



شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مبدل ژانگستروم نیروگاه بخار بمنظور برآورد نشتی با استفاده از رویکرد محیط متخلخل

مهدی حجاری^۱، غلامرضا صالحی^{۲*} و مجید اسحق نیموری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه فناوری های انرژی نو، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل، آمل، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

چکیده

مبدل‌های پیش‌گرمکن دوار ژانگستروم یکی از مهمترین تجهیزات بازیابی انرژی در نیروگاه‌ها می‌باشند. در تحقیق حاضر به کمک رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی در محیط متخلخل و در مختصات مرجع متحرک حل و میزان نشتی این مبدل‌ها ارزیابی شده است. اعتبارسنجی روش عددی ارائه شده توسط انطباق نتایج حل عددی با داده‌های واقعی نیروگاه تایید شده است. در این تحقیق تأثیر شرایط عملیاتی مختلفی همچون سرعت چرخش ماتریس، جنس صفحات ماتریس و پیشگرم کردن ورودی مبدل روی بازده مبدل ژانگستروم مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین مقدار نشتی محوری و شعاعی مبدل تخمین زده شده و تأثیر استفاده از انواع آب‌بندها روی میزان آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که افزایش سرعت چرخشی ماتریس تا یک حد معین، استفاده از ماده‌ای با کمترین نفوذ حرارتی و پیشگرم کردن هوا ورودی به مبدل با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی منجر به ارتقا عملکرد ژانگستروم می‌شود. نتایج حاصل از برآورد نشتی نشان می‌دهد که نشتی غالب در مبدل ژانگستروم نشتی شعاعی است و با استفاده از نشت‌بندهای دوگانه و سه‌گانه میزان آن را می‌توان بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

کلمات کلیدی: پیش‌گرمکن دوار هوا؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ عملکرد حرارتی؛ تخمین نرخ نشتی.

Computational Fluid Dynamics Simulation of Ljungstrom Rotary Preheater in Steam Power Plant for Leakage Assessment Using Porous Media Approach

M. Hajjari¹, Gh. Salehi^{2*}, M. Eshagh Nimvari³

¹ MSc Energy System. Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

² Assistant. Professor, Mechical Engineering Depatment, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

³ Associate Professor, Faculty of Engineering, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran.

Abstract

Ljungstrom rotary air preheaters are applied at power plants to use the waste energy. In this study, by applying the CFD model, mass, momentum and energy equations in a porous media are solved using moving reference frame (MRF) and the leakage rate content is evaluated. The validation of numerical simulation proved by comparison of the numerical results and experimental data. In this study, the effects of different operational conditions such as matrix rotation speed, plate's material, inlet fluid preheating on the exchanger performance have been investigated. Also the value of axial leakage and radial leakage are estimated and the effects of using different seal types on leakage rates are investigated. Numerical results show increasing the rotational speed up to certain limit, using materials with low thermal diffusivity and preheating the inlet fluid considering the economical issues, improve the heat exchanger performance. Leakage estimation results show the radial leakage is the main leakage in the Ljungstrom and using double-seal and triple-seal can reduce the leakage rates considerably.

Keywords: Rotary Air Preheater; Computational Fluid Dynamics; Thermal Performance; Estimation of Leakage Rates.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش بهای سوخت‌های فسیلی، بهینه‌سازی مصرف سوخت بسیار مهم است که یکی از مهمترین و تاثیرگذارین شیوه‌ها در کاهش مصرف سوخت استفاده از مبدل‌های حرارتی و بازیابی انرژی توسط آن‌ها است [۱]. مبدل‌های حرارتی تجهیزاتی هستند که در بخش عظیمی از صنعت دارای کاربردهای متعددی می‌باشند و در نیروگاه‌ها عمدتاً به عنوان وسیله بازیافت انرژی و در نتیجه افزایش راندمان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم که نخستین بار در سال ۱۹۲۰ توسط ژانگستروم معرفی گردید، یکی از مهمترین سیستم‌های بازیابی انرژی در نیروگاه است که توسط مجموعه‌ای از ماتریس‌های دوار انرژی را بین گازهای داغ خروجی از بویلر و هوای مورد نیاز احتراق تبادل می‌کند و منجر به پیشگرم شدن هوای احتراق ورودی به کوره و افزایش راندمان می‌شود [۳]. مبدل‌های دوار ژانگستروم، دارای مزایا و معایبی می‌باشند که مهمترین مزایای آن‌ها عبارتند از:

- صرفه جویی در مصرف سوخت
- افزایش ظرفیت بویلر
- بهبود احتراق و کنترل کوره
- کاهش آلاینده‌های زیست محیطی

از آنجاییکه هوای مورد نیاز احتراق، جهت افزایش راندمان نیروگاه باید پیش گرم شود، افزایش ۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوسی در دمای هوای ورودی به کوره می‌تواند تا ۲٪ افزایش راندمان بویلر را در پی داشته و دارای اثرات مطلوب محیط زیستی از جهت تولید دوده و خاکستر کمتر باشد و همچنین منجر به صرفه جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ای در سال گردد [۴].

از طرفی مهمترین معایب مبدل‌های ژانگستروم عبارتند از:

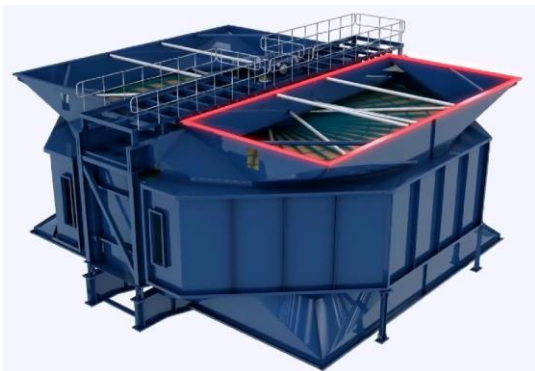
- حساسیت نسبت به خوردگی و زنگ‌زدگی
- رسیدن دمای دود به زیر نقطه شبنم و امکان تشکیل اسید
- تشکیل رسوب روی صفحات انتقال حرارت و کاهش کارایی مبدل
- وجود مقداری نشتی از سمت هوا به سمت دود

• تغییر شکل نشت بندها بدلیل تنش های حرارتی

و به تبع آن افزایش میزان نشتی

بروز هر کدام از موارد فوق در مبدل ژانگستروم، موجب افزایش مصرف سوخت، افت راندمان بویلر، افزایش اختلاف فشار دو طرف پیش گرمکن، محدود شدن هوای مورد نیاز بویلر، افزایش توان مصرفی فن‌ها و حتی گاهاً منجر به محدودیت تولید می‌شود [۵].

پیش گرمکن دوار هوای ژانگستروم، نوعی مبدل حرارتی است که یک روتور تعداد زیادی ماتریس متشکل از صفحات موج‌دار را (صفحات موج‌دار موجب آشفته‌گی بیشتر جریان و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند) می‌چرخاند که درون سبدهایی به نام بسکت قرار گرفته‌اند تا ماتریس‌ها به طور متناوب در مسیر جریان گرم و سرد قرار گیرند. معمولاً این ماتریس‌ها و بسکت‌ها با توجه به شرایط دمایی به صورت لایه سرد و لایه گرم با میزان تخلخل متفاوت روی هم قرار می‌گیرند. در این مبدل‌ها عمدتاً در یک سمت گاز داغ خروجی از بویلر از بالا به پائین و در سمت دیگر هوای مورد نیاز احتراق از پائین به بالا جریان می‌یابد تا هوا و دود از صفحات موج دار در خلاف جهت یکدیگر عبور کنند [۶]. شکل ۱ یک پیشگرمکن دوار هوا را نشان می‌دهد [۷].



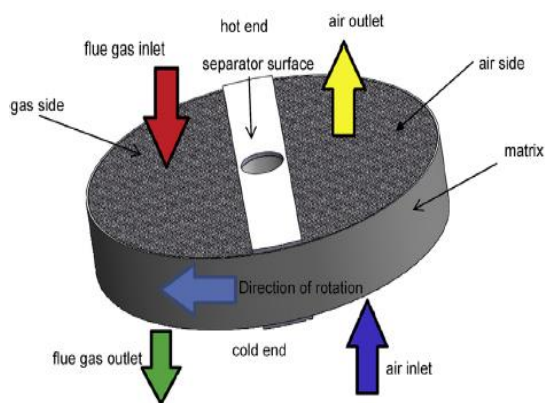
شکل ۱- مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم [۷]

با توجه به نقش مهم و اساسی مبدل‌های پیشگرمکن دوار ژانگستروم روی عملکرد نیروگاه‌ها، مطالعاتی فراوانی روی بازدهی آنها صورت گرفته است. جهت بررسی مدل‌های ریاضی مختلف مورد استفاده برای شبیه‌سازی مبدل‌های پیشگرمکن دوار، صدرعاملی [۸] به مطالعه و مرور روش‌های مورد استفاده در ۲۰۰ سال گذشته پرداخته و مهمترین و

قابل ذکر است که علی رغم مطالعات صورت گرفته در مورد این موضوع، همچنان زمینه‌هایی برای تحقیق درخصوص مکانیزم عملکرد این مبدل‌ها، پارامترهای تاثیرگذار روی عملکرد و توزیع دما و همچنین ارائه روش‌هایی برای تخمین میزان نشتی در این مبدل‌ها وجود دارد. در تحقیق حاضر با استفاده از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی، ضمن ارائه مدل سه‌بعدی از پیش گرمکن دوار ژانگستروم نیروگاه رامین اهواز، تاثیر شرایط عملیاتی مختلف از جمله سرعت چرخش ماتریس، جنس صفحات ماتریس و پیشگرم کردن هوا ورودی بر روی عملکرد مبدل ژانگستروم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی و روش ارائه شده در مراجع برای تخمین مقدار نشتی این مبدل‌ها، میزان نشتی مبدل ژانگستروم مورد مطالعه در شرایط عملکردی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- هندسه مسئله، معادلات حاکم و شبکه بندی

مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم دارای پیکربندی‌های مختلفی شامل دو قسمتی^۱ و سه‌قسمتی^۲ و چهارقسمتی^۳ است که در تحقیق حاضر مبدل دو قسمتی با سطح مقطع یکسان در طرفین و مشخصات مندرج در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. شکل ۲ نشان دهنده مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم است.



شکل ۲- مبدل پیشگرمکن و بخش‌های مختلف آن [۳]

اصلی‌ترین این روش‌ها را مورد بحث و بررسی قرار داده است. قدسی پور و صدرعاملی [۹] در سال ۲۰۰۳ روی مطالعه تجربی و آنالیز حساسیت پیشگرمکن دوار بمنظور بازیابی انرژی کار کردند و یک مدل ریاضی بهینه برای طراحی پیشگرمکن‌های دوار ارائه دادند. کایدان و حاجیدولو [۳]، عملکرد حرارتی مبدل پیشگرمکن دوار هوا را با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و در نظر گرفتن ماتریس دوار به عنوان محیط متخلخل بررسی کردند. آنها همچنین به مطالعه توزیع دمای مبدل، تحت شرایط مختلف عملیاتی پرداختند. بمنظور بهینه‌سازی عملکرد حرارتی فرهادی و همکاران [۴] روی شبیه‌سازی عددی مبدل پیشگرمکن دوار نیروگاه بیستون کرمانشاه در دو حالت بدون نشتی و در نظر گرفتن نشتی کار کرده‌اند و به بررسی پارامترهای مختلف عملیاتی بر روی کارایی مبدل ژانگستروم پرداخته‌اند. الحسینی و توران [۱۰] به معرفی و استفاده از رویکرد محیط متخلخل برای آنالیز و طراحی مبدل‌های پیشگرمکن دوار پرداختند. آنها نتایج استفاده از پارامترهای مختلف محیط متخلخل و پارامترهای مختلف طراحی را روی کارایی مبدل مورد بررسی قرار دادند. تاثیر نشتی روی عملکرد مبدل دوار ژانگستروم توسط شاه و اسپیکو [۱۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها مدلی برای نشتی و بازده حرارتی مبدل ارائه کردند و تاثیر نشتی را بر روی عملکرد مبدل مورد بررسی قرار دادند. تحقیق روی نشتی مستقیم مبدل پیشگرمکن هوا با نشت‌بند چندگانه توسط کای و همکاران [۱۲] صورت گرفته است. آن‌ها میزان نشتی را بصورت آزمایشگاهی و عددی با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف نشت‌بند مورد بررسی قرار دادند و مهمترین عوامل موثر بر میزان نشتی را شناسایی کردند. ماهراج و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۵ به مطالعه عددی نشتی مبدل پیشگرمکن هوا بمنظور تعیین میزان نشتی پرداختند. آن‌ها با فرض تشابه جریان عبوری از نشت‌بندها با جریان عبوری از اوریفیس و ارائه یک مدل دو بعدی CFD به محاسبه و تخمین میزان نشتی مبدل پیشگرمکن پرداختند. در سال ۲۰۱۶ بابا و همکاران [۱]، به تحلیل CFD مبدل پیشگرمکن بمنظور برآورد نشتی و تاثیر آن بر راندمان نیروگاه پرداخته و نتایج را در شرایط بارهای مختلف و ترانس مختلف نشت‌بندها ارائه کرده‌اند.

¹ Bi-Sectional
² Tri-Sectional
³ Quad-Sectional

جدول ۱- مشخصات فنی و ابعاد هندسی مبدل دوار ژانگستروم [۳]

قطر ماتریس	9864 mm
قطر شفت چرخان	744 mm
ارتفاع لایه سرد	650 mm
ارتفاع لایه گرم	1250 mm
تخلخل لایه سرد	۰/۷۶
تخلخل لایه گرم	۰/۸۴
سرعت دوران ماتریس	2 rpm
جنس ماتریس	steel

که در آن V سرعت، D_H قطر هیدرولیکی، ρ چگالی و v ویسکوزیته است. در پژوهش حاضر، عدد رینولدز 10^2 بوده که کمتر از عدد رینولدز بحرانی 10^3 است، لذا جریان سیال، آرام محسوب می‌شود. از معادلات ناویر-استوکس در محیط متخلخل برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت در پیش گرمکن هوا استفاده می‌شود که معادلات پیوستگی و بقای اندازه حرکت خطی در محیط متخلخل از روابط زیر بدست می‌آیند [۳]:

معادله پیوستگی:

$$\gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f v) = 0 \quad (3)$$

معادله ممنتوم:

$$\rho_f \left[\gamma^{-1} \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma^{-2} (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{K} v \quad (4)$$

همچنین معادله انرژی فاز جامد و سیال به ترتیب در معادلات ۵ و ۶ ارائه شده است:

$$(1 - \gamma)(\rho C)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma) \nabla \cdot (K_s \nabla T_s) + (1 - \gamma) \ddot{q}_s \quad (5)$$

$$\gamma(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f v \cdot \nabla T_s = \gamma \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) + \gamma \ddot{q}_f \quad (6)$$

در حالت کلی، معادلات انرژی برای فازهای جامد و سیال بایستی بصورت مجزا حل گردد (روش عدم تعادل حرارتی) اما چنانچه عدد اسپرو تعریف شده در رابطه ۷ از مقدار بحرانی آن یعنی 10^3 بیشتر باشد، روش تعادل حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاییکه در پژوهش مورد نظر عدد اسپرو 6061 است؛ لذا از روش تعادل حرارتی استفاده می‌شود.

$$Sp = \frac{2hL^2}{k_m D_h} \quad (7)$$

با ادغام معادلات در فاز جامد و سیال، معادله انرژی برای روش تعادل حرارتی از رابطه ۸ به دست می‌آید [۳]:

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K_m \nabla T_m) + \gamma \ddot{q}_m \quad (8)$$

راندمن پیشگرمکن دوار هوا از محاسبه نرخ انرژی تبادل شده به ماکزیمم انرژی قابل تبادل به صورت زیر بدست می‌آید:

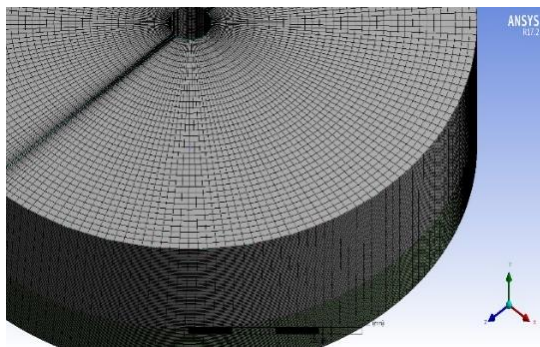
با توجه به ابعاد کوچک و فواصل میلیمتری بین صفحات فشرده نسبت به ابعاد بزرگ چندمتری در پیشگرمکن دوار ژانگستروم برای شبیه‌سازی محیط داخلی ماتریس از فرض محیط متخلخل استفاده شده است که استفاده از این روش منجر به کاهش هزینه محاسباتی ضمن حفظ صحت و دقت حل می‌گردد. تخلخل ماتریس به معنی دیواره‌های نازک ماتریس و مقاومت حرارتی کم دیواره‌هاست (افزایش هدایت حرارتی به و از دیواره‌ها و گازها و همچنین افزایش انتقال حرارت، افزایش ذخیره گرما در ماتریس جهت گرمکردن یا سردکردن گازها) با توجه به ابعاد، حجم و وزن صفحات ماتریس تخلخل لایه گرم برابر با 0.84 و تخلخل لایه سرد برابر با 0.76 است [۳ و ۴]. معیار برای سنجش تخلخل، ضریب تخلخل است که به عنوان نسبت حجم سیال به حجم کل محیط تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{v_f}{v_f + v_s} \quad (1)$$

که در آن v_s و v_f به ترتیب حجم سیال و جامد می‌باشند. عدد رینولدز، به عنوان معیار آرام یا آشفته بودن جریان بکار می‌رود. عدد رینولدز جریان عبوری در محیط متخلخل از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$Re = \frac{V * D_H * \rho}{\mu} \quad (2)$$

از شرط مرزی فشار ورودی و خروجی با مشخص بودن دما ورودی در مسیر هوا و دود استفاده شده است؛ همچنین دیواره اطراف پیشگرمکن عایق در نظر گرفته شده است. از آنجایی که خواص ترمودینامیکی سیال سمت هوا و سمت دود به یکدیگر نزدیک می‌باشند، جهت کاهش هزینه محاسباتی از هوا با فرض گاز ایده آل به عنوان سیال عامل در هر دو مسیر هوا و دود استفاده شده است. جدول ۳ شرایط مرزی مورد استفاده در مسئله را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۳- شبکه‌بندی مناسب برای مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم

جدول ۲- مطالعه شبکه‌بندی‌های مختلف مورد استفاده در پژوهش

تعداد سلول	دمای خروجی هوا (K)	دمای خروجی دود (K)
879543	۵۴۲/۹	۴۰۰/۸
971038	۵۴۵/۰	۴۰۴/۲
1127315	۵۴۵/۷	۴۰۴/۴

جدول ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در مسئله [۳]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
فشار ورودی دود	-1.89 kPa	فشار ورودی هوا	2.97 kPa
فشار خروجی دود	-3.11 kPa	فشار خروجی هوا	1.65 kPa
دما دود ورودی	634.2 K	دما هوا ورودی	348.9 K

$$\varepsilon = \frac{\text{heat transferred}}{\text{max. possible heat transferred}} = \frac{\dot{m}_{air,in} * C_{p,air} * (T_{air,out} - T_{air,in})}{\dot{m}_{flue,in} * C_{p,flue} * (T_{flue,in} - T_{air,in})} \quad (9)$$

برای شبیه‌سازی مبدل ژانگستروم با توجه به چرخش ماتریس و ثابت بودن بدنه و جریان‌های ورودی از روش مختصات مرجع متحرک استفاده می‌شود که اثر چرخش ماتریس را اعمال می‌کند؛ لذا از این رو از معادلات پیوستگی، معادله بقای اندازه حرکت خطی، و معادله انرژی در مختصات مرجع متحرک، به شرح زیر استفاده شده است [۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{v}_r = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}) + \rho (\bar{\omega} \times (\bar{v} - \bar{v}_t)) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_r + \bar{F} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r H + p \bar{u}_r) = \nabla \cdot (k \nabla T + \nabla \cdot \bar{\tau} \cdot \bar{v}) + S_h \quad (12)$$

به منظور شبکه‌بندی و حل مسأله از نرم افزار انسیس مشینگ و از یک شبکه سازمان یافته استفاده شده است؛ همچنین برای بررسی استقلال حل از شبکه، از چندین اندازه مختلف در شبکه‌بندی استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. در صورت تطابق نتایج دو شبکه‌بندی، حل از شبکه مستقل شده و شبکه با تعداد کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۲ نشان دهنده مطالعه شبکه و تعداد بهینه شبکه است.

با توجه به نتایج جدول ۲ که مربوط به دمای خروجی هوا و دود از مبدل ژانگستروم است، شبکه‌ای با ۹۷۱۰۳۸ سلول محاسباتی برای حل مسئله مناسب است. در شکل ۳ شبکه‌بندی مناسب برای مبدل پیشگرمکن دوار ژانگستروم نشان داده شده است.

۳- شرایط مرزی و روش حل

با توجه به نقش مهم شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی در مدل مورد مطالعه به علت وجود فن‌های دمنده در مسیر هوا و دود و همچنین در تطابق با شرایط واقعی و داده‌های قابل اندازه‌گیری، در تحقیق حاضر

عملیاتی آن بسیار مهم است؛ لذا در ادامه به بررسی و ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف پرداخته شده است.

۵-۱- تاثیر سرعت چرخش ماتریس روی عملکرد مبدل ژانگستروم

سرعت چرخش ماتریس یکی از مهمترین و تأثیرگذارترین عوامل بر عملکرد و کارایی پیش گرمکن دوار ژانگستروم می‌باشد؛ بنابراین بررسی و مطالعه نقش آن بر توزیع دمای مبدل و عملکرد آن بسیار حائز اهمیت است. شکل ۴ تاثیر سرعت چرخش ماتریس بر توزیع دما (مقادیر بیشینه و کمینه دما در نواحی گرم و سرد) را از نمای جانبی مبدل نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت چرخش ماتریس، موجب افزایش میزان انتقال حرارت بین جریان هوای سرد و گاز داغ شده و ناحیه بزرگتری تحت تاثیر جریان گاز داغ قرار گرفته و در نتیجه دما هوای خروجی از مبدل افزایش می‌یابد.

جدول ۴- اعتبارسنجی روش عددی با داده‌های واقعی نیروگاه رامین اهواز [۳]

پارامتر	دما خروجی هوا (K)	دما خروجی دود (K)
نتایج حل عددی	548/8	406/7
داده واقعی نیروگاه	534/3	393/4
درصد خطا	3 %	4 %

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از روش حجم محدود توسط نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. همچنین از الگوریتم سیمپل به منظور کوپل معادلات سرعت و فشار و روش گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات مختلف استفاده شده است.

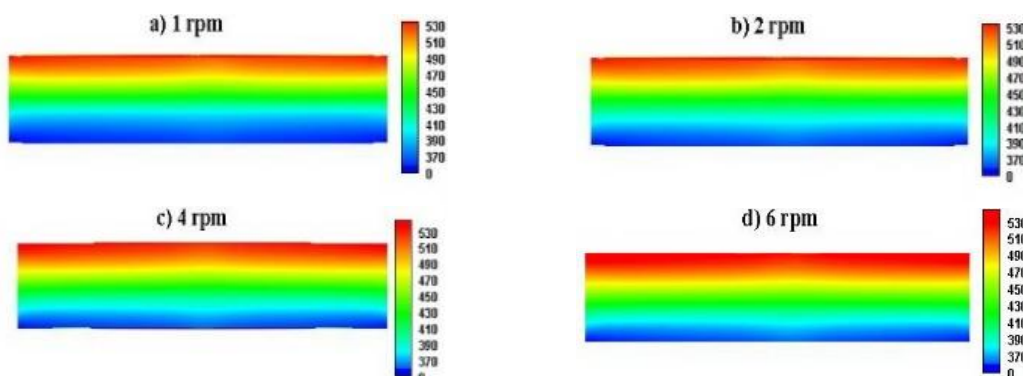
۴- اعتبار سنجی

پس از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تعیین شرایط مرزی و روش حل معادلات حاکم بایستی از صحت و اعتبار حل عددی انجام شده اطمینان حاصل کرد. در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی مبدل ژانگستروم از مشخصات فنی و شرایط عملکردی مبدل ژانگستروم نیروگاه رامین اهواز استفاده شده و به منظور اعتبارسنجی حل عددی، نتایج روش عددی با داده‌های واقعی این نیروگاه مقایسه شده است [۳].

با توجه به نتایج موجود در جدول ۴ انطباق قابل قبولی میان نتایج حل عددی و داده‌های واقعی نیروگاه رامین اهواز وجود دارد.

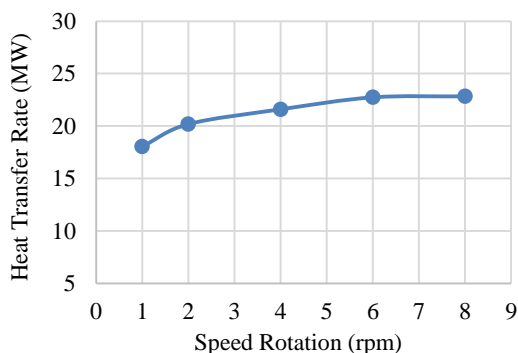
۵- نتایج و بحث

همانگونه که پیشتر اشاره شد، مبدل پیش گرمکن هوای ژانگستروم متشکل از یک ماتریس دوار چرخان با سرعت ثابت است که به طور متناوب جریان‌های هوا و گاز از آن عبور و با یکدیگر تبادل حرارت می‌کنند؛ بنابراین بررسی توزیع دما درون این مبدل، بررسی پارامترهای اثر گذار بر روی عملکرد آن و برآورد میزان نشتی مبدل در شرایط

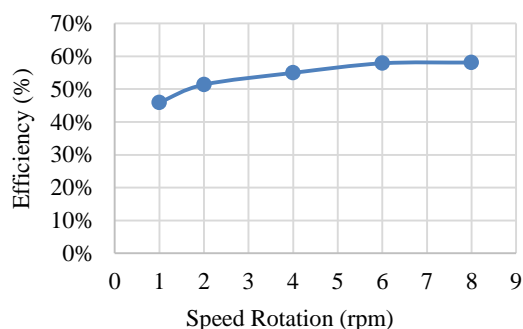


شکل ۴- تاثیر سرعت چرخش ماتریس بر روی توزیع دما در مبدل ژانگستروم (نمای جانبی)

می‌باشد. در مبدل ژانگستروم، قسمت دوار در حین عبور از سمت سیال گرم، دمای آن افزایش یافته و در حین عبور از سمت سیال سرد، گرما را به سیال پس می‌دهد. از اینرو ظرفیت گرمایی بالاتر صفحات ماتریس به ذخیره بیشتر انرژی در صفحات ماتریس و در نتیجه به انتقال گرمای بیشتر از سمت گرم به سمت سرد کمک می‌کند؛ اما هر چه ضریب



شکل ۵- تاثیر سرعت چرخش ماتریس بر روی میزان انتقال حرارت در مبدل ژانگستروم



شکل ۶- تاثیر سرعت چرخش ماتریس روی کارایی مبدل ژانگستروم

شکل‌های ۵ و ۶ تاثیر سرعت چرخش ماتریس بر میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل را نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت چرخش، میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل افزایش می‌یابد، اما در سرعت‌های بالا این تأثیر کمتر خواهد بود (شیب منحنی در حال کاهش است) و پس از یک مقدار مشخص (حدوداً ۶ rpm) افزایش سرعت تأثیر محسوسی بر میزان انتقال حرارت و کارایی نخواهد داشت و بالعکس منجر به مصرف انرژی بیشتر برای رسیدن به سرعت‌های چرخشی بالا می‌شود. از طرفی سرعت چرخشی بالا می‌تواند موجب آسیب به سیستم نشت‌بندی مبدل شود؛ لذا با توجه به اهمیت نشت‌بندی مبدل ژانگستروم، سرعت چرخشی نباید از حداکثر مقدار مجاز بیشتر شود.

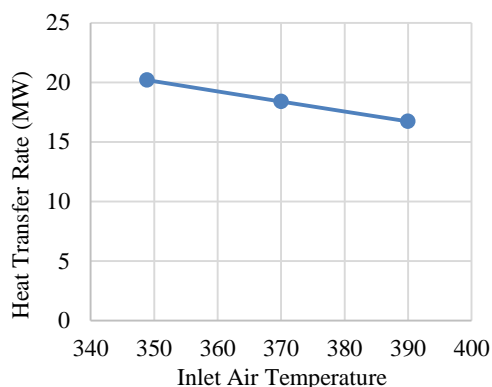
۵-۲- تاثیر جنس صفحات ماتریس بر روی عملکرد مبدل ژانگستروم

جنس صفحات ماتریس‌های موجود در مبدل ژانگستروم تأثیر بسزایی در نرخ جذب و میزان انتقال حرارت دارد؛ لذا برای بررسی اثر جنس صفحات ماتریس بر روی کارایی مبدل از سه ماده مختلف با خواص حرارتی و فیزیکی ارائه شده در جدول ۵ استفاده شده است.

شکل‌های ۷ و ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی پیش گرمکن ژانگستروم با انواع جنس صفحات ماتریس را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود بهترین عملکرد حرارتی شامل بیشترین میزان انتقال حرارت و بیشترین کارایی مربوط به استیل است که کمترین مقدار نفوذ حرارتی را دارد. درحالی‌که بدترین عملکرد حرارتی (کمترین میزان انتقال حرارت و کارایی) مربوط به مس (بیشترین نفوذ حرارتی)

جدول ۵- خواص حرارتی و فیزیکی مواد مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی

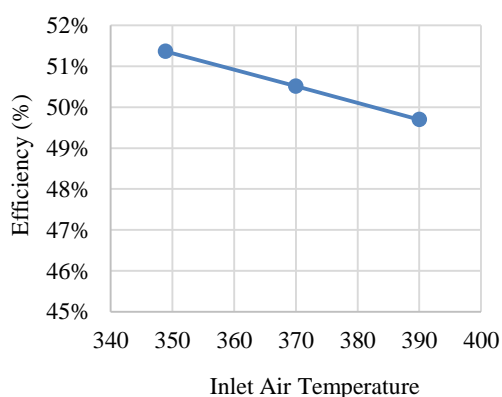
جنس	نفوذ حرارتی (m^2/s)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت حرارتی (J/KgK)	چگالی (Kg/m^3)
استیل	$4/3 \times 10^{-6}$	۱۶/۲۶	۵۰۲/۱	۸۰۲۷/۲
آلومینیوم	$3/13 \times 10^{-5}$	۲۲۰	۸۹۶	۲۷۰۷
مس	$1/13 \times 10^{-4}$	۳۸۶	۳۸۰	۸۹۵۴



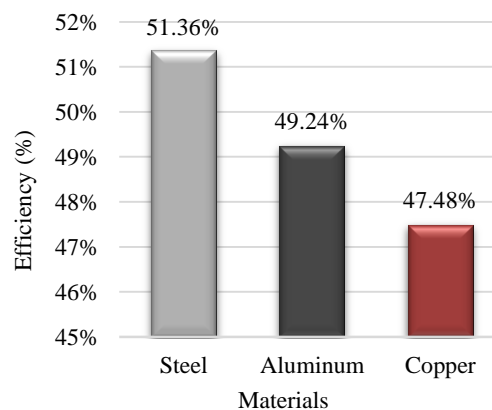
شکل ۹- تاثیر پیشگرم کردن هوا ورودی مبدل بر روی میزان انتقال حرارت در مبدل ژانگستروم



شکل ۷- تاثیر جنس صفحات ماتریس بر روی میزان انتقال حرارت در مبدل ژانگستروم



شکل ۱۰- تاثیر پیشگرم کردن هوا ورودی مبدل بر روی کارایی مبدل ژانگستروم



شکل ۸- تاثیر جنس صفحات ماتریس بر روی کارایی مبدل ژانگستروم

می‌شود که این امر منجر به افزایش دمای خروجی گاز و کاهش احتمال بروز نقطه شبنم می‌شود، ولی در مقابل میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل اندکی کاهش پیدا می‌کند، اما معمولاً بنابر دلایل فوق و همچنین بهبود فرایند احتراق و کاهش مصرف سوخت، هوای ورودی مبدل ژانگستروم پیشگرم می‌گردد. شکل های ۹ و ۱۰ تاثیر پیش گرم کردن هوا ورودی مبدل بر میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل را نشان می‌دهند. باتوجه به نتایج بدست آمده در شکل‌های ۹ و ۱۰ باید توجه داشت که اگرچه پیشگرم کردن هوا ورودی مبدل منجر به کاهش توان تولیدی نیروگاه می‌شود، ولی بدلیل ملاحظات فنی و اقتصادی (جلوگیری از پدیده نقطه شبنم و تشکیل اسید خورنده در انتها سرد مبدل) پیشگرم کردن هوای ورودی به مبدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هدایت حرارتی صفحات ماتریس بیشتر باشد، اثر هدایت حرارتی درون صفحات ماتریس افزایش یافته و سبب کاهش اختلاف دما در طرفین مبدل و یکنواختی توزیع دما درون مبدل می‌گردد که این امر کاهش کارایی مبدل را به دنبال دارد؛ لذا ماده با نفوذ حرارتی کمتر انتخاب مناسب‌تری برای صفحات ماتریس است. البته انتخاب ماده مناسب برای استفاده در ماتریس‌های مبدل ژانگستروم علاوه بر دو عامل فوق تابع عوامل فنی، عملیاتی، اقتصادی و ... نیز است.

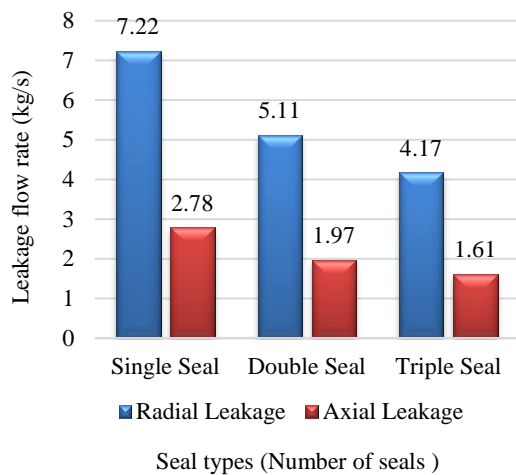
۵-۳- تاثیر پیشگرم کردن هوا ورودی مبدل بر روی عملکرد مبدل ژانگستروم

به منظور جلوگیری از پدیده نقطه شبنم و تشکیل اسید خورنده در انتها سرد مبدل، هوای ورودی به مبدل پیشگرم

نشت‌بند دوگانه^۵ و نشت‌بند سه‌گانه^۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

جداول ۶ تا ۸ نشان دهنده میزان نشتی شعاعی و محوری مبدل ژانگستروم در شرایط عملیاتی آن برای سایزهای مختلف نشت‌بند و انواع مختلف آن می‌باشد. نتایج موجود در جداول نشتی نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر سطح مقطع نشتی در دو حالت شعاعی و محوری، مقدار نشتی شعاعی از نشتی محوری بیشتر بوده و نشتی شعاعی نقش اصلی را در میزان نشتی مبدل‌های پیش‌گرمکن دوار بر عهده دارد؛ همچنین استفاده از نشت‌بندهای دوگانه و سه‌گانه می‌تواند منجر به کاهش مقدار نشتی در هر دو حالت شعاعی و محوری گردد و در نتیجه ارتقا کارایی مبدل را به دنبال داشته باشد.

شکل ۱۱ نشان دهنده تاثیر نوع نشت‌بند روی میزان نشتی مبدل است که همانگونه که از آن پیداست، در هر دو حالت نشتی شعاعی و محوری استفاده از نشت‌بندهای دوگانه و سه‌گانه نرخ نشتی را نسبت به نشت‌بند ساده به ترتیب ۲۹٪ و ۴۲٪ کاهش می‌دهد؛ لذا استفاده از نشت‌بندهای سه‌گانه به عنوان راه حلی برای کاهش میزان نشتی و ارتقا عملکرد مبدل در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۱- تاثیر نوع نشت‌بند بر روی میزان نشتی مبدل در حالت اندازه شیار ۱۵ میلیمتری

۵-۴- تخمین مقدار نشتی محوری و شعاعی مبدل و

تاثیر استفاده از انواع نشت‌بندها بر روی میزان آن

وجود نشتی هوا یکی از مهمترین عوامل منفی اثرگذار روی عملکرد مبدل ژانگستروم است که نشتی مستقیم در این مبدل‌ها به سه دسته شعاعی^۱، محوری^۲ و جانبی^۳ تقسیم می‌شود [۱۴].

جهت کاهش میزان نشتی در مبدل‌های ژانگستروم از نشت‌بندهای مختلفی شامل نشت‌بند شعاعی، محوری و جانبی استفاده می‌شود که این نشت‌بندها مقدار نشتی را در جهت‌ها و قسمت‌های مختلف مبدل ژانگستروم کاهش می‌دهند. در مبدل ژانگستروم هر سه نوع نشتی بصورت همزمان اتفاق می‌افتد، لذا استفاده از این سیستم‌های نشت‌بندی ضروری است [۱۵ و ۱۶]. میزان نشتی عبوری از سیستم نشت‌بند به عواملی همچون سرعت چرخش ماتریس، ابعاد نشت‌بند و اختلاف فشار جریان‌ها بستگی دارد. تغییر شکل ناشی از تنش حرارتی در نشت‌بندها، موجب ایجاد و گسترش مسیر نشتی می‌شود [۱۷].

استفاده از نشت‌بندهای چندگانه میزان نشتی مبدل ژانگستروم را کاهش داده و در نتیجه منجر به ارتقاء کارایی مبدل بطور قابل ملاحظه‌ای می‌شود [۱۷]. جریان نشتی عبوری از نشت‌بندها توسط معادلات پیوستگی- برنولی و در نظر گرفتن روابط ترمودینامیکی جریان عبوری از نشت‌بند قابل ارزیابی است؛ لذا بمنظور برآورد میزان نشتی در مبدل‌های پیش‌گرمکن دوار ژانگستروم، از معادله ۱۳ استفاده می‌شود [۱۲]:

$$\dot{m}_{leak} = k_{exp} C_d A_{gap} \sqrt{2(p_1 - p_2)\rho/z} \quad (13)$$

که در آن \dot{m}_{leak} نرخ نشتی مبدل، k_{exp} فاکتور انبساط، C_d ضریب اوریفیس، A_{gap} سطح مقطع نشتی، p_1 و p_2 فشار ورودی هوا و خروجی گاز، ρ دانسیته سیال و z تعداد نشت‌بند را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، مقدار نشتی شعاعی و محوری مبدل ژانگستروم در ۶ سایز مختلف نشت‌بند و در انواع مختلف نشت‌بند شامل نشت‌بند ساده^۴،

^۱ Radial

^۲ Axial

^۳ Circumferential

^۴ Single Seal

^۵ Double Seal

^۶ Triple Seal

جدول ۶- نرخ نشتی مبدل در حالت نشت‌بند ساده

Gap Width (mm)	Radial Leakage Area (m ²)	Radial Leakage Flow (kg/s)	Axial Leakage Area (m ²)	Axial Leakage Flow (kg/s)
۵	۰/۰۲۴۶	۲/۴۰۷	۰/۰۰۹۵	۰/۹۲۷
۱۰	۰/۰۴۹۳	۴/۸۱۵	۰/۰۱۹	۱/۸۵۵
۱۵	۰/۰۷۳۹	۷/۲۲۳	۰/۰۲۸۵	۲/۷۸۲
۲۰	۰/۰۹۸۶	۹/۶۳۰	۰/۰۳۸	۳/۷۱۰
۲۵	۰/۱۲۳۳	۱۲/۰۳۸	۰/۰۴۷۵	۴/۶۳۷
۳۰	۰/۱۴۷۹	۱۴/۴۴۶	۰/۰۵۷	۵/۵۶۵

جدول ۷- نرخ نشتی مبدل در حالت نشت‌بند دوگانه

Gap Width (mm)	Radial Leakage Area (m ²)	Radial Leakage Flow (kg/s)	Axial Leakage Area (m ²)	Axial Leakage Flow (kg/s)
۵	۰/۰۲۴۶	۱/۷۰۲	۰/۰۰۹۵	۰/۶۵۵
۱۰	۰/۰۴۹۳	۳/۴۰۴	۰/۰۱۹	۱/۳۱۱
۱۵	۰/۰۷۳۹	۵/۱۰۷	۰/۰۲۸۵	۱/۹۶۷
۲۰	۰/۰۹۸۶	۶/۸۰۹	۰/۰۳۸	۲/۶۲۳
۲۵	۰/۱۲۳۳	۸/۵۱۲	۰/۰۴۷۵	۳/۲۷۹
۳۰	۰/۱۴۷۹	۱۰/۲۱۴	۰/۰۵۷	۳/۹۳۵

جدول ۸- نرخ نشتی مبدل در حالت نشت‌بند سه گانه

Gap Width (mm)	Radial Leakage Area (m ²)	Radial Leakage Flow (kg/s)	Axial Leakage Area (m ²)	Axial Leakage Flow (kg/s)
۵	۰/۰۲۴۶	۱/۳۹۰	۰/۰۰۹۵	۰/۵۳۵
۱۰	۰/۰۴۹۳	۲/۷۸۰	۰/۰۱۹	۱/۰۷۱
۱۵	۰/۰۷۳۹	۴/۱۷۰	۰/۰۲۸۵	۱/۶۰۶
۲۰	۰/۰۹۸۶	۵/۵۶۰	۰/۰۳۸	۲/۱۴۲
۲۵	۰/۱۲۳۳	۶/۹۵۰	۰/۰۴۷۵	۲/۶۷۷
۳۰	۰/۱۴۷۹	۸/۳۴۰	۰/۰۵۷	۳/۲۱۳

		۶- نتیجه گیری
تولیدحرارت در واحد حجم (Wm^{-3})	\ddot{q}	در این پژوهش عملکرد حرارتی و کارایی پیش‌گرمن دوار هوا (ژانگستروم) نیروگاه رامین اهواز بر اساس داده‌های واقعی از جزئیات هندسی و شرایط عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه نتایج حل عددی با داده‌های واقعی نیروگاه، صحت و اعتبار مدل ارائه شده مورد تایید قرار گرفت. با بررسی پارامترهای مختلف اثرگذار بر روی عملکرد پیش‌گرمن دوار، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ماتریس تا یک حد مشخص (حدوداً ۶ rpm)، میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل افزایش می‌یابد و همچنین استفاده از ماده‌ای با نفوذ حرارتی کمتر (استیل) منجر به بهترین عملکرد حرارتی (انتقال حرارت و کارایی بالا) می‌شود. علاوه بر این نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که جهت جلوگیری از پدیده نقطه شبنم و تشکیل اسید خورنده در انتها سرد مبدل، پیش‌گرم کردن هوای ورودی به مبدل علیرغم کاهش جزئی کارایی و توان تولیدی نیروگاه به دلیل ملاحظات فنی و اقتصادی ضروری است. نهایتاً با توجه به مقادیر ناشی مبدل، مشخص شد که ناشی غالب در مبدل‌های پیش‌گرمن هوا ناشی شعاعی است و میزان ناشی محوری در مقایسه با آن مقدار کمتری است که استفاده از نشت‌بند‌های دوگانه و سه‌گانه میزان ناشی را در هر دو حالت شعاعی و محوری بطور قابل ملاحظه ای کاهش می‌دهد.
عدد رینولدز	Re	
چشمه حرارتی	S_h	
عدد اسپرو	Sp	
زمان (s)	t	
دما (K)	T	
سرعت قاب متحرک نسبت به مرجع	\bar{u}_r	
سرعت (u,v,w) (ms^{-1})	v	
سرعت مطلق	\bar{v}	
سرعت نسبی	\bar{v}_r	
مولفه جابجایی سرعت قاب متحرک	\bar{v}_t	
سرعت سیال (ms^{-1})	V	
نرخ ناشی مبدل (kg/s)	\dot{m}_{leak}	
فاکتور انبساط	k_{exp}	
ضریب اوریفیس	C_d	
سطح مقطع ناشی (m^2)	A_{gap}	
فشار ورودی هوا و خروجی گاز (pa)	p_1, p_2	
تعداد نشت بند	z	
	حروف یونانی	
سرعت زاویه ای	$\bar{\omega}$	
ضریب تخلخل	γ	
بازده	ε	
لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})	μ	
چگالی (kgm^{-2})	ρ	
تانسور تنش نسبی	$\bar{\tau}_r$	
	زیرنویس	
جامد	s	
سیال	f	
مخلوط	m	
ورودی	in	
خروجی	out	
		۷- فهرست علائم
		C_p گرمای ویژه فشار ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
		DH قطر هیدرولیکی
		E انرژی داخلی
		\bar{F} نیروهای حجمی خارجی
		h ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
		H آنتالپی کل
		k ضریب هدایت حرارتی سیال ($Wm^{-1}K^{-1}$)
		K نفوذپذیری (m^2)
		L ضخامت لایه متخلخل (m)
		\dot{m} دبی جرمی (kgs^{-1})
		P فشار (pa)

۸- مراجع

- [9] Ghodsipour N, Sadrameli M (2003) Experimental and sensitivity analysis of a rotary air preheater for the flue gas heat recovery. *Appl Therm Eng* 23(5): 571-580.
- [10] Alhusseny A, Turan A (2016) An effective engineering computational procedure to analyse and design rotary regenerators using a porous media approach. *Int J Heat Mass Tran* 95: 593-605.
- [11] Shah RK, Skiepko T (1999) Influence of leakage distribution on the thermal performance of a rotary regenerator. *Appl Therm Eng* 19(7): 685-706.
- [12] Cai M, Hui S, Wang X, Zhao S, He S (2013) A study on the direct leakage of rotary air preheater with multiple seals. Elsevier Ltd.
- [13] Maharaj A, Schmitz W, Naidoo R (2015) A numerical study of air preheater leakage. *Energy* 92(1): 87-99.
- [14] Wang X, Y Shi, Sun F, Gao M (2018) A numerical study of quad-section air preheater thermal performance and air leakage. *Proceedings of the ASME 2017 Power Conference Joint With ICOPE-17*.
- [15] Ramesh KSh, Dušan P S (2003) *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Monitoring MOF, Rotary INA, Exchanger H (1988) *Ill; Ilil*. 8(5): 469-473.
- [17] Chen Z, Li H, Gu Y, Zhu W (2019) A novel flexible seal technology and its application in heat transfer of rotary air preheater. *Appl Therm Eng* 163: 114414.
- [1] Baba KV, Mohan PP, Kumar TJ (2016) Cfd modelling and simulation of 500Mw bisector airpreheater and its performance. 1149-1156.
- [2] Thermal THE, et al. The resume of the doctoral thesis the thermal regime influence of a rotating-plate regenerative.
- [3] Heidari-kaydan A, Hajidavalloo E (2014) Three-dimensional simulation of rotary air preheater in steam power plant. *Appl Therm Eng* 73(1): 397-405.
- [4] Farhadi I, Veysi F, Mirzaasgari M (2018) Numerical simulation of rotary regenerative air preheater (Ljungstrom) in steam power plant with the aim of optimizing of thermal performance. *Modares Mechanical Engineering* 18(03): 291-301. (in Persian)
- [5] Ramesh KSh, Dušan PS (2003) *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Bae YL (1986) Performance of a rotating regenerative heat exchanger - A numerical simulation. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- [7] Wang C, Zhu Y (2018) Entropy analysis on boiler air pre-heater with multi-stage LHS unit. *Appl Therm Eng* 130: 1139-1146.
- [8] Sadrameli SM (2016) Mathematical models for the simulation of thermal regenerators: A state-of-the-art review. *Renew Sustain Energy Rev* 58: 462-476.