



شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت در لوله‌های میکروفین دار

میر هومن سید نژاد: کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

جهانفر خالقی نیا: عضو هیات علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

hooman_seyednejad@yahoo.com

چکیده

لوله‌های میکروفین دار یکی از وسایل معروف برای بهبود سرمایش به‌منظور چگالش و تبخیر کردن می‌باشند. مبدل‌های میکروفین دار دارای کاربردهای زیادی مانند سردکننده توربین‌های گازی، بدنه هواپیما و همچنین در زمینه بیوشیمی می‌باشند. در این پژوهش، اثر پارامترهای هندسی لوله میکروفین دار بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و نیز افت فشار در جریان آشفته آب در محدوده عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ به وسیله روش‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور صحت سنجی روش حل و نیز شبکه ایجاد شده، ابتدا جریان درون یک لوله صاف بدون وجود میکروفین بررسی خواهد شد و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با روابط موجود در کتب مرجع انتقال حرارت مقایسه خواهد شد. همچنین در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی با نتایج پژوهش‌های تجربی مشابه مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد استفاده از میکروفین‌ها موجب افزایش عدد ناسلت بین ۷ درصد تا ۱۰۷ درصد نیز افزایش ضریب اصطکاک بین ۴۸ درصد تا ۲۲۰ درصد خواهد شد.

واژگان کلیدی: لوله میکروفین دار، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین، عدد ناسلت میانگین، افت فشار.



۱- مقدمه

امروزه در صنعت سرمایش و گرمایش، مبادله‌کننده‌های حرارت نقش مهمی ایفا می‌کنند. با توجه به بحران انرژی و مسائل زیست‌محیطی، استفاده از تجهیزات اقتصادی‌تر و سازگارتر با محیط زیست به‌عنوان یکی از موضوعات مهم علم انتقال گرما تبدیل گشته است. افزایش انتقال حرارت یکی از فاکتورهای مهم در به دست آوردن بازده انرژی و بهبود آن در کاربردهای سرد کردن در یخچال‌ها و تهویه هوا می‌باشد.

افزایش مساحت سطح انتقال حرارت جابجایی یکی از بهترین و رایج‌ترین روش‌های افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی است. این سطح هر چه بیشتر باشد، مقدار انتقال حرارت بیشتر می‌شود. عموماً در مواردی که مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی یک سمت مبدل حرارتی کم باشد، با نصب یک سری صفحات فلزی که آن‌ها را پره و یا فین می‌نامند، مساحت سطح تبادل حرارت آن سمت را افزایش می‌دهند. فین عبارت است از پره‌های بسیار نازک از جنس آلومینیوم، مس، برنج، کربن استیل، گالوانیزه و یا استیل ضدزنگ که بر روی لوله‌های انتقال حرارت مونتاژ می‌گردد. فین باعث ازدیاد سطح تبادل شده و سرعت انتقال را افزایش می‌دهد. اما نوع دیگری از لوله‌های فین دار وجود دارند که به‌منظور افزایش انتقال حرارت سطح درونی لوله را زیاد می‌کند. لوله‌های میکروفین دارد که در صنعت از آن‌ها استفاده می‌شوند از جنس مس هستند.

سلن و همکاران افت فشار و ضریب اصطکاک در لوله صاف و میکروفین دار را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد [۱]. دستگاه آزمایش شامل یک مبدل دو لوله‌ای بود که آب گرم در لوله درونی و آب خنک‌کننده در لوله بیرونی جریان داشت. با جمع‌آوری اطلاعات آزمایشگاهی نتیجه گرفته شد که افت فشار درون لوله‌های میکروفین دار با عدد رینولدز تغییر می‌کند اما رابطه بلازیوس قدیمی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک جوابگو نیست. به همین دلیل آن‌ها بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی رابطه جدیدی ارائه کردند که بتواند ضریب اصطکاک را هم در لوله‌های میکروفین دار و هم در لوله‌های صاف پیش‌بینی کند.

درخشان و اخوان افت فشار و ضریب اصطکاک را برای جریان نانوسیال کربن نانوتیوب در لوله میکروفین دار و بدون میکروفین بررسی کردند. لوله تحت شرط دیواره با شار حرارتی ثابت قرار داشت و سیال پایه روغن و درصدهای جرمی ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۲٪ نانوسیال کربن نانوتیوب درون لوله صاف و لوله میکروفین دار مورد آزمایش قرار گرفت [۲]. نتایج آن‌ها نشان می‌داد با افزایش زاویه میکروفین‌ها از ۰ تا ۹۰ افت فشار زیاد شده و همچنین با افزایش عدد گراشف نیز افت فشار بیشتر می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اثر افزودن کربن نانوتیوب به سیال پایه در تأثیر قابل توجهی در میزان افت فشار و ضریب اصطکاک ندارد. آن‌ها اظهار کردند که با در نظر گرفتن میزان افزایش افت فشار، به‌کارگیری نانوسیال در لوله صاف در عدد ریچاردسون بالا راهی مؤثر برای کاربردهای صنعتی است. آن‌ها یک رابطه تجربی برای برآورد ضریب اصطکاک پیشنهاد دادند.

وو و همکاران انتقال حرارت را هندسه‌های مختلف لوله میکروفین دار مورد بررسی قرار دادند [۳]. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که مدل ارائه شده توسط آن‌ها قابلیت پیش‌بینی ۹۰٪ از داده‌ها را با خطای در حدود ۳۰٪ را به همراه دارد.

اسلام و میارا با استفاده از نرم‌افزار فلونت رفتار جریانی تک فاز و نیز مشخصه‌های انتقال حرارت درون لوله میکروفین دار را مورد پژوهش قرار دادند [۴]. آن‌ها از روش $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته در این لوله‌ها استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که با مشاهده خطوط جریان در مقطع عرضی لوله مشخص می‌شود که میکروفین‌ها در لوله چهار جریان دایره‌ای شکل در گوشه‌های لوله ایجاد می‌کنند به‌طوری که جریان در ناحیه مرکزی لوله متراکم‌تر است. همچنین آن‌ها



اظهار داشتند که پیچیدگی جریان اطراف میکروفین‌ها به ضریب اصطکاک لوله بستگی دارد و این رفتار جریانی در مقطع عرضی نقش مهمی در افزایش انتقال حرارت ایفا می‌کند.

آگرا و همکاران افزایش انتقال حرارت و افت فشار در لوله صاف و دو لوله میکروفین‌دار مختلف که در پژوهش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [۵]. آن‌ها ابتدا با استفاده از نرم‌افزار گمبیت به رسم هندسه و ایجاد شبکه‌بندی مناسب پرداختند و در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت با رعایت کلیه شرایط مرزی حاکم بر شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی عددی جریانی و حرارتی را انجام دادند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای ضریب اصطکاک علاوه بر رابطه بلازیوس، با روابط ارائه شده در پژوهش‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و نشان داده شد که حداکثر اختلاف نتایج عددی با روابط ارائه شده آزمایشگاهی حداکثر ۰.۵٪ و حداکثر اختلاف با رابطه بلازیوس حداکثر ۱۰٪ می‌باشد.

با مطالعه پژوهش‌های انجام شده روی لوله‌های میکروفین‌دار مشخص می‌شود که علیرغم وجود فعالیت‌های آزمایشگاهی و عددی مختلف انجام شده روی این موضوع، نتایج مختلف و بعضاً متناقض به دست آمده است و در مورد تأثیر حضور لوله‌های میکروفین‌دار در انتقال حرارت و افت فشار نتیجه‌گیری یکسانی وجود ندارد. از سوی دیگر به دلیل اینکه پارامترهای هندسی میکروفین بر انتقال حرارت و میزان افت فشار تأثیرگذار است، خلأ وجود یک مطالعه که به بررسی تأثیر متغیرهای هندسی بر انتقال حرارت و افت فشار بپردازد، احساس می‌شود.

در این مطالعه، ابتدا شبیه‌سازی جریانی و حرارتی درون لوله صاف و نیز نمونه‌های مختلف لوله میکروفین‌دار انجام خواهد شد. تفاوت این لوله‌ها در تعداد میکروفین، ارتفاع آن‌ها، زاویه پیش و زاویه راس فین‌ها خواهد بود ضمن اینکه دما و دبی جریان ورودی و دمای دیواره نیز تغییر خواهد کرد.

۲- معادلات حاکم

از آنجا که سیال درون لوله‌های میکروفین‌دار آب می‌باشد می‌توان از معادلات حاکم برای جریان تراکم‌ناپذیر استفاده کرد. جهت تعیین اینکه نوع جریان آب درون لوله میکروفین‌دار و اطراف فین‌ها جریان آرام و یا آشفته است از عدد رینولدز استفاده می‌شود. عدد رینولدز نشان دهنده نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوزیتی می‌باشد و یک عدد بدون بعد می‌باشد. عدد رینولدز از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

که v سرعت خطی سیال، D قطر لوله، ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی و ν ویسکوزیته جنبشی سیال است. اگر عدد رینولدز محاسبه شده کمتر از ۲۳۰۰ باشد جریان آرام و در غیر این صورت جریان آشفته می‌باشد. با توجه به هندسه لوله و سرعت جریان، مقدار عدد رینولدز در محدوده ۱۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ می‌باشد که با توجه به مطالب بیان شده، جریان درون لوله میکروفین‌دار آشفته می‌باشد.

در جریان آشفته نمی‌توان یک رابطه کلی بین میدان تنش و میدان سرعت متوسط ایجاد کرد. برای تحلیل جریان آشفته روش‌های مختلفی ارائه شده است که یکی از این روش‌ها بیان معادلات بر اساس مقادیر متوسط زمانی است. در این روش مؤلفه‌های سرعت، دما و فشار به شکل مجموع دو جمله متوسط و نوسانی بیان می‌شوند. پس معادلات بقا برای جریان آشفته به شکل زیر می‌باشند:

- بقای جرم

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

(۲)

- بقای مومنتم

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla \bar{p} + \nabla (\mu \cdot \nabla \vec{V}) - \nabla \cdot (\rho \vec{V}' \vec{V}')$$

(۳)

- بقای انرژی

$$\nabla \cdot (\rho C_p \vec{V} \bar{T}) = \nabla \cdot (k \nabla \bar{T} - \rho C_p \vec{V}' \bar{T}')$$

(۴)

که در معادلات بالا \bar{V} و \bar{p} و \bar{T} به ترتیب بیانگر سرعت، فشار و دمای متوسط می‌باشند و V' و T' بیانگر نوسانات سرعت و دما می‌باشند. همچنین دو جمله $\rho \vec{V}' \bar{T}'$ و $\rho C_p \vec{V}' \bar{T}'$ به ترتیب بیان کننده تنش برشی درهم و شار حرارتی درهم می‌باشند که به شیوه‌های گوناگون بر اساس سرعت و دمای متوسط تخمین زده می‌شوند. برای حل نیاز به مدل‌های تقریب بهتری هست تا بتوان مقادیر تنش برشی آشفته و شار حرارتی آشفته را به دست آوریم که روش $\kappa - \varepsilon$ یکی از این روش‌ها می‌باشد.

اما برای به محاسبه ضریب انتقال حرارت حاصل از شبیه سازی عددی، چون جریان در یک لوله کاملاً محصور است، می‌توان با استفاده از موازنه انرژی، تغییرات دمای میانگین $T_m(x)$ در طول لوله و رابطه‌ی بین انتقال گرمای جابجایی و اختلاف دمای ورودی و خروجی را به دست آورد و با استفاده از آن، عدد ناسلت را نیز محاسبه کرد.

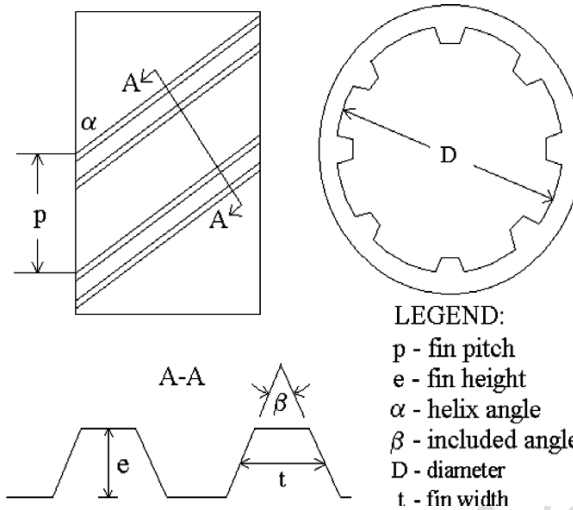
$$\bar{h} = \frac{\dot{m} c_p}{PL} \ln \left(\frac{T_s - T_{m,i}}{T_s - T_{m,o}} \right) \quad (۵)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} D}{k} \quad (۶)$$

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- مدل سازی هندسی

از آنجا که این پژوهش به شبیه سازی عددی جریان درون لوله میکروفین دار می‌پردازد و باید نتایج حاصل از این شبیه سازی حتماً مورد صحت سنجی قرار گیرد، برای سهولت این امر از هندسه مطالعه زدانیوک و همکاران استفاده شده است [۶]. پارامترهای هندسی لوله میکروفین دار که در نتایج شبیه سازی مؤثر هستند عبارتند از: گام فین (p)، ارتفاع فین (e)، زاویه پیچش (α)، زاویه راس فین (β)، ضخامت بالای فین (t_i)، ضخامت پایین فین (t_b)، قطر داخلی لوله (D_i) و تعداد فین‌ها (N). شماتیک هندسی لوله میکروفین دار و پارامترهای آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



LEGEND:

p - fin pitch
e - fin height
 α - helix angle
 β - included angle
D - diameter
t - fin width

شکل (۱): شماتیک لوله میکروفین دار [۶]

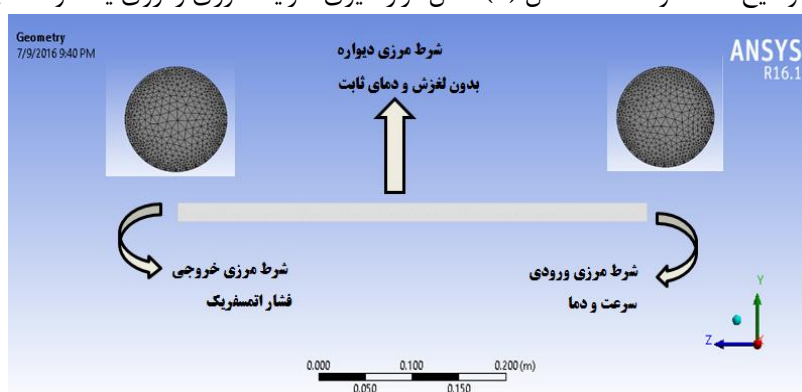
طول لوله در این پژوهش ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه راس ۴۱ درجه و ضخامت فین در پایه ۰/۴۸ میلی‌متر و ضخامت آن در بالای فین ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات لوله‌های شبیه‌سازی شده در جدول (۱) ذکر شده‌اند.

جدول (۱): مشخصات هندسی لوله‌های میکروفین دار

شماره لوله	ارتفاع فین (e) (mm)	زاویه پیچش (α)	قطر داخلی لوله (Di) (mm)	تعداد فین‌ها (N)
۱	۰/۳۸	۲۵	۱۵/۵	۱۰
۲	۰/۳۸	۲۵	۱۵/۵	۳۰
۳	۰/۳۸	۴۸	۱۵/۵	۳۰
۴	۰/۳۸	۲۵	۱۵/۵	۴۵
۵	۰/۳۱	۳۵	۱۵/۵	۴۵
۶	۰/۳۸	۳۵	۱۵/۵	۴۵
۷	۰/۵۱	۳۵	۱۵/۵	۴۵
۸	۰/۳۸	۴۸	۱۵/۵	۴۵
۹	-	-	۱۵/۵	-

۳-۲- شرایط مرزی

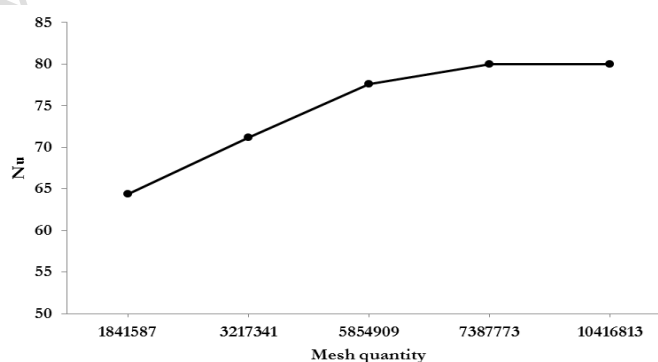
برای حل معادلات بقای بیان شده در بخش قبلی از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است و گسسته سازی معادلات به وسیله روش حجم کنترل انجام شده است. سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپل با یکدیگر کوپل شده‌اند. لازم به ذکر نوع شرط مرزی در تمامی شبیه سازی های انجام شده اعم از لوله های میکروفین دار شماره ۱ تا ۸ و نیز لوله بدون میکروفین ثابت می باشد. تفاوت شبیه سازی ها در هندسه لوله های مدلسازی شده و نیز شرط مرزی ورودی برای اعداد رینولدز مختلف می باشد که مورد آخر در ادامه توضیح داده خواهد شد. شکل (۲) محل قرار گیری شرایط مرزی را روی یک لوله نمایش می دهد.



شکل (۲): محل قرار گیری شرایط مرزی روی لوله

۳-۳- استقلال از شبکه

تعیین سایز مناسب شبکه بیشترین زمان تحلیل سه بعدی را به خود اختصاص می دهد، چرا که کیفیت شبکه بندی، روند همگرایی را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. حل یک مسئله دینامیک سیالات عددی باید مستقل از شبکه باشد یعنی تغییرات جواب ها به ازای ریزتر شدن شبکه قابل نظر باشد. به منظور بررسی استقلال نتایج نسبت به تعداد المان‌ها و دست یافتن به تعداد المان بهینه، لوله میکروفین دار شماره ۱ با تعداد المان‌های متفاوتی از جمله ۱۸۴۱۵۸۷، ۳۲۱۷۳۴۱، ۵۸۵۴۹۰۹، ۷۳۸۷۷۷۳ و ۱۰۴۱۶۸۱۳ شبکه بندی شده است و پس از انجام شبیه سازی، عدد ناسلت میانگین برای جریان آب در هر کدام از شبکه ها محاسبه شده است.



شکل (۳): محل قرار گیری شرایط مرزی روی لوله

شکل (۳) نمودار مقدار عدد ناسلت پیش بینی شده توسط شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای شبکه‌های با تعداد المان بیشتر از ۷۳۸۷۷۷۳ تغییرات جواب‌ها قابل صرف‌نظر کردن است به همین دلیل در این پژوهش از شبکه با تعداد المان ۷۳۸۷۷۷۳ برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است.

۳-۴- استقلال از شبکه

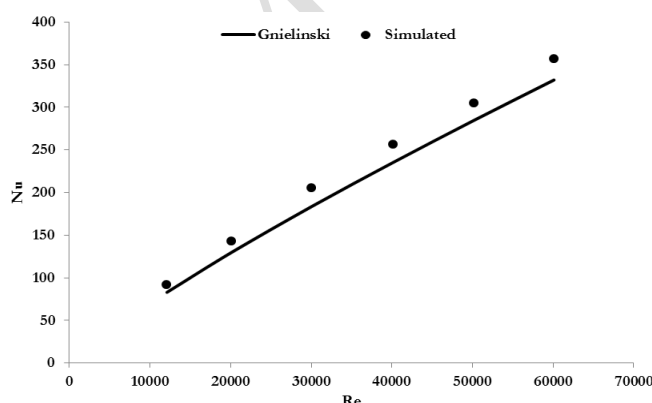
همانطور که در بخش ۳-۳ بیان شد ناحیه محاسباتی با تعداد شبکه مختلف ایجاد و کیفیت آنها مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا برای بررسی صحت روش حل و نیز دقت آن، نتایج استقلال از شبکه برای جریان آشفته سیال آب نشان داده شده است. برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، نتایج آن با نتایج رابطه گنیلینسکی مقایسه شده است که این رابطه به شرح زیر است:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\left(\frac{C_f}{8}\right)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{C_f}{8}\right)^{1/2}\left(Pr^{2/3} - 1\right)} \quad (7)$$

که معادله (۷) برای $1.5 < Pr < 500$ و نیز $3000 < Pr < 10^6$ برقرار است. برای محاسبه f در جریان آشفته نیز از رابطه (۶) استفاده می‌شود:

$$C_f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (8)$$

مقدار عدد ناسلت متوسط شبیه‌سازی شده با استفاده از شبکه‌های مختلف و نیز مقدار پیش‌بینی شده آن توسط رابطه گنیلینسکی در جدول زیر آورده شده است:



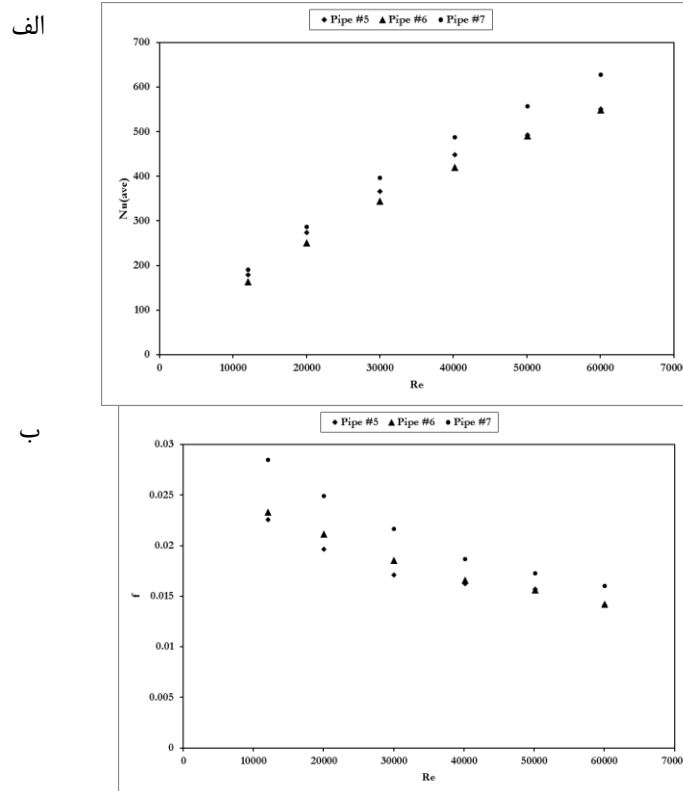
شکل (۴): نمودار مقایسه نتایج عددی با نتایج رابطه گنیلینسکی

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، حداکثر خطا برای شبکه انتخاب شده با نتایج رابطه گنیلینسکی کمتر از پنج درصد می‌باشد که نشان‌دهنده دقت خوب حل و شبکه انتخاب شده می‌باشد.

۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- بررسی اثر تغییر ارتفاع میکروفین

جریان درون لوله‌های ۵، ۶ و ۷ برای بررسی اثر تغییر ارتفاع فین روی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت میانگین شبیه‌سازی شد و نتایج آن در شکل زیر نشان داده شده است.



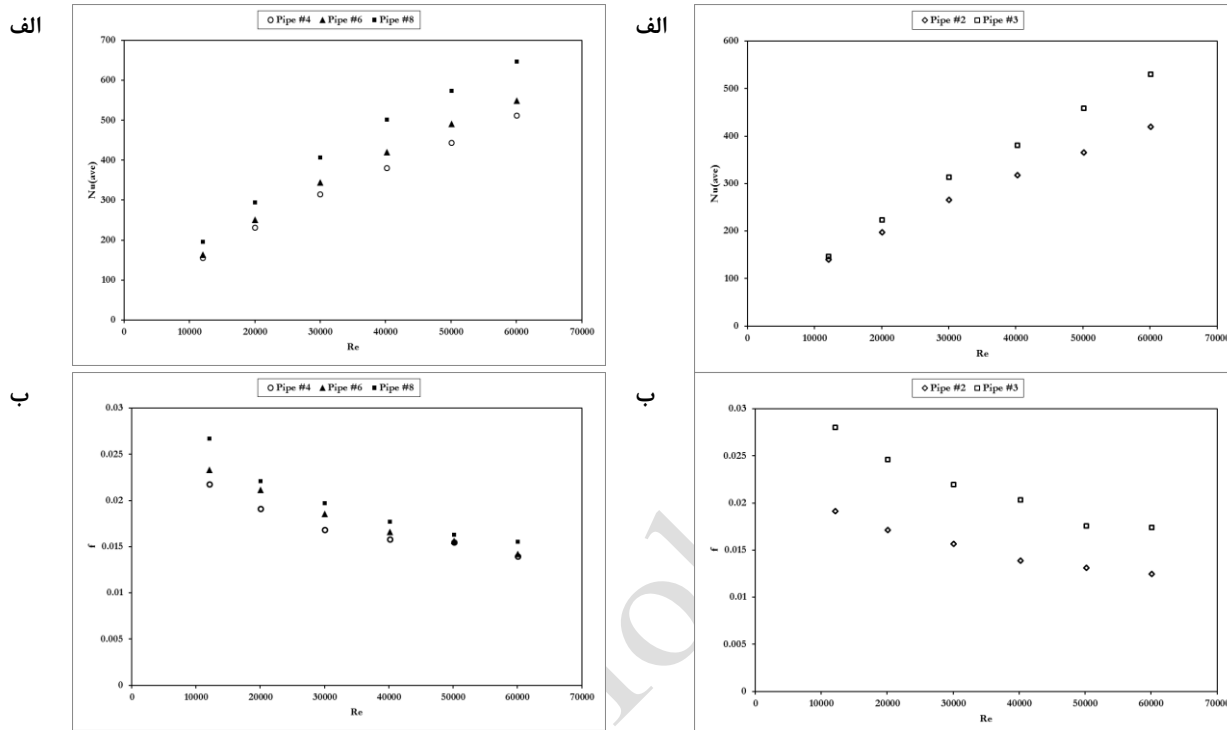
شکل (۵): نمودار تاثیر تغییر ارتفاع میکروفین روی الف: عدد ناسلت میانگین، ب: تغییرات ضریب اصطکاک در لوله‌های ۵، ۶ و ۷

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع میکروفین میزان عدد ناسلت میانگین افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش عدد ناسلت میانگین در لوله شماره ۷ با مقدار ۱۰۷٪ و کمترین افزایش آن در لوله با مقدار ۵۳٪ می‌باشد. افزایش عدد ناسلت میانگین می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش ارتفاع میکروفین‌ها، مساحت سطوح جانبی میکروفین‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه انتقال حرارت در سطح بیشتری انجام می‌شود که موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. همچنین این افزایش ارتفاع میکروفین باعث می‌شود که ضریب اصطکاک درون لوله نیز بیشتر می‌شود تا آنجا که بیشترین افزایش آن در لوله شماره ۷ حدود ۳/۲ برابر مقدار آن در لوله بدون میکروفین است. کمترین مقدار افزایش ضریب اصطکاک نیز ۲/۳ برابر لوله بدون میکروفین و در لوله شماره ۵ می‌باشد. باید توجه کرد این افزایش ضریب اصطکاک موجب افزایش افت فشار در لوله میکروفین‌دار خواهد شد که این امر مستلزم صرف هزینه بیشتر می‌باشد و عامل نامطلوبی در طراحی سیستم‌های مبادله کننده حرارت خواهد بود.

۴-۲- بررسی اثر تغییر زاویه پیچش میکروفین

نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان لوله‌های ۲ و ۳ و نیز لوله‌های ۴، ۶ و ۸ که به صورت جداگانه مربوط به بررسی اثر

زاویه پیچش میکروفین‌ها می‌باشد در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند.



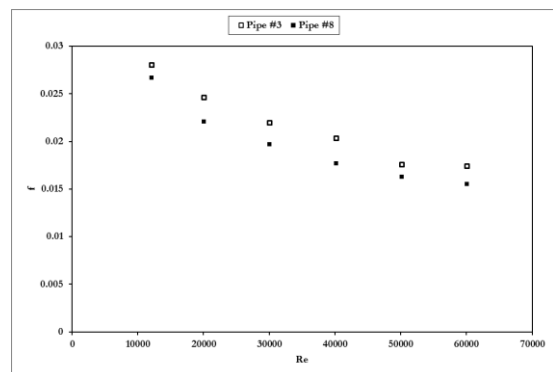
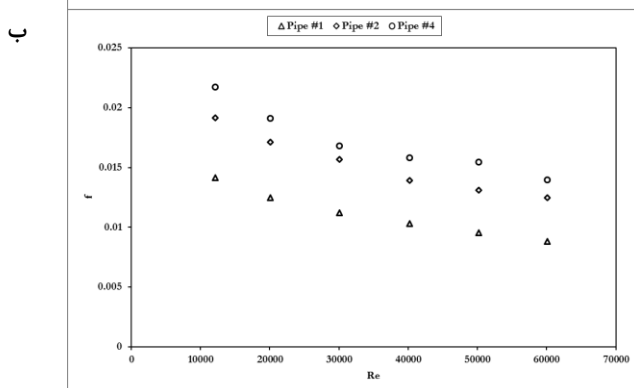
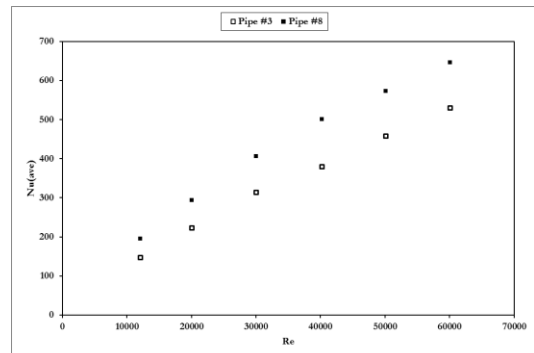
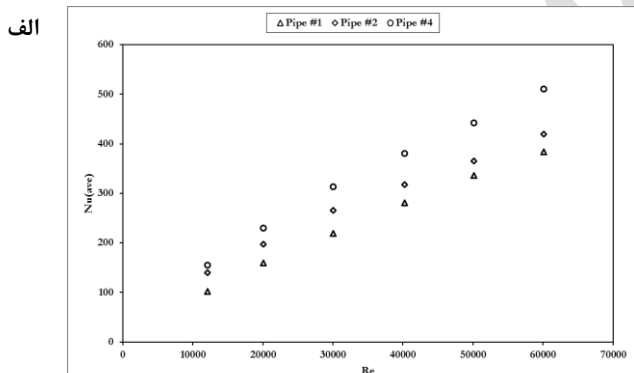
شکل (۷): نمودار تاثیر تغییر زاویه پیچش میکروفین روی الف: عدد ناسلت میانگین، ب: تغییرات ضریب اصطکاک در لوله های ۲ و ۳
 شکل (۶): نمودار تاثیر تغییر زاویه پیچش میکروفین روی الف: عدد ناسلت میانگین، ب: تغییرات ضریب اصطکاک در لوله های ۴، ۶ و ۸

نتایج به دست آمده از شبیه سازی نمایش داده شده در شکل (۶) مربوط به لوله های ۲ و ۳ مشابه نتایج شکل (۷) مربوط به لوله های ۴، ۶ و ۸ می باشد. کاملاً مشخص است که با افزایش زاویه پیچش میکروفین ها مقدار عدد ناسلت میانگین نیز افزایش می یابد. این بهبود مقدار انتقال حرارت می تواند به این دلیل باشد که با افزایش زاویه پیچش میکروفین ها، اختلاط سیال درون بیشتر می شود و به همین دلیل اختلاف دمای توده سیال با دمای سیال مجاور دیواره کاهش می یابد. دلیل دیگری که شاید موجب افزایش شده باشد این است که با افزایش زاویه پیچش میکروفین ها در طول مشخصی از لوله میکروفین بیشتری قرار می گیرد. در نتیجه سطح مبادله کننده حرارت نیز افزایش یافته و بنابراین میزان انتقال حرارت و شاخصه های آن نیز بهبود پیدا می کنند.

همچنین دلیل افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک می تواند به این دلیل باشد که با تغییر زاویه پیچش میکروفین ها در لوله ها، گردابه های تشکیل شده در اطراف دیواره در اثر پیچش میکروفین ها و نیز ضخامت لایه مرزی تشکیل شده در اطراف دیواره افزایش می یابد و به همین دلیل پروفیل دمایی زودتر به توسعه یافتگی می رسد.

۳-۴- بررسی اثر تغییر تعداد میکروفین

جریان آشفته درون لوله های ۳ و ۸ و نیز لوله های ۱، ۲ و ۴ برای بررسی اثر تعداد میکروفین ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند.





مشابه پارامترهای هندسی قبلی، نشان داده شد که افزایش تعداد میکروفین‌ها سبب افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین و نیز ضریب اصطکاک خواهد شد. به طور کلی بررسی نتایج شبیه‌سازی لوله‌های مختلف نشان داد که افزودن میکروفین‌ها موجب افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین، عدد ناسلت میانگین و نیز میزان ضریب اصطکاک می‌شود.

مراجع

- [۱] A. Celen, A.S. Dalkılıç, S. Wongwises, "Experimental analysis of the single phase pressure drop characteristics of smooth and microfin tubes", International Communications in Heat and Mass Transfer (46), 58–66, 2013.
- [۲] M.M. Derakhshan, M.A. Akhavan-Behabadi, "An empirical study on fluid properties and pressure drop of nanofluid flow inside inclined smooth and microfin tubes", International Communications in Heat and Mass Transfer (65), 111–116, 2015.
- [۳] Z. Wu, B. Sundén, V.V. Wadekar, W. Li, "Heat Transfer Correlations for Single-Phase Flow, Condensation, and Boiling in Microfin Tubes", Heat Transfer Engineering (36), 582–595, 2015.
- [۴] M.A. Islam, A. Miyara, "Numerical Investigation of Flow behavior and Heat Transfer Characteristics inside Herringbone Microfin Tube", International Journal of Engineering Research and Applications (2), 1006–1009, 2012.
- [۵] Ö. Ağra, H. Demir, Ş.Ö. Atayılmaz, F. Kantaş, A.S. Dalkılıç, "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in enhanced tubes", International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (10), 1384–1391, 2011.
- [۶] G.J. Zdaniuk, L.M. Chamra, P.J. Mago, Experimental determination of heat transfer and friction in helically-finned tubes, Experimental Thermal and Fluid Science 32 (3), 761–775, 2008.