

بررسی لایه مرزی سرعت و حرارت در داخل و خارج لوله مارپیچ

الهه نشاط اسفهلانی^۱، سیامک حسین پور^۲

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، e_neshat@sut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، hossainpour@sut.ac.ir

چکیده

هدف اصلی این مطالعه بررسی هندسه لایه مرزی حرارت و سرعت در اطراف دیواره لوله مارپیچ در یک مبدل حرارتی پوسته-لوله ای است. برای نیل به این هدف هندسه مبدل حرارتی مورد نظر با استفاده از نرم افزار گمبیت شبیه سازی شده و شرایط مرزی مناسب تعریف گشته اند. حل معادلات حاکم نیز با استفاده از نرم افزار فلوئنت صورت پذیرفته است. از مهمترین نقاط قوت این مطالعه شبیه سازی تمامی فضای مبدل و حل معادلات حاکم برای سیال داخل پوسته و لوله به صورت همزمان می باشد. بنابراین شرط مرزی ویژه ای برای دیواره لوله، نظیر شار ثابت و دما ثابت تعریف نشده است. و برای پیوسته کردن فضای حل معادلات انتقال حرارت هدایتی در راستای ضخامت لوله تعریف شده است. سیال گرم در داخل مخزن بوده و سیال سرد از داخل لوله عبور می کند. بنابراین جابجایی آزاد ناپایا بین سیال داخل مخزن و دیواره بیرونی لوله وجود دارد. در حالیکه انتقال حرارت سطح داخلی لوله با سیال سرد موجود در لوله از نوع انتقال حرارت جابجایی اجباری ناپایا است. پس از حل معادلات حاکم توزیع دما و سرعت بر روی صفحه های عمودی و موازی با لوله ترسیم شده و لایه های مرزی حرارتی و سرعت در آنها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از مشاهدات نشان می دهند که لایه مرزی حرارت دارای نوسانات محسوسی در اطراف سطح بیرونی لوله است در حالیکه لایه مرزی سرعتی فقط محدوده مشخصی از اطراف لوله را شامل شده و به دلیل وجود جابجایی آزاد، سرعت آن در سایر نقاط تقریباً صفر است.

کلمات کلیدی

مبدل حرارتی پوسته و لوله ای، لوله مارپیچ، عدد ناسلت، دمای بی بعد

۱. مقدمه

اگر سیالی با دیواره ای در تماس باشد ناحیه ای را که در آن سیال دارای گردایان دمایی است لایه مرزی حرارتی و ناحیه ای را که سیال در آن دارای گردایان سرعت است لایه مرزی سرعت می نامند. هر چه لایه مرزی حرارتی در اطراف یک سطح بیشتر باشد ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یافته و انتقال حرارت بیشتری صورت می گیرد. بنابراین در مبدل های حرارتی که هدف انتقال هر چه بیشتر حرارت است، آشنایی با میزان تغییرات ضریب انتقال حرارت و به تناسب آن جزئیات لایه مرزی اهمیت قابل توجهی می یابد. از جمله مبدل های حرارتی مورد استفاده در صنعت مبدل های حرارتی لوله ماریپیچ هستند که بصورت دو لوله ای و پوسته- لوله ای مورد استفاده قرار می گیرند. لوله های ماریپیچ در مقایسه با لوله های ساده به دلیل داشتن مساحت جانبی بزرگتر حرارت بیشتری را از خود انتقال می دهند به همین دلیل سبب افزایش بازده مبدل های حرارتی می گردند. امروزه مطالعات زیادی برای بررسی روش های موجود جهت افزایش بازده این مبدل ها انجام شده است. شاید از مهمترین این روش ها ایده تغییر رژیم جریان داخل لوله و پوسته از آرام به مغشوش باشد. این ایده می تواند با تغییر دادن لایه های مرزی حرارت و سرعت در داخل و بیرون آن صورت پذیرد [۸-۱].

استفاده از موانع (فین) متصل به دیواره لوله از مهمترین راهکارها برای ایجاد تغییر در لایه های مرزی سرعت و حرارت و به تبع آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و افزایش میزان انتقال حرارت است. از جمله تحقیقات انجام یافته در این زمینه می توان به مطالعات دراست و همکاران و مطالعه چیراک و همکاران اشاره نمود. دمش بر روی لایه مرزی نیز از دیگر روش هایی است که سبب تغییر در ضخامت لایه مرزی و در نتیجه سبب تغییر در میزان حرارت انتقال یافته از دیواره لوله می شود. در این زمینه نیز مطالعات زیادی انجام یافته است که از مهمترین آنها می توان به مطالعه انجام شده توسط لاندیز و همکارش که بصورت عددی صورت پذیرفته است و مطالعه انجام شده توسط سو و یو اشاره نمود که مطالعه مذکور نیز مطالعه ای عددی بوده است [۸-۱].

لایه مرزی در بیرون و داخل لوله ساده مورد بحث بسیاری از مطالعات و تحقیقات گذشته بوده است [۹-۱۲]. در حالیکه بررسی جامعی در زمینه لایه مرزی در اطراف و داخل لوله ماریپیچ وجود ندارد. جایاکومار در مطالعه خود در سال ۲۰۰۸ با استفاده از حل عددی و تصویر برداری از مقاطع مختلف لوله نشان داد که در لوله های ماریپیچ بعد از اتمام طول هیدرودینامیکی تمامی ناحیه داخل لوله لایه مرزی سرعت نبوده و فقط بخش هایی از لوله که در نزدیکی دیواره قرار دارند در لایه مرزی سرعت قرار می گیرند [۱۳].

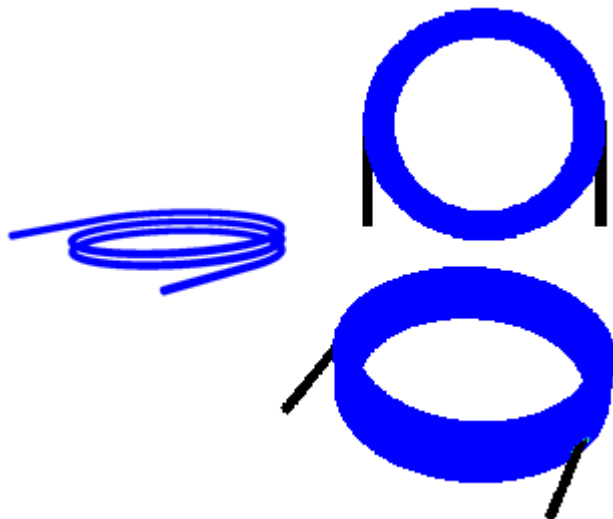
هدف اصلی در مطالعه حاضر بررسی تغییرات لایه مرزی حرارت و لایه مرزی سرعت در داخل و خارج از لوله ماریپیچ است. برای نیل به این هدف ابتدا مبدل حرارتی مورد نظر طراحی شده است. مبدل حرارتی مورد نظر شامل یک لوله ماریپیچ که جریان سیال سرد از داخل آن عبور می کند و یک مخزن که دارای سیال گرم ساکن است، می باشد. لوله ها بصورت عمودی و افقی در داخل مخزن قرار می گیرند. با شروع به کار مبدل، حرارت از سیال گرم داخل مخزن به سیال سرد داخل لوله منتقل می شود. با توجه به اینکه در ابتدا سیال داخل مخزن ساکن است انتقال حرارت از سطح بیرونی لوله ماریپیچ از نوع انتقال حرارت جابجایی آزاد می باشد. اگر چه سیال داخل مخزن در ابتدا ساکن است اما با شروع انتقال حرارت جابجایی، با تغییرات چگالی سیال، حرکت ذرات آن آغاز شده و به این ترتیب لایه های مرزی سرعت و حرارت در اطراف سطح بیرونی لوله شکل می گیرد. در نهایت می توان با تصویر برداری از نواحی مختلف در اطراف لوله، لایه مرزی اطراف آنرا بررسی نمود.

۲. روش شناسی

۲.۱. روش عددی مورد استفاده

برای شبیه سازی هندسه مبدل حرارتی مورد نظر از نرم افزار گمبیت استفاده شده است. شرایط اولیه و مرزی با استفاده از نرم افزار فلونت تعریف شده و حل معادلات حاکم نیز با استفاده از همین نرم افزار صورت پذیرفته است. معادلات حاکم

شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم در هر سه بعد، معادله انرژی و معادلات مربوط به اغتشاش می باشد. مدل اغتشاشی مورد استفاده در این مطالعه مدل $k-\omega$ می باشد. خطای همگرایی برای انرژی محاسبه شده 10^{-8} بوده و برای سایر مؤلفه ها 10^{-5} می باشد. هندسه مبدا حرارتی مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. به سبب کاهش حجم معادلات، هندسه مخزن به صورت استوانه ای توخالی تعریف شده است. بدیهی است که در صورت تغییر جهت شتاب جاذبه زمین لوله بصورت افقی یا عمودی در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۱: تصویری از هندسه یکی از مبدا های حرارتی شبیه سازی شده

برای تمامی نمونه ها جریان داخل لوله بصورت اغتشاشی در نظر گرفته شده است. شرط مرزی تعریف شده برای سیال ورودی به داخل لوله دما و سرعت ثابت است. دیواره مخزن نیز بصورت عایق در نظر گرفته شده است. شرط اولیه مورد نیاز برای حل مسئله نیز دمای اولیه سیال داخل مخزن می باشد. هر دو سیال داخل لوله و مخزن آب می باشد و به دلیل شبیه سازی دقیق عملکرد مبدا حرارتی، به سبب وجود انتقال حرارت جابجایی آزاد که انتقال حرارتی وابسته به تغییرات چگالی با تغییرات دما می باشد، از خواص متغیر با دما استفاده شده است. خواص مورد استفاده در این مطالعه در روابط ۱-۴ نشان داده شده اند.

$$\mu(T) = 2.1897 \times 10^{-11} \times T^4 - 3.055 \times 10^{-8} \times T^3 + 1.6028 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.003752 \times T + 0.33158 \quad (1)$$

$$\rho(T) = -1.5629 \times 10^{-5} \times T^3 + 0.011778 \times T^2 - 3.0726 \times T + 1227.8 \quad (2)$$

$$k(T) = 1.5362 \times 10^{-5} \times T^3 - 2.261 \times 10^{-3} \times T^2 + 0.010879 \times T - 1.0294 \quad (3)$$

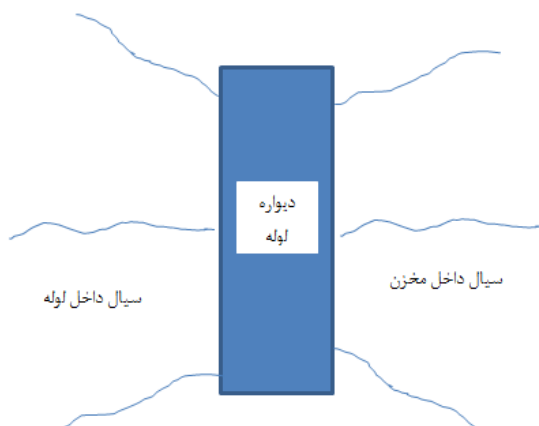
$$C_p(T) = 1.1105 \times 10^{-5} \times T^3 - 0.0031078 \times T^2 - 1.478 \times T + 4631.9 \quad (4)$$

در حل عددی از چهار نوع لوله مارپیچ مختلف که دارای هندسه های متفاوت می باشند، استفاده شده است. ویژگی های هندسی لوله های مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. از نقاط قوت مطالعه حاضر می توان به عدم استفاده از شرط مرزی خاص همانند شرط مرزی شار حرارتی ثابت و یا شرط مرزی دما ثابت برای دیواره لوله مارپیچ نام برد. در این

مطالعه فضای کامل مبدل حرارتی شبیه سازی شده است و دیواره لوله فقط به عنوان یک شرط فیزیکی جامد معرفی شده است و هیچ شرط مرزی ساده کننده ای به آن افزوده نشده است. برای پیوسته کردن فضای دو سیال داخل لوله و داخل مخزن انتقال حرارت هدایتی در راستای ضخامت لوله تعریف شده است. بنابراین دیواره لوله فقط به عنوان جامدی رفتار خواهد کرد که در دو طرف با سیال هایی با دماهای متفاوت در تماس بوده که دارای انتقال حرارت جابجایی با آنهاست و در طول خود نیز دارای انتقال حرارت هدایتی است. شکل ۲ تصویری نمادین از مکانیزم های انتقال حرارت در طرفین و داخل لوله را نشان می دهد.

جدول ۱ ویژگی های هندسی لوله های مارپیچ مورد استفاده در مطالعه

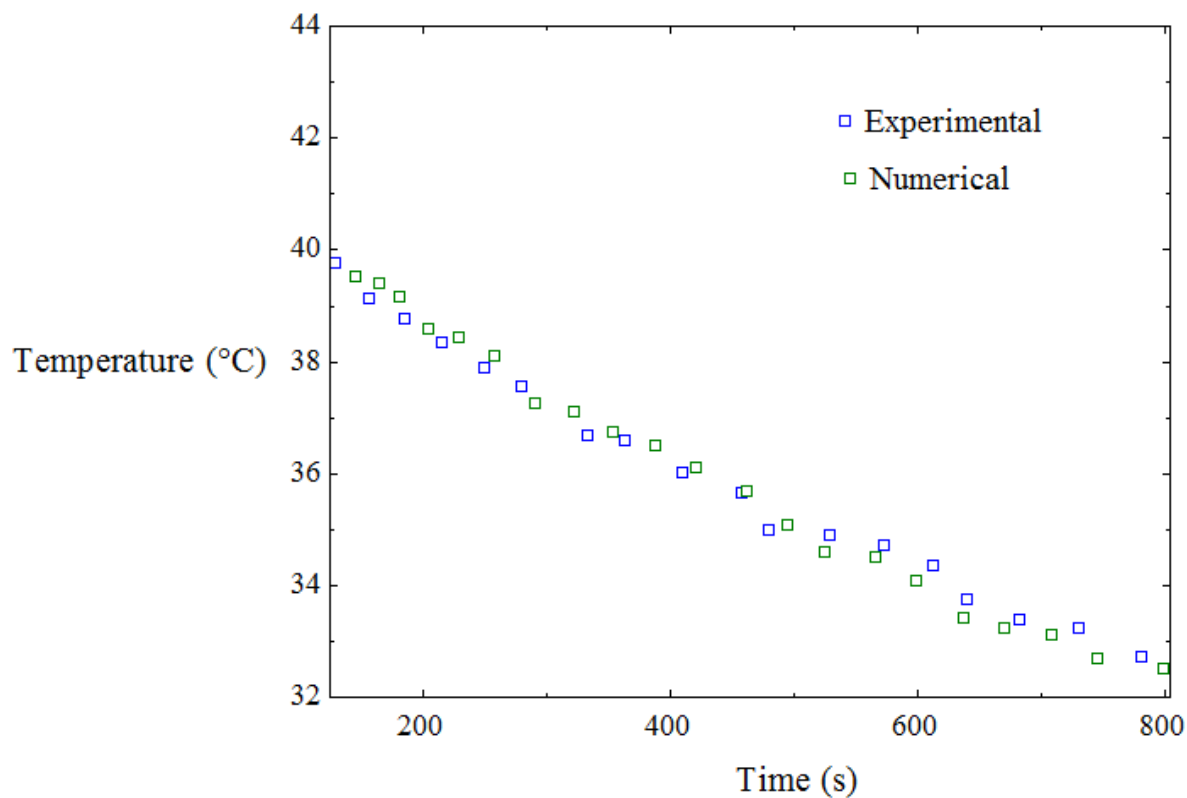
لوله	d_i (mm)	D (mm)	P (mm)	N
1	12.7	250	25	4.25
2	12.7	250	25	2.5
3	12.7	219	23	4.25
4	12.7	219	23	2.5



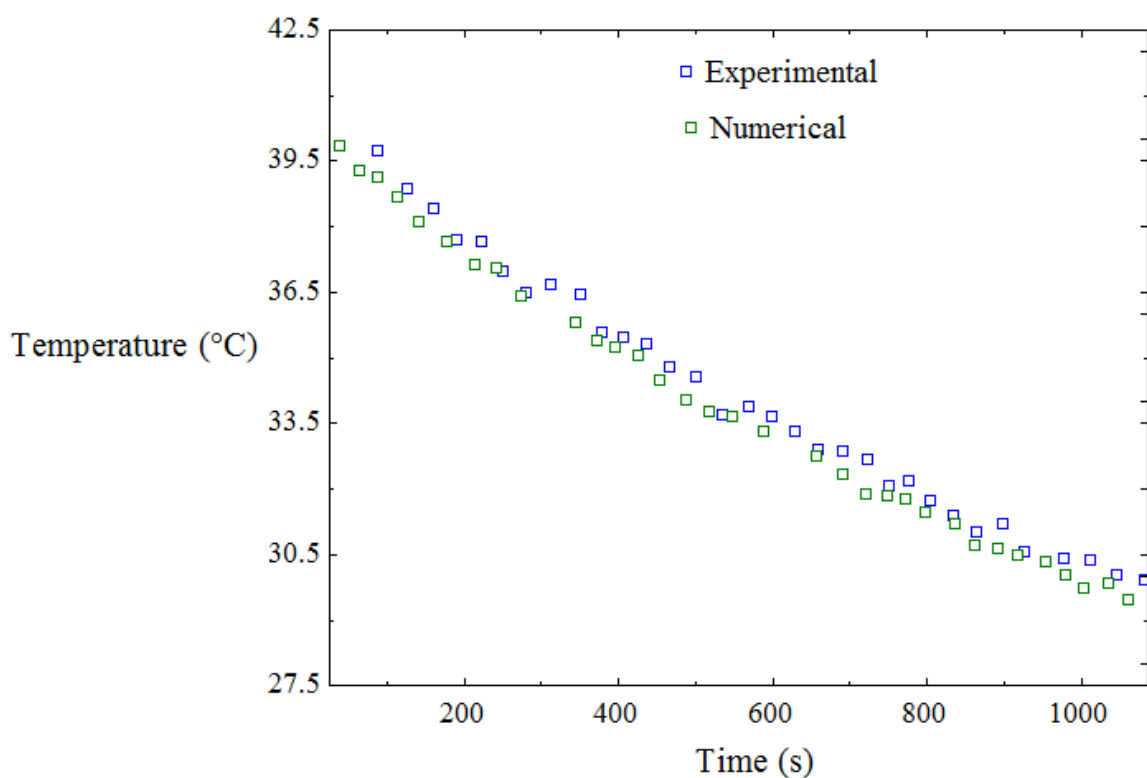
شکل ۲: دیواره لوله جسمی صلب است که با دو سیال در دو طرف خود در تماس می باشد.

۳. نتایج

پس از انجام حل عددی بر روی نمونه های مختلف مورد نظر، در ابتدا صحت سنجی مدل تعریف شده با استفاده از داده های تجربی انجام یافت. داده های تجربی مورد استفاده در آزمایشگاه توسط نویسندگان به دست آمده است. شکل ۳ دمای متوسط سیال داخل مخزن را در دماهای مختلف با استفاده از روش تجربی و عددی برای یک مبدل حرارتی با لوله مارپیچ عمودی نشان می دهد. شکل ۴ مشابه شکل ۳ می باشد با این تفاوت که داده های مورد استفاده در این شکل متعلق به یک لوله مارپیچ افقی هستند. با ملاحظه دو شکل مذکور، مشخص می شود که روش عددی به کار رفته دارای دقت مطلوبی است و می توان از آن برای نحوه توزیع لایه مرزی در اطراف لوله مارپیچ استفاده نمود.

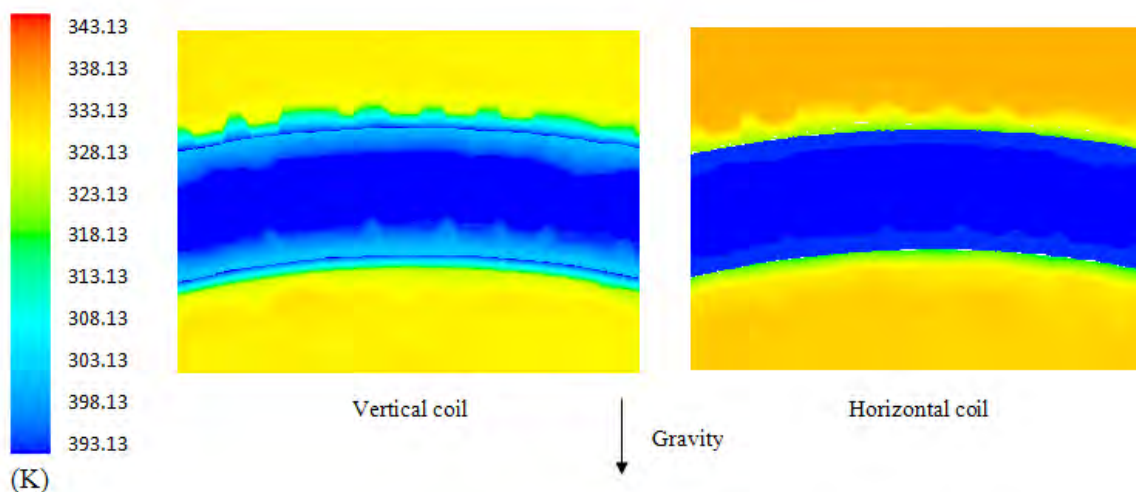


شکل ۳: دمای سیال داخل مخزن در شرایطی که لوله مارپیچ عمودی در داخل آن قرار دارد.



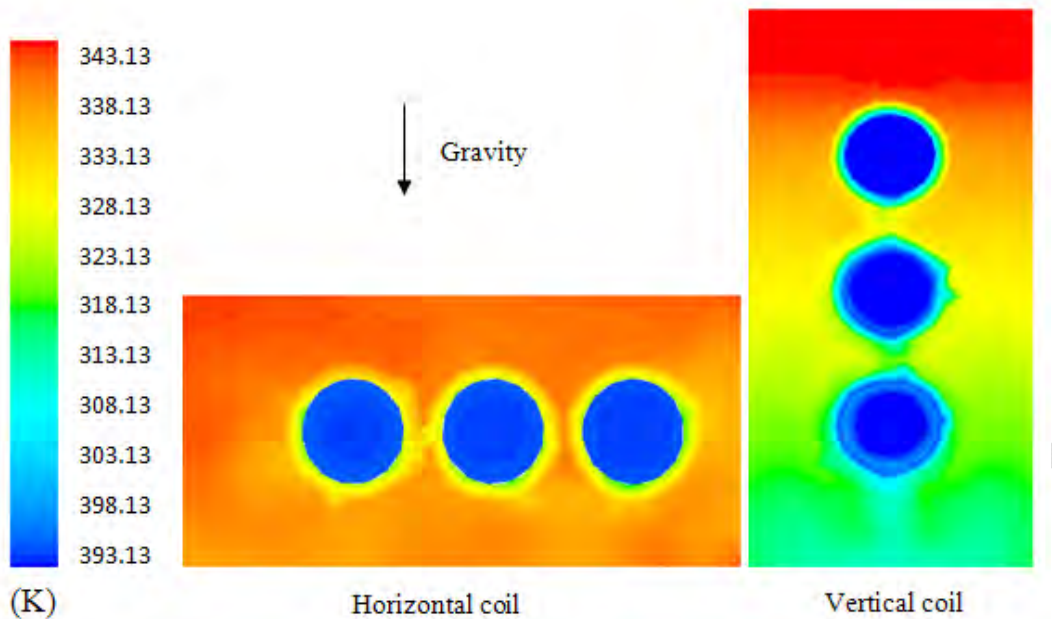
شکل ۴: دمای سیال داخل مخزن در شرایطی که لوله مارپیچ افقی در داخل آن قرار دارد.

شکل ۵ توزیع دما را در راستایی عمود بر محور لوله برای هر دو لوله افقی و عمودی نشان می دهد. این شکل، تصویری بزرگنمایی شده از سیال در کنار دیواره لوله است. همانگونه که در این شکل مشخص است لایه مرزی حرارتی، تقریباً محدوده مشخصی را در اطراف دیواره داخلی لوله داراست. بنابراین تمام فضای داخلی لوله لایه مرزی نبوده و فقط بخشی از اطراف آن دارای لایه مرزی حرارتی است که البته محدوده آن نیز قابل مشاهده است. لایه مرزی سیال داخل مخزن نیز دارای محدوده مشخصی است. دمای سیال داخل مخزن در مبدل هایی با لوله های عمودی در دو طرف سطح بیرونی لوله دارای مقادیر نسبتاً یکسانی هستند. ولی دمای سیال مخزن در اطراف دیواره لوله افقی در بالا و پایین لوله دارای تفاوت و تمایز می باشند. این مطلب به آن دلیل است که در شکل ۵ تصویر گرفته شده از لوله عمودی در ارتفاع ثابتی به دست آمده است. زیرا محور لوله عمودی هم راستا با خط شتاب جاذبه است. بنابراین در این تصویر که عمود بر محور لوله ماریپیچ گرفته شده است تمامی نقاط موجود دارای ارتفاع یکسان هستند. اما در لوله افقی ارتفاع در حال تغییر است. با توجه به ماهیت انتقال حرارت جابجایی آزاد که مبتنی بر تغییر چگالی سیال با تغییر دماست سیال گرمتر دارای چگالی کمتری شده و در ارتفاع بالاتری قرار می گیرد. و سیال سردتر به دلیل داشتن چگالی بیشتر در ارتفاع پایین تر قرار می گیرد. بنابراین تغییر دما با تغییر ارتفاع برای هر دو نوع مبدل ها وجود دارد.



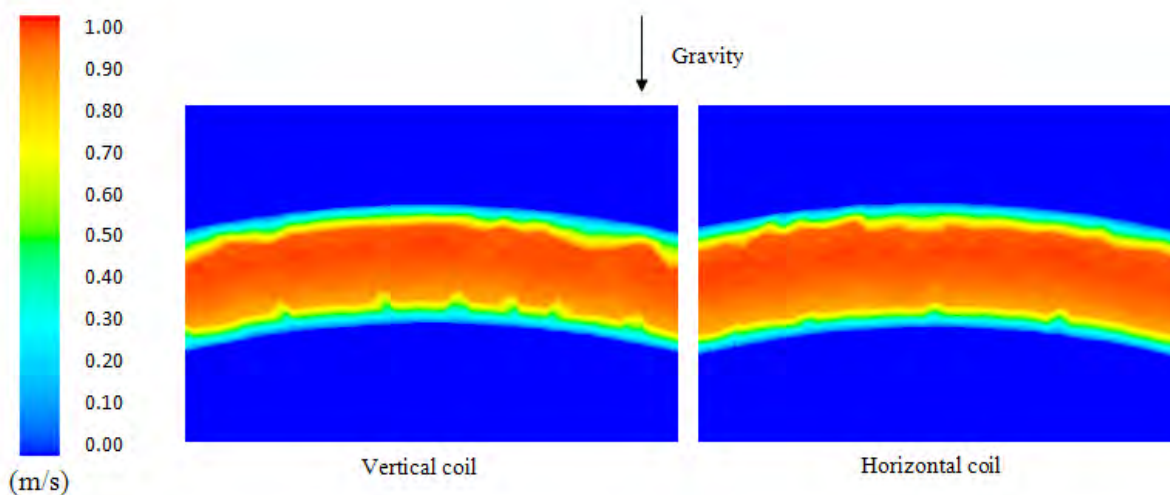
شکل ۵: توزیع دما در اطراف دیواره لوله برای سیال داخل لوله و سیال داخل مخزن در صفحه ای عمود بر محور لوله ماریپیچ

شکل ۶ توزیع دما را برای دو مبدل با لوله هاب افقی و عمودی بر روی صفحه ای موازی محور لوله ماریپیچ نشان می دهد. در این تصویر نیز تغییرات دما با تغییرات ارتفاع مشهود است. که البته به سبب استفاده از صفحه ای موازی محور لوله ماریپیچ، این بار برای لوله های عمودی روند واضح تری دارد. این شکل نیز نشان می دهد که ذراتی از سیال که دارای دمای پایین هستند در ارتفاع پایین تر و سیال های گرمتر در ارتفاع بالاتر قرار گرفته اند. همچنین این تصویر نشان می دهد که اگرچه لایه مرزی حرارتی در صفحه ای عمود بر خط شتاب جاذبه دارای محدوده ی مشخصی است ولی برای صفحه های موازی خط شتاب جاذبه به دلیل تغییرات دما با تغییر ارتفاع نمی توان لایه مرزی مشخص و محدودی را برای سیال داخل مخزن در نظر گرفت. به عبارتی به طور کلی لایه مرزی حرارتی در سیال داخل مخزن فاقد محدوده ی مشخصی است.

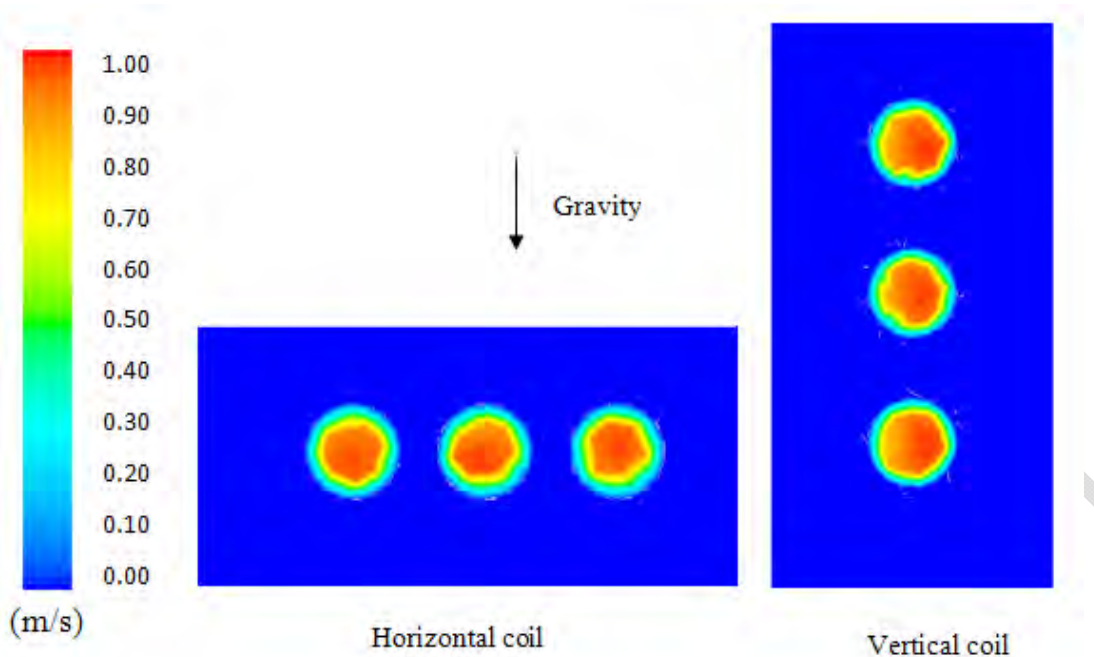


شکل ۶: توزیع دما در اطراف دیواره لوله برای سیال داخل لوله و سیال داخل مخزن در صفحه ای موازی بر محور لوله مارپیچ

شکل ۷ و ۸ توزیع های مشابهی را برای سرعت در اطراف دیواره لوله مارپیچ نشان می دهند. همانگونه که در این تصاویر مشخص است. در قسمت داخلی لوله، لایه مرزی سرعت درای مرز مشخصی نبوده و چنین به نظر می رسد که تمامی سطح مقطع لوله در محدوده ی لایه مرزی سرعت باشد. بنابراین می توان ادعا نمود که لوله های مارپیچ از نقطه نظر محدوده ی لایه مرزی سرعت مشابه با لوله های معمولی می باشند. نکته قابل توجه دیگر عدم تقارن توزیع سرعت در لوله های مارپیچ است. همانگونه که در شکل ۸ مشخص است به دلیل وارد شدن نیروی گریز از مرکز در لوله های مارپیچ به سیال، سرعت سیال اندکی افزایش می یابد. در شعاع انحنای بیشتر به دلیل وارد شدن نیروی گریز از مرکز بیشتر سرعت سیال نسبت به ذرات موجود در شعاع انحنای اندک بیشتر افزایش می یابد.



شکل ۷: توزیع سرعت در اطراف دیواره لوله برای سیال داخل لوله و سیال داخل مخزن در صفحه ای عمود بر محور لوله مارپیچ



شکل ۸: توزیع سرعت در اطراف دیواره لوله برای سیال داخل لوله و سیال داخل مخزن در صفحه ای موازی بر محور لوله مارپیچ

با توجه در شکل های ۷ و ۸ مشخص می گردد که لایه مرزی سرعت بر خلاف لایه مرزی حرارت در سیال داخل مخزن مشهود و مشخص است. در داخل مخزن به دلیل حاکم بودن مکانیزم انتقال حرارت جابجایی آزاد با دور شدن از دیواره لوله سرعت کاهش یافته و تقریباً به صفر رسیده است. قابل توجه است که برخلاف دما، سرعت تابعی از ارتفاع نیست. نتایج به دست آمده با نتایج پیشین ذکر شده در ادبیات فن دارای همخوانی مطلوبی هستند [۱۳].

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

در مطالعه حاضر به بررسی لایه مرزی سرعت و حرارت در بیرون و داخل یک لوله مارپیچ پرداخته شده است. روش مطالعه مورد نظر یک روش عددی چند بعدی بوده است. دقت مدل با استفاده از داده های تجربی سنجیده شده و مشخص شده است که مدل دارای دقت مطلوبی است. نتایج حاصل از مطالعه نشان می دهد که:

- در داخل لوله سرعت ذراتی با شعاع انحنای بیشتر از سرعت سیالاتی با شعاع انحنای کمتر است.
- تمامی فضای داخل لوله در لایه مرزی قرار دارند.
- سیال داخل مخزن فاقد مرز مشخصی برای لایه مرزی حرارتی می باشد و روند تغییرات دمای سیال داخل مخزن نامنظم است.
- لایه مرزی سرعت در سیال داخل مخزن دارای محدوده ی مشخصی است.

۵. فهرست علائم

d	قطر لوله مارپیچ، m
D	قطر منحنی مارپیچ، m
N	تعداد دوره های لوله مارپیچ
P	گام منحنی مارپیچ، m

۶. منابع

- [1] Jafari Nasr, M.R. and Polley, G.T., An algorithm for cost comparison of optimized shell and tube heat exchanger with tube insert and plain tubes, Chem. Eng. Tech., Vol.23, pp.267-272, 2000 .
- [2] Tijing, L.D., Pak, B.C., "A study on heat transfer enhancement using straight and twisted internal fin inserts ,"International Communications in Heat and Mass Transfer, xx (2006) xxx-xxx.
- [3] Drust,F., and Becker,S., FY 1973, Boundary layer transition included by a roughness element, international report, University Erlangen, Germany, INEEL LDRD Program.
- [4] Chiriac, Y.A. and Ortega, A., 2002, a numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on a isothermal surface ,int.j, heat and mass transfer. Vol.45, pp1237-1248.
- [5] Landis, R. B. and Mills, F. "The calculation of turbulent boundary layers with foreign gas injection", Int. J. of Heat Mass Transfer, v. 15, 1972, pp. 1905-1932
- [6] So, R. M. C. and Yoo, G. L., "Low Reynolds number modeling of turbulent flows with and without wall transpiration", AIAA Journal, v. 25, 1987, pp. 1556-1564.
- [7] Baker, R. J., and Launder, B. E., "The turbulent boundary layer with foreign gas injection: Measurement in zero pressure gradient", Int. J. of Heat Mass Transfer, v. 23, 2002, pp. 601-614.
- [8] Romanenko, P. N., Kharchenko, V. N., "The effect of transverse mass flow on heat transfer and friction drag in a turbulent flow of compressible gas along an arbitrarily shaped surface", Int. J. Heat and Mass Transfer, v. 6, 1963, pp. 727-738.
- [9] Terekhov, V.I., Yarygina, N.I, Zhdanov, R.F, Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, Vol. 46, P. 4535-4551.
- [10]. Goorey, A.M., Watkins, S.B, Aung, V., Turbulent heat-transfer computations for rearward-facing steps and sudden pipe expansions, J. Heat Transfer – Trans. ASME, 1985, Vol. 107, No. 1, P. 70-76.
- [11]. Alemasov, V.E., Glebov, G.A., Kozlov, A.P., Thermal-Anemometric Methods of Detached Flow Investigation, Kazan Branch of USSR Acad. Sci., Kazan, 1989.
- [12] Abbot, D.E., Kline, S.J, Experimental investigation of subsonic turbulent flow over single and double backward-facing steps, Trans. ASME, J. Basic Engng., 1962, Vol. 84, Ser. D, P. 317-325.
- [13] Jayakumar, J.S., Mahajani, S.M., Mandal, J.C., Vijayan, P.K., Rohidas Bhoi, 2008. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. Chemical Engineering Journal, pp. 221-232.