیلم
i	ورودی



شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت متوسط با جریان الکتریکی عبوری از الکتروود سیمی، بدون در نظر گرفتن گرمای ای اچ دی



شکل ۸ تغییرات دما در لوله برای قطر الکتروود ۱۵۰ میکرون

در این شکل نسبت دمای خوانده شده از ترموکوپل‌هایی که در دیواره لوله تعبیه شده برای حالتی که میدان الکتریکی قوی اعمال می‌شود به دمای این ترموکوپل‌ها در حالت بدون اعمال میدان الکتریکی به نمایش در آمده است. در این شکل نیز میزان کاهش دمای لوله با قوی‌تر شدن میدان الکتریکی قابل مشاهده می‌باشد. روند تغییرات دما در این شکل به کمک روند تغییرات عدد ناسلت که پیش از این ذکر شد، قابل توجیه است. بیشترین کاهش دمای موضعی ۰/۷۱ برابر هنگامی است که میدان الکتریکی اعمال نمی‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش افزایش انتقال گرما در جریان جابه‌جایی طبیعی

x فاصله از ابتدای لوله
s سطح

۹- مراجع

- [10] Marucho, M., Campo, A., "Electrohydrodynamic natural convection enhancement for horizontal axisymmetric bodies", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 63, 2013, pp. 22-30.
- [11] Shakouri Pour, M., Esmailzadeh, E., "Experimental investigation of convective heat transfer enhancement from 3D-shape heat sources by EHD actuator in duct flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, 2011, pp. 1383-1391.
- [12] Alamgholilou, A., Esmailzadeh, E., "Experimental investigation on hydrodynamics and heat transfer of fluid flow into channel for cooling of rectangular ribs by passive and EHD active enhancement methods", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, 2012, pp. 61-73.
- [13] Nourdanesh, N., Esmailzadeh, E., "Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 5, 2013, pp. 327-333.
- [14] Kline, S.J., McClintock, F.A., "Describing uncertainties in single-sample experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, 1953, pp. 3-8.
- [15] Moawed, M., Ibrahim, E., "Free convection heat transfer inside vertical and inclined elliptic tubes with different axis ratio and different inclination and orientation angles", *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, 2008, pp. 587-595.
- [16] Molki, M., Bhamidipati, K., "Enhancement of convective heat transfer in the developing region of circular tubes using corona wind", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 4301-4314.
- [17] Incropera, F., DeWitt, P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5th ed., New York, John Wiley and Sons Inc., 2003.
- [18] Dyer, J. R., "The development of laminar natural-convective flow in a vertical uniform heat flux duct", *International. Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 18, 1975, pp. 1455-1465.
- [1] Bergles, A.E., Rohsenow, W.M., Hartnett J.P., *Techniques to augment heat transfer*, Handbook of Heat Transfer Application, New York, Mc Graw-Hill, 1985.
- [2] Kaliszky, S., Sayir, M., Schneider, W., *Electrohydrodynamics*, New York, Springer, 1998.
- [3] Allen, P.H.G., Karayiannis, T.G., "Review paper: Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and fluid flow", *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 15, 1995, pp. 389-423.
- [4] Owsenek, B.L., Seyed Yagoobi, J., Page, R.H., "Experimental investigation of corona wind heat transfer enhancement with heated horizontal flat plate", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, 1995, pp. 309-315.
- [5] Yue, Y., Hou J., Zhongliang, A., "Experimental studies of the enhanced heat transfer from a heating vertical flat plate by ionic wind", *Plasma Science & Tech.*, Vol. 8, 2006, pp. 697-700.
- [6] Stuetzer, O.M., "Ion drag pressure generation", *Journal of Applied Physics*, Vol. 30, No. 7, 1959, pp. 984-994.
- [7] Huang, R.T., Sheu, W.J., Wangb, C.C., "Heat transfer enhancement by needle-arrayed electrodes -An EHD integrated cooling system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, 2009, pp. 1789-1796.
- [8] Baghaei, L. R., Molki, M., "Targeted heat transfer augmentation in circular tubes using a corona jet", *Journal of Electrostatics*, Vol. 70, 2012, pp. 31-42.
- [9] Sheu, W.J., Hsiao, J.J., Wangb, C.C., "Effect of oscillatory EHD on the heat transfer performance of a flat plate", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, 2013, pp. 419-424.