



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شبیه‌سازی و بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت در مبدل حرارتی پوسته و لوله در مدار ترموهیدرولیکی تست

لوپ THTL

مهديه مودی*، احمدرضا ذوالفقاری، رقيه محمودی، امير امين التجاری

دانشگاه شهید بهشتی تهران، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه چرخه سوخت هسته‌ای

چکیده:

در این مطالعه، جریان سیال داخل پوسته مبدل حرارتی پوسته و لوله به صورت عددی برای جریان آرام و آشفته در حالت پایدار و گذرا شبیه‌سازی می‌شود. معادلات حاکم بر جریان سیال با استفاده از روش حجم محدود و تقریب تفاضل مرکزی در محیط نرم‌افزار ANSYS CFX حل و نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای جریان آشفته و پایدار با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در تست لوپ THTL مقایسه می‌شوند. نتایج عددی بدست آمده از تحقیق تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند. همچنین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه دینوس- بولتر و نیز میدان سرعت بدست آمده از شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و اثر آشفتگی جریان بر میزان ضریب انتقال حرارت بررسی می‌گردد.

کلید واژه:

مبدل حرارتی پوسته و لوله، جریان آرام و آشفته، ضریب انتقال حرارت جابجایی، مدل آشفتگی $k - \epsilon$

۱ مقدمه

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به‌طور وسیعی در صنایع و سیستم‌های تبدیل انرژی بکار می‌روند. بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی متعددی در خصوص انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله انجام شده است. مهمترین روش تحقیقاتی جهت بررسی کارایی مبدل‌های حرارتی شبیه‌سازی عددی است. Sha و همکارانش، مدل ترموهیدرولیکی چند بعدی را بدست آوردند که پوسته با استفاده از روش‌های نفوذناپذیری سطح، تخلخل حجمی و مقاومت توزیعی مدل شد. در تمام این روش‌های ساده شده، نتایج افت فشار و نرخ انتقال حرارت با داده‌های آزمایشگاهی هماهنگی خوبی نشان دادند [۱]. Ozden و Tari یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با بفل‌های قطاعی را با استفاده از ANSYS Fluent مدل کردند. نتایج شبیه‌سازی را با نتایج روش‌های Kern و Bell-Delaware مقایسه و مشاهده نمودند که روش Kern همیشه مقادیری کمتر از ضریب انتقال حرارت پیش‌بینی شده می‌دهد و نتایج شبیه‌سازی CFD با نتایج Bell-Delaware کاملاً هماهنگ می‌باشند [۲]. در این تحقیق به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی مبدل حرارتی پوسته و لوله با بفل قطاعی یک‌تکه در تست لوپ THTL پرداخته می‌شود. با حل معادلات ناویراستوکس در محیط نرم‌افزار ANSYS و در نتیجه محاسبه میداین سرعت و دما، ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط با استفاده از رابطه‌ی دیتوس-



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بولتر بدست می آید. مقایسه‌ای نیز بین دمای بدست آمده از شبیه‌سازی و درجه‌حرارت اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف مبدل حرارتی برای جریان آشفته و پایدار در تست لوپ THTL انجام می‌شود.

۲ مدل‌سازی

در این مطالعه معادلات حاکم به روش حجم محدود و با استفاده از تقریب تفاضل مرکزی برای جریان سیال داخل پوسته و بین دو بفل متوالی حل می‌شوند. برای حل معادلات در حالت ناپایدار از روش ضمنی استفاده می‌شود. معیار همگرایی برای سرعت و دما برابر 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود. سیال عامل در پوسته آب می‌باشد.

۱-۲ معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر در حالت ناپایدار به صورت زیر نوشته می‌شوند:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنوم در راستای x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

معادله بقای مومنوم در راستای y:

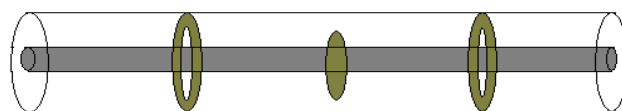
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} \quad (3)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(c_p \rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(c_p \rho v T)}{\partial y} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

۲-۲ هندسه

به دلیل حضور دسته لوله‌ها و بفل‌های قطاعی یک تکه در ناحیه پوسته مبدل حرارتی پوسته و لوله تغییرات سرعت جریان سه بعدی می‌باشد. لذا به منظور ساده‌سازی هندسه و امکان شبیه‌سازی دوبعدی جریان سیال داخل پوسته، دسته لوله را با یک لوله معادل و بفل‌ها را به صورت بفل‌های حلقه‌ای مطابق شکل ۱ مدل می‌نماییم [۳].



شکل ۱: مبدل حرارتی با بفل‌های حلقه‌ای



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۲-۳ شرایط مرزی و شرط اولیه

دمای آب ورودی به پوسته برابر 342 K و به دسته لوله 353 K و دمای آب خروجی از دسته لوله در آزمایشگاه برابر 333 K می باشد، لذا با تقریب خطی دمای دسته لوله را برابر 345 K در ناحیه بین دو بفل اول و دوم در نظر می گیریم. پروفیل سرعت در ورودی یکنواختی برای جریان آرام برابر 1 cm/s، برای جریان آشفتهدار برابر 6.6 cm/s می باشد. در تمام سطوح دیواره ها شرط عدم لغزش در نظر گرفته می شود. با فرض اینکه دیواره خارجی پوسته آدیاباتیک است، فلاکس حرارتی از دیواره برابر صفر می باشد. به منظور تعیین افت فشار بین ورودی و خروجی، فشار نسبی صفر در خروجی فرض می شود. برای جریان ناپایدار، در ورودی سرعت توربولانس در مدت یک ثانیه از صفر تا 6.6 cm/s و در جریان آرام در مدت 0.5 s از صفر تا 1 cm/s تغییر می کند. دمای اولیه برابر دمای ورودی فرض می شود.

۲-۴ مدل آشفتگی

ساده ترین مدل های کامل آشفتگی مدل های دو معادله ای هستند. به عنوان مثال در مدل $k - \varepsilon$ میدان آشفتنه بر حسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفتنه و نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفتهدار می شود [۴]. مدل $k - \varepsilon$ استاندارد شامل معادلات زیر می باشد:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k\right) + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

معادلات شامل پنج ثابت قابل تنظیم $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_k ، σ_ε و C_μ هستند.

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3; C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92$$

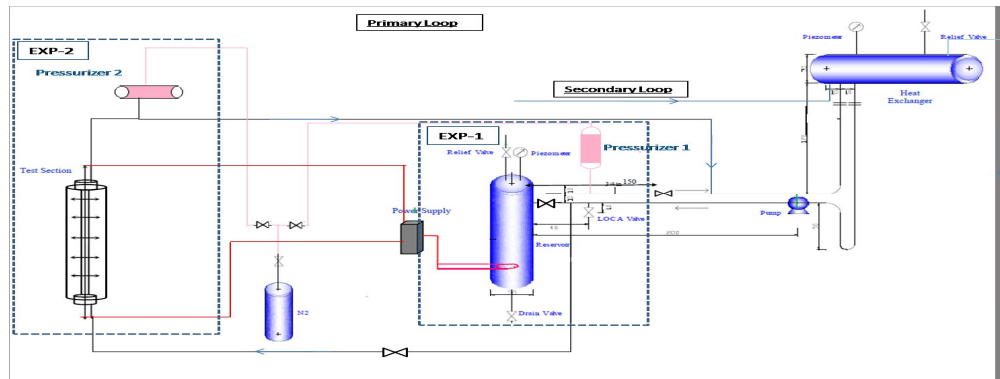
۳ بررسی تجربی مبدل حرارتی پوسته و لوله در تست لوپ THTL

به منظور بررسی جریان داخل مبدل حرارتی پوسته و لوله به صورت تجربی، یک مدار ترموهیدرولیکی مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته می شود. مدار ترموهیدرولیکی طراحی شده که مشابه سیکل ترموهیدرولیکی نیروگاه اتمی بوشهر می باشد، جهت بررسی آنالیز حوادث هسته ای ایجاد شده در نیروگاه بطور عام و بررسی توربولانسی جریان و آنالیز الگوی جریان دوفازی بطور خاص مورد استفاده قرار می گیرد. این مدار از دو بخش مدار اولیه و مدار ثانویه تشکیل شده است. بخش Secondary Loop شامل سیال ورودی به پوسته ای مبدل حرارتی است که همان سیال خنک کننده ی آب ورودی به تیوب ها می باشد.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲: شماتیک مدار ترموهیدرولیکی تست لوپ THTL

۳-۱ اجزای مدار ترموهیدرولیکی

مدار اولیه شامل دو واحد EXP-1 و EXP-2 می باشد که هر کدام بطور مجزا عمل می کنند. EXP-1 شامل یک مخزن با حجم حدودا 102lit می باشد که دو هیتر حرارتی تعبیه شده در انتهای مخزن آب را که سیال کاری سیستم می باشد، تا دمای 80°C گرم می کند. آب پس از گرم شدن در مخزن وارد تیوب های مبدل حرارتی شده و تبادل حرارتی را با بخش Secondary Loop انجام می دهد. آب خنک با دمای 60°C از طریق پمپ دوباره به مخزن پمپ می گردد. EXP-2 شامل یک محفظه ی مربعی به نام Test Section است که مشابه یک Fuel Assembly در نیروگاه اتمی می باشد. این محفظه دارای هفت المان حرارتی میله ای است که جهت آنالیز جریان دوفازی مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۲ شرح آزمایش

هدف ما در این آزمایش بررسی عملکرد مبدل حرارتی پوسته و لوله در مدار ثانویه است. ابتدا مدار اولیه را با فشار 4bar روشن می کنیم، تا دبی سیال ورودی به دسته لوله به 2kg/s و دمای آن به 80°C برسد. مدار دوم شامل یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، دو رادیاتور و یک فن جهت خنک نمودن آب خروجی از مبدل و یک پمپ با دبی 0.36kg/s می باشد. در مدار ثانویه آب خروجی از قلب راکتور با دمای 80°C درجه سانتیگراد وارد دسته لوله می گردد. از آن سو آب خنک کننده داخل پوسته پس از عبور از دو رادیاتور به دمای 68°C درجه سانتیگراد رسیده و با دمای 74°C درجه از پوسته خارج می شود. پنج عدد ترموکوپل در نقاط مختلف تست لوپ به ترتیب در خروجی EXP-1، ورودی دسته لوله، ورودی پوسته مبدل، وسط مبدل حرارتی و در فاصله ۳ سانتیمتری از دیواره بالایی پوسته و نیز



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

یکی در خروجی پوسته مبدل قرار می‌دهیم. دمای نقاط اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: درجه حرارت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بر حسب درجه سانتیگراد

۷۹	دمای خروجی از EXP-1
۷۸	دمای ورودی به دسته لوله مبدل حرارتی
۶۸	دمای سیال ورودی به پوسته
۷۳	دمای نقطه‌ای در فاصله ۳ سانتیمتر از دیواره بالایی مبدل حرارتی (نزدیک دومین بفل)
۷۴/۷	دمای سیال خروجی از پوسته

۴ نتایج

در مطالعه حاضر، برای یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، جریان سیال داخل پوسته برای جریان‌های آرام ($Re=515$) و آشفته ($Re=3400$) در دو حالت دائمی و گذرا شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از میدان سرعت بدست آمده مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی به کمک رابطه دیتوس-بولتر و انتگرال‌گیری به روش سیمسون بدست می‌آید. همچنین مقادیر دمای حاصل از شبیه‌سازی جریان آشفته و دائمی با نتایج تجربی تست لوپ THTL مقایسه می‌گردد.

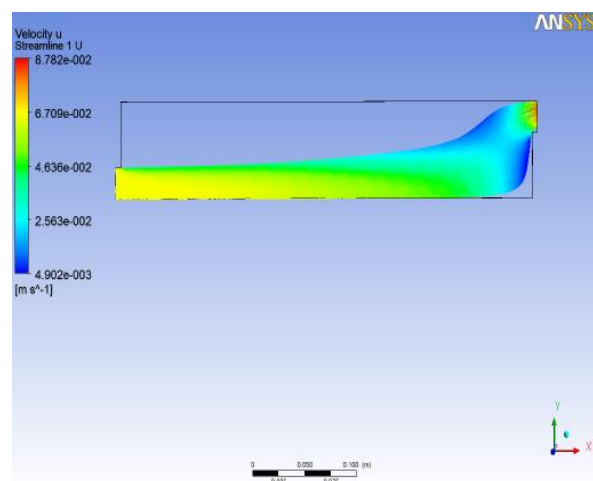
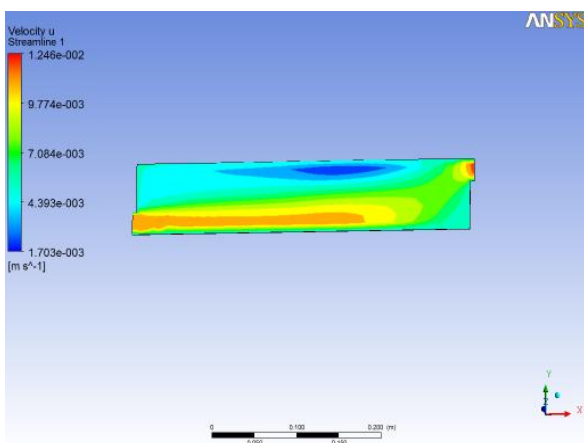
تصاویر ۳ و ۴ توزیع سرعت را برای جریان آرام و آشفته در حالت پایدار در نواحی ورودی، میانی و خروجی نشان می‌دهند. جریان داخلی با دیواره لوله معادل برخورد نموده و انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم صورت می‌گیرد. سرعت سیال بعد از ناحیه ورودی به دلیل تغییر سایز کوچک ورودی به سایز بزرگ قطر پوسته کاهش می‌یابد. در ناحیه میانی تغییرات سرعت ضعیف و توزیع سرعت یکنواخت می‌شود. در خروجی نیز به دلیل کاهش قطر خروجی سرعت افزایش می‌یابد. در هر مقطع از دامین سرعت در نزدیکی دیواره‌ها بسیار کم و به سمت مرکز افزایش می‌یابد. هیچ ناحیه گردابه‌ای در دامین مورد بررسی مشاهده نمی‌شود. شکل ۵ میدان دما را برای جریان آشفته در حالت پایدار در نواحی ورودی، میانی و خروجی نشان می‌دهند. در آزمایشگاه سیال خنک‌کننده با دمای 341 K وارد پوسته و با دمای 348 K از پوسته خارج می‌شود. با حرکت سیال خنک‌کننده داخل پوسته، حرارت از سیال گرم به سیال سرد منتقل می‌شود و دمای سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد. تغییرات دما در جریان آشفته بیشتر از جریان آرام می‌باشد. نزدیک بفل‌ها، به دلیل افزایش سرعت و بنابراین افزایش ضریب انتقال حرارت، دما ماکزیمم مقدار را دارد. بیشترین نوسانات دما نیز در ناحیه ورودی و خروجی و نزدیک بفل‌ها مشاهده می‌شود. در ناحیه میانی پروفیل دما در راستای x تقریباً یکسان می‌باشد و نزدیک دیواره پایینی (دیواره لوله معادل) بیشترین مقدار و رفته رفته به سمت دیواره



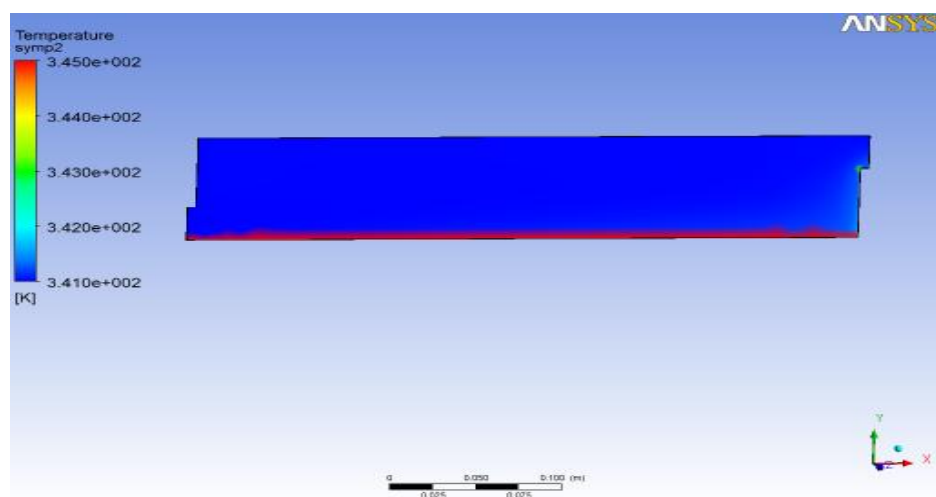
بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

خارجی پوسته دما کاهش می یابد. برای اندازه گیری دمای سیال خنک کننده داخل پوسته مبدل حرارتی در آزمایشگاه پنج ترموکوپل در نقاط مختلف نصب می شود. مطابق شکل ۵ متوسط دمای سیال در مرکز مبدل در فاصله ۳ سانتیمتری از دیواره و نزدیک بفل برابر ۳۴۴ درجه کلوین (معادل ۷۱ درجه سانتیگراد) می باشد. در آزمایشگاه دمای این نقطه برابر ۷۳ درجه سانتیگراد اندازه گیری شده است.



شکل ۳: توزیع سرعت در جهت X در جریان آشفته و پایدار
شکل ۴: توزیع سرعت در جهت X در جریان آرام و پایدار



شکل ۵: توزیع دما بر حسب درجه کلوین با استفاده از انسیس در جریان آشفته و پایدار



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

با محاسبه میدان سرعت داخل دامین، می توان مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی را با استفاده از رابطه دیتوس- بولتر و انتگرال گیری به روش سیمسون محاسبه نمود. تغییرات دما به شدت به تغییرات ضریب انتقال حرارت وابسته است. به طوری که هرچه ضریب انتقال حرارت بزرگتر باشد تغییرات درجه حرارت بیشتر می باشد.

با مقایسه ضریب انتقال حرارت برای دو جریان آرام و آشفته نیز مشاهده می شود که آشفتگی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و نیز نرخ انتقال حرارت می گردد.

$$Nu = 0.023(Pr)^{0.4} (Re)^{0.8} (\lambda)$$

$$\bar{h}_{laminar} = \frac{1}{A} \iint h dx dy = 1.1614 W/cm^2.K \quad \bar{h}_{turbulence} = \frac{1}{A} \iint h dx dy = 17.53 W/cm^2.K$$

۵ نتیجه گیری

جریان سیال درون پوسته مبدل حرارتی پوسته و لوله برای حل میدان های جریان و دما مدل می شود. به منظور امکان شبیه سازی دو بعدی جریان داخل پوسته، بفل ها با بفل های حلقه ای جایگزین شده و مدل سازی برای ناحیه بین دو بفل حلقه ای و نیمه بالایی آن (به دلیل تقارن هندسی) انجام می شود. از نتایج شبیه سازی CFD برای جریان های آرام و آشفته در حالت دائمی و گذرا، ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل دامین محاسبه می شود. در آزمایشگاه دمای سیال داخل پوسته برای نقاط مختلف اندازه گیری می شود. نتایج بدست آمده از شبیه سازی تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می دهد. با مقایسه ضریب انتقال حرارت برای دو جریان آرام و آشفته، آشفتگی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و بنابراین افزایش نرخ انتقال حرارت می گردد. پس با افزایش میزان آشفتگی ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می یابد. البته بایستی خاطر نشان کرد که نرخ انتقال حرارت در جریان آشفته متأثر از تعداد بفل (فاصله ی بفل ها) و اندازه ی برش بفل می باشد. چرا که اگر مقدار این دو پارامتر مناسب نباشند، موجب ایجاد گردابه هایی در پشت بفل می گردد و این گردابه ها به ویژه در توربولانسی های پایین باعث کاهش نرخ انتقال حرارت می شوند. به طور خلاصه، مدل عددی حاضر یک ابزار مفید برای پیش بینی عملکرد هیدرولیکی مبدل حرارتی پوسته و لوله با هزینه نسبتاً کم می باشد. علاوه بر این، جزئیاتی مبنی بر میادین سرعت و دما فراهم می کند که کمک بزرگی برای آنالیز مکانیزم اساسی تقویت حرارتی به حساب می آید.

مراجع:

[1]Sha WT, Yang CI, Kao TT, Cho SM. Multidimensional numerical modeling of heat exchangers. J Heat Transfer; 25:104:417;1982.



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [2] Ender Ozden, Ilker Tari. Sell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. Energy Conversion and Management; 51: 1004-1014;2010.
- [3] Ramesh K. Shah, Dusan P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Rochester Institute of Technology.
- [4] Mohammad Jadidi. Turbulence modeling. Isfahan university of technology.
- [5] ANSYS CFX Tutorials. ANSYS, Inc.
- [6] ANSYS CFX-Mesh Tutorials. ANSYS, Inc.