

بررسی عددی پیش گرمکن هوا جهت تعیین تشکیل شبنم در ورقهای موجدار برای تعیین سطوح با امکان خوردگی

حسن محمدی سیبینی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، ایران

حمیدرضا نظیف *دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، ایران

چکیده

در دیگهای بخار بمنظور افزایش راندمان نیروگاه، هوای مورد نیاز برای احتراق باید پیشگرم شود. در تحقیق حاضر پیشگرمکن هوای گردشی به منظور کاهش خوردگی ورق های موجدار آن مورد بررسی قرار گرفته است. به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی سه بعدی پیشگرمکن در مختصات مرجع متحرک انجام شد. با فرض عایق بودن دیواره ها و تأثیر تشعشع، حل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی انجام شد. نتایج مقاله با اطلاعات تجربی همخوانی خوبی دارند. سطوح مستعد پدیده خوردگی، شناسایی شدند. بیشترین خوردگی معمولاً در ناحیه خروج محصولات احتراق از ماتریس رخ می دهد. لذا حداقل دمای خروجی گاز از نقطه نظر تشکیل نقطه شبنم مشخص شد. نتایج عددی نشان دهنده تأثیر صفحه جداکننده، سرعت دورانی، دمای هوا و گاز ورودی بر عملکرد و توزیع دمای پیش گرمکن هستند. اثر سرعت چرخشی بر شروع چگالش سیال و نقطه شبنم نشان داد که تغییر سرعت دوران، فرآیند خوردگی را کاهش نمی دهد. افزایش سرعت دورانی روتور، در محدوده ۵/۰ تا ۶ دور بر دقیقه بازده را تا ۸۴٪ افزایش می دهد.

واژه های کلیدی: پیش گرمکن، ژانگستروم، نقطه شبنم، دینامیک سیالات محاسباتی.

Numerical Investigation of Air Preheater to Determine the Formation of Dew in Corrugated Sheets in Order to Determine the Surfaces with the Possibility of Corrosion

Hasan Mohammadi Sib Msc. student, Technical and Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University Qazvin, Iran

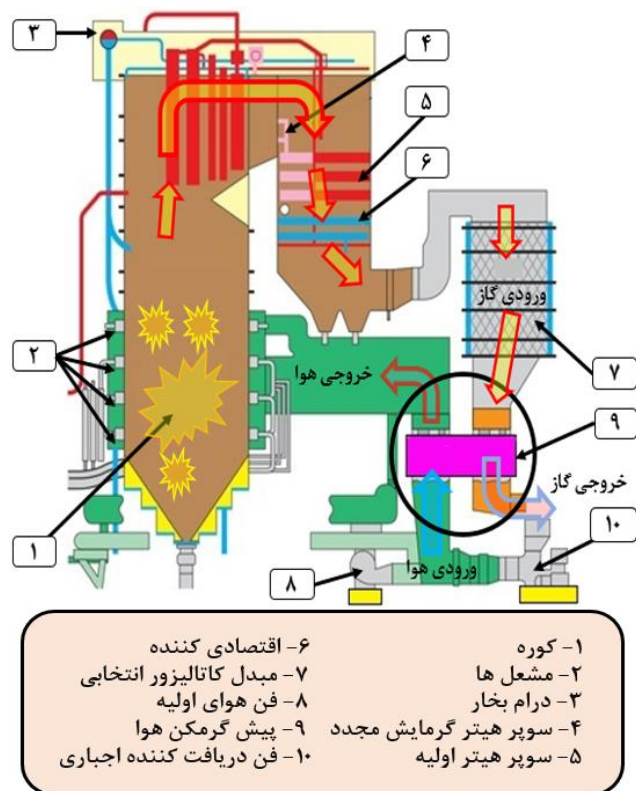
Hamid Reza Nazif *Associate Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University Qazvin, Iran

Abstract

In steam boilers, in order to increase the efficiency of the power plant, the air required for combustion must be preheated. In this research, circulating air preheater has been investigated in order to reduce the corrosion of its corrugated sheets. With the help of computational fluid dynamics, three-dimensional simulation of the preheater was performed in moving reference coordinates. Assuming the insulation of the walls and the effect of radiation, solving the equations of continuity, momentum and energy was done. The presented results are in good agreement with the experimental data. Corrosion of susceptible surfaces were identified. The most corrosion usually occurs in the exit area of combustion products from the matrix. Therefore, the minimum gas outlet temperature was determined from the point of view of dew point formation. The corrosion process cannot be prevented by changing the rotation speed. Increasing the rotational speed of the rotor in the range of 0.5 to 6 rpm increases the efficiency by 84%,

Keywords: Preheater, Ljungstrom, Dew Point, CFD (Computational Fluid Dynamics).

- صرفه جویی در مصرف سوخت.
 - کاهش آلاینده های زیست محیطی.
 - جلوگیری از تخریب تجهیزات دودکش خروجی کوره با کاهش دمای گاز خروجی
- از سویی دیگر معایب استفاده از پیش گرمکن هوا عبارتند از:
- حساسیت نسبت به خوردگی و زنگ زدگی.
 - وجود مقداری نشستی از سمت هوا به سمت دود.
 - رسیدن دمای دود به زیر نقطه شبنم و امکان تشکیل اسید.
 - تشکیل رسوب روی صفحات انتقال حرارت و کاهش کارایی مبدل.
 - تغییر شکل نشت بندها به دلیل تنش های حرارتی و به تبع آن افزایش میزان نشستی



شکل ۱- پیش گرمکن هوای دوار و موقعیت نصب آن در بویلر یک نیروگاه [۵ و ۶].

پیش گرمکن هوای ژانگستروم، مستعد خوردگی است. در مبدل حرارتی ژانگستروم، اگر دمای محصولات احتراق به زیر نقطه شبنم برسد، بازدهی به سرعت کم می شود، در این حالت در نتیجه ی تشکیل اسید و ترکیب آن با محصولات احتراق، خوردگی و زنگ زدگی

مبدل های حرارتی تجهیزاتی هستند که سبب انتقال حرارت بین دو سیال در دماهای مختلف می شوند. پیش گرمکن هوای ژانگستروم (Ljungstrom)، نوعی مبدل حرارتی متشکل از استوانه ی دواری به نام روتور بوده که توسط تعداد زیادی صفحات موج دار یا همان سطوح انتقال حرارت پر شده است. موج در صفحات، جریان سیال را آشفته و نرخ انتقال حرارت را افزایش می دهد. سطوح انتقال حرارت (که به عنوان ماتریس شناخته می شوند) به عناصر انتقال حرارت معروف بوده و درون محفظه یا سبدهایی به نام بسکت (Basket) قرار گرفته و محفظه ها نیز درون روتور (Rotor) جای می گیرند. بسکت ها با توجه به شرایط دمایی به صورت سه لایه سرد، میانی و داغ روی هم قرار می گیرند؛ دولایه بالایی بسکت ها را ناحیه گرم ولایه پایینی را ناحیه سرد می نامند. این استوانه دوار توسط دو صفحه جداکننده که در بالا و پایین روتور انتقال حرارت قرار گرفته به دو قسمت تقسیم شده به نحوی که در یک سمت محصولات احتراق از بالا به پایین و در سمت دیگر هوا از پایین به بالا جریان می یابد. بنابراین هوا و دود الزاماً از صفحات موج دار و در خلاف جهت یکدیگر می گذرند. برای عملکرد پایدار، ماتریس ها باید به طور متناوب در مسیر جریان گرم و سرد قرار گیرند. استوانه دوار با سرعت پایین حدود ۰/۵ تا ۴ دور بر دقیقه می چرخد، بدین ترتیب صفحات موج دار حرارت محصولات احتراق را جذب نموده و سپس در مسیر هوا، حرارت خود را به هوا داده و به این طریق هوای ورودی به بویلر (Boiler) را پیش گرم می نماید. نمایی از موقعیت نصب پیش گرمکن دوار هوا در شکل (۱) ملاحظه می شود. نصب پیش گرمکن هوا تا ۱۵٪ در هزینه سوخت نیروگاه ها صرفه جویی می کند [۱]، که اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط فردریک ژانگستروم، برای بازیابی انرژی ضروری در نیروگاه بخار بکار رفت. در دیگر های بخار، هوای مورد نیاز احتراق، جهت افزایش بازدهی نیروگاه باید پیش گرم شود. افزایش ۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس در دمای هوای ورودی به کوره می تواند تا ۲٪ افزایش راندمان بویلر و ۱۱/۵٪ صرفه جویی در مصرف سوخت را در پی داشته باشد [۳ و ۲]، همچنین بر اثر احتراق بهتر، دوده و خاکستر کمتری تولید خواهد شد که تأثیر بسزایی در حفظ محیط زیست خواهد داشت. در ژانگستروم اگر دمای گاز خروجی تا ۶ درجه سلسیوس تغییر کند می تواند صدها تا هزاران دلار در سال در قیمت سوخت مصرفی بویلر تأثیرگذار باشد، که این تأثیر می تواند منجر به بالا رفتن راندمان بویلر تا ۱۰٪ شود [۴].

مزایای استفاده از پیش گرمکن هوا عبارت است از:

- افزایش ظرفیت بویلر.
- بهبود احتراق و کنترل کوره.

نسبت به انتهای گرم بیشتر است. تخلخل در صفحات ناحیه گرم بیشتر از ناحیه سرد می باشد. به منظور بهبود انتقال حرارت در ناحیه گرم همانند شکل (۲-ب) از صفحات موج دار استفاده می شود. لویس پی بندورانت ایجاد رسوب روی صفحات انتقال حرارت با سه جنس مختلف کربن استیل، استیل با آلایژکم و استیل با پوشش لعابی در ژانگستروم را بررسی کرده است [۹].



الف: نمایی از پروفیل صفحه تخت شیاردار (NF)



ب: نمایی از پروفیل مدل موج دار دوبل (DU)

شکل ۲- نمایی از پروفیل های نواحی گرم و سرد پیش گرمکن هوا [۸].

نتایج نشان می دهد که در جنس استیل با پوششی از لعاب، میزان تشکیل رسوب و به تبع آن میزان خوردگی کمتر می باشد [۹]. وارن مطالعه در مورد ژانگستروم به عنوان نوع خاصی از مبدل هوا به هوا را انجام داد که نتیجه آن، تایید حداقل کاهش ۱۰ درصدی در مصرف سوخت نیروگاه های برق بود [۱۰]. درونیک و همکاران الگوی توزیع دمای گاز خروجی ژانگستروم با استفاده از روش اختلاف محدود و آزمایش های تجربی را تخمین زدند. که به توزیع محاسبه شده دما در امتداد داخلی کانال دودکش (گاز خروجی) دست یافتند [۱۱]. وانگ و همکاران بررسی توزیع دما در مبدل حرارتی ژانگستروم با استفاده از یک مدل نیمه تحلیلی را انجام دادند، آنها به این نتیجه رسیدند که تحلیل عددی و نتایج تجربی، وابستگی قابل توجهی به کاهش طول و کاهش دور پیش گرمکن هوای دوار دارد [۱۲]. صنایع و همکاران اهمیت بهینه سازی سرعت چرخش و دبی با کمک روابط تحلیلی و ساخت مدل تجربی را بررسی کردند که حداکثر اثربخشی، در حداکثر

حاصل شده و روی صفحات انتقال حرارت رسوب تشکیل می شود که تجمع آن روی بسکت های ژانگستروم، بر عملکرد حرارتی مبدل تأثیر منفی دارد. ترکیب محصولات احتراق نظیر اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن با بخار آب ایجاد شده، منجر به تشکیل اسید سولفوریک (Sulfuric Acid)، اسید سولفورس (Sulfuric Acid) و اسید نیتریک (Nitric Acid) می شود [۷]. در ناحیه سرد که دمای دود تا حد دمای نقطه شبنم اسید کاهش می یابد اسیدهای مذکور در اثر چگالش بر روی سطوح سرد نفوذ کرده و موجب خوردگی و ایجاد رسوب می گردند [۷]. لذا بمنظور جلوگیری از این پدیده صفحات ناحیه سرد به صورت دنداندار و تخت همانند شکل (۲-الف) می باشند که گرفتگی در مسیر جریان سیال ایجاد نشود. خوردگی دما پایین در سوخت نفتی، «خوردگی شبنم اسید سولفوریک» نام دارد که از گوگرد موجود در سوخت جامد ناشی می شود. در برابر این نوع خوردگی، از فولاد کم آلایژ مقاوم در برابر خوردگی (CRLS) یا فولاد کورتن (COR -TEN) در لایه انتهایی سرد پیش گرمکن هوا استفاده می شود، که این مهم بجهت رفع مشکل خوردگی است [۷]. از سوی دیگر، زمانی که گاز طبیعی مایع (LNG)، در نیروگاه های حرارتی، به عنوان سوخت استفاده می شود، به اصطلاح خوردگی شبنم آب رخ می دهد زیرا عنصر گوگرد در سوخت وجود ندارد. از جمله اقدامات انجام شده در برابر این نوع خوردگی استفاده از فولاد کم کربن ۷٪ کروم می باشد که سه برابر بیشتر از CRLS یا فولاد COR - TEN در برابر خوردگی مقاوم می باشد [۷].

بهبود عملکرد بازیاب با استفاده از ماده ای با ظرفیت حرارتی حجمی بالا امکان پذیر است؛ به منظور بهینه سازی، شکل صفحات مشبک بسکت ها در نواحی داغ و میانی با ناحیه سرد متفاوت می باشد. استفاده از دو ناحیه با آرایش غیرمشابه برای صفحات در بازیاب های دوار بنا به دلایل زیر متداول شده است:

جهت بهبود انتقال حرارت، صفحات ناحیه گرم دارای فشردگی بیشتر، هندسه پیچیده تر و عملکرد حرارتی بالاتری ست که برای ناحیه سرد مناسب نمی باشد؛ زیرا در ناحیه سرد امکان گرفتگی مسیر جریان سیال با ذرات و یا رسوبات احتمالی وجود دارد. (در ناحیه سرد از سطوح صاف تر، با فشردگی کمتری استفاده می شود تا ذرات در مسیر جریان، گرفتگی ایجاد نکنند). به دلیل تقطیر بخار آب در نواحی نزدیک به انتهای سرد، احتمال زنگ زدگی و ایجاد رسوب بیشتر است، بنابراین جهت استفاده از خاصیت خودتمیزکنندگی بازیاب، مسیر صاف و مستقیم مؤثرتر است. با توجه به اینکه در انتهای سرد، محصولات احتراق به اندازه کافی سرد شده است، امکان خوردگی توسط اسید سولفوریک وجود دارد، بنابراین ضخامت صفحات فلزی در انتهای سرد

پیشگرمکن هوای چرخشی یک نیروگاه ارائه شده است. برای شبیه‌سازی محیط داخلی ماتریس، فرض یک محیط متخلخل برای ابعاد کوچک و فواصل میلی‌متری بین صفحات فشرده و ابعاد بزرگ چند متری مطابق شکل ۳ در نواحی ورودی و خروجی پیش گرمکن دوار ژانگستروم استفاده می‌شود [۱۹]. اختلاف موجود فواصل در شبیه سازی صفحات، باعث افزایش بسیار زیاد شبکه بندی و محاسبات می شود، به نحوی که غیر قابل تحلیل می شود. در چنین شرایطی می توان از فرض محیط متخلخل در شبیه سازی ماتریس پیش گرمکن استفاده نمود [۲۰].

جدول ۱- خواص فولاد ضد زنگ [۲۱].

4.2×10^{-6}	نفوذ حرارتی $\alpha (m^2/s)$
16.26	ضریب هدایت حرارتی $k_s (W / (m.k))$
502.1	ظرفیت حرارتی $C_{p,s} (J/(kg.k))$
8027.2	چگالی $\rho_s (kg/m^3)$

جدول ۲- مشخصات فنی پیش گرمکن دوار هوا در نیروگاه [۲۱].

۹۸۶۴ میلی‌متر	قطر ماتریس	۲ دور بر دقیقه	سرعت چرخش
۶۵۰ میلی‌متر	ارتفاع لایه سرد	۱۲۵۰ میلی‌متر	ارتفاع لایه گرم
۶۳۴/۲ کلوین	دمای گاز ورودی	۳۴۸/۹ کلوین	دمای هوای ورودی
-۱/۸۹ کیلوپاسکال	فشار گاز ورودی	۲/۹۷ کیلوپاسکال	فشار هوای ورودی
-۳/۱۱ کیلوپاسکال	فشار گاز خروجی	۱/۶۵ کیلوپاسکال	فشار هوای خروجی
۰/۷۶	تخلخل لایه سرد	۰/۸۴	تخلخل لایه گرم

نرخ جریان جرمی داغ و حداقل نرخ جریان جرمی سرد ایجاد می شود، همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تأثیر سرعت چرخشی بر کارایی ژانگستروم در محدوده ۰/۵ تا ۴ دور بر دقیقه حاصل می شود [۱۳]. یوفان بو و همکاران تحلیل عددی رسوب آمونیوم بیسموت (ABS) و خوردگی بر روی پیش گرمکن هوای دوار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که توزیع نرخ جریان گاز دودکش ورودی بر دمای ماتریس تأثیر می گذارد و در کاهش انسداد و تمایل به خوردگی نقش دارد [۱۴]. پسندیده و همکاران مدل سازی مبدل و مطالعه اثرات سرعت و دبی سیال با استفاده از روش حجم محدود دو بعدی و شرایط مرزی دوره‌ای را بررسی کردند، نتایج نشان دهنده این بود که افزایش سرعت چرخشی یعنی افزایش اثربخشی. افزایش سرعت ورودی سیال یعنی کاهش عملکرد. افزایش طول روتور یعنی افزایش کارایی [۱۵]. هن چن و همکاران با بررسی ویژگی‌های رسوب خاکستر چسبناک و خوردگی پیش گرم کن هوای چرخشی به این نتیجه رسیدند که خوردگی جدی و رسوب خاکستر چسبناک به جای رسوب بی سولفات آمونیوم ناشی از چگالش اسید سولفوریک است [۱۶]. فراهادی و همکاران به منظور بهینه‌سازی عملکرد حرارتی یک نیروگاه، شبیه‌سازی عددی مبدل پیش گرمکن دوار را در دو شرایط با نشتی و بدون نشتی انجام دادند و پارامترهای مختلف عملیاتی را بر روی کارایی مبدل ژانگستروم بررسی کردند [۳].

حجاری و همکاران شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ژانگستروم را به منظور تخمین نشت با استفاده از رویکرد محیط متخلخل انجام دادند. نتایج نشان داد؛ نشت غالب، نشت شعاعی است که استفاده از آب بندی های دوگانه و سه گانه میزان نشتی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد [۱۷]. قدسی پور و صدآملی تأثیر دبی جرمی و سرعت دورانی ماتریس را بر عملکرد پیش گرم کن بررسی کردند و نشان دادند که تأثیر دبی جریان بیش از سرعت چرخشی است [۱۸].

در تحقیق حاضر، بررسی راندمان پیش گرمکن و توزیع دمایی آن با توجه به شرایط واقعی در شرایط مختلف شعاع ها و فواصل از لایه انتهایی سرد با هدف تعیین سطوح مستعد خوردگی در سه مرحله (الف) با شرایط دمایی واقعی، (ب) با اثر ۴۱ درجه سانتیگراد افزایش دمای هوای ورودی، (ج) با اثر ۳۶ درجه سانتیگراد افزایش دمای گاز ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- هندسه مسئله، شبکه محاسباتی و معادلات حاکم

در تحقیق حاضر؛ از خواص فولاد ضد زنگ استفاده شده است که در جدول ۱ قابل مشاهده است. در جدول ۲ مشخصات فنی

کل محیط ۴۹/۶۵ و حجم سیال ۳۷/۷۳ متر مکعب است. در این بخش از نسبت حجم سیال به حجم کل محیط، ضریب تخلخل بخش سرد محاسبه می شود. در بخش گرم حجم کل محیط ۹۵/۴۷ و حجم سیال ۸۰/۲ متر مکعب است که از نسبت حجم سیال به حجم کل محیط، ضریب تخلخل بخش گرم محاسبه می شود. بنابراین، ضریب تخلخل عبارت است از:

$$\gamma = \frac{v_f}{v_f + v_s} = \frac{v_f}{v_{total}} \quad (3)$$

با توجه به تعریف ضریب تخلخل در رابطه فوق، معادلات پیوستگی و بقای اندازه حرکت خطی در محیط متخلخل از رابطه زیر بدست می آیند [۲۲]:

ضمن اینکه این ضرایب، اثرات محیط متخلخل را در معادلات منعکس می کنند.

۲-۱- معادله پیوستگی:

$$\gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f v) = 0 \quad (4)$$

ترم اول معادله پیوستگی، یعنی ترم زمانی که در جریان پایا صفر است، ترم دوم یعنی ترم جابجایی که تضمین می کند جرم سیال در محیط متخلخل و در کل مبدل حفظ شود.

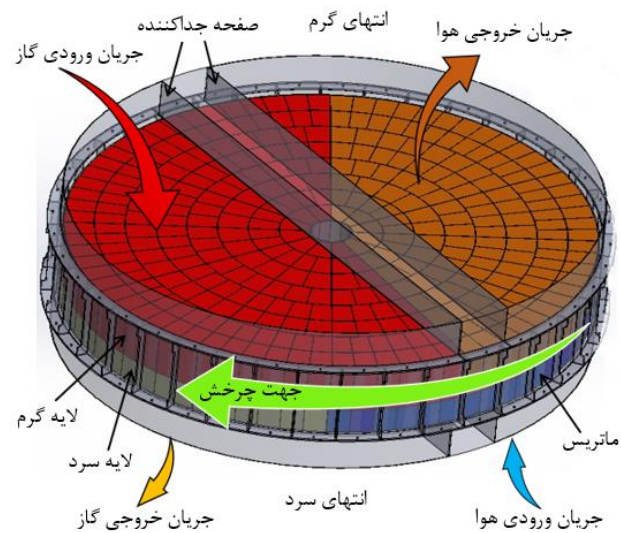
۲-۲- معادله بقای اندازه حرکت خطی:

$$\rho_f \left[\gamma^{-1} \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma^{-2} (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{k} v \quad (5)$$

در معادله فوق: ترم اول سمت چپ معرف شتاب محلی و ترم دوم معرف شتاب همرفتی می باشد. ترم اول سمت راست معادله معرف نیروی گرادیان فشار و ترم دوم معرف مقاومت دارسی محیط متخلخل است. ترم ویسکوز بدلیل ساختار ورق های موجدار و تخلخل بالا، نیروهای فروچیمر، کوریولیس بدلیل ناچیز بودن اثرات اینرسی، سرعت چرخش پایین و ترم بویانسی به جهت تأثیر محدود نیروی بویانسی با توجه به سرعت های بالای سیال عبوری و جریان اجباری در مبدل، تأثیر محدودی دارند که حذف شده اند.

۲-۳- معادله انرژی فاز جامد:

$$(1 - \gamma)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \gamma) q_s'' \quad (6)$$



شکل ۳- نمایی از پیش گرمکن هوای دوار.

به طور کلی، یک ماتریس با تخلخل بالا (تخلخل بالا به معنای دیواره های نازک ماتریس و مقاومت حرارتی کم دیوارها) به دلیل انتقال حرارت با رسانایی بالا به دیوارها و گازها مطلوب است. به عبارت دیگر ذخیره گرما در ماتریس جهت گرم کردن یا سرد کردن گازها در دماهای مورد نظر، افزایش می یابد [۲۲]. به منظور شبیه سازی جریان و انتقال حرارت در پیش گرمکن هوا، باید از معادلات ناویر-استوکس در محیط متخلخل استفاده شود. عدد رینولدز به عنوان معیاری که جریان آرام است یا متلاطم، برای جریان عبوری از محیط متخلخل از رابطه ۱ به دست می آید [۲۲]:

$$Re = \frac{V \alpha^2}{\nu} \quad (1)$$

در این رابطه α ضریب نفوذپذیری در محیط متخلخل است و از رابطه زیر به دست می آید [۲۲]:

$$\alpha = \frac{D_H^2}{150} \frac{\gamma^3}{(1 - \gamma)^2}, \quad D_H = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

در تحقیق حاضر عدد رینولدز ۱۲۰۷ است که کمتر از رینولدز بحرانی بوده و بنابراین جریان سیال به صورت آرام در نظر گرفته می شود. با توجه به داده های مقاله و محاسبات انجام شده، حاصل عدد رایلی بزرگتر از 10^9 و عدد ریچاردسون کمتر از ۱ می باشد. با توجه به این اعداد، نیروی بویانسی و اینرسی هر دو مهم هستند، اما نیروی بویانسی خیلی غالب نیست. در واقع می توان فرض کرد اثرات جابجایی اجباری در این مسئله غالب است.

معیار اندازه گیری تخلخل، ضریب تخلخل است که به عنوان نسبت حجم سیال به حجم کل محیط تعریف می شود. در بخش سرد حجم

۴-۲- معادله انرژی فاز سیال:

$$\begin{aligned} \gamma(\rho C)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f \nabla \cdot \nabla T_s \\ = \gamma \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) \\ + \gamma q_f'' \end{aligned} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن تعادل حرارتی بین فاز جامد و سیال در محیط متخلخل، معادله ۸ به دست می آید [۲۰]:

$$\begin{aligned} (\rho C)_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + (\rho C_p)_f \nabla \cdot \nabla T \\ = \gamma \nabla \cdot (k_m \nabla T_m) \\ + \gamma q_m'' \end{aligned} \quad (8)$$

معادله فوق معرف معادله انرژی در محیط متخلخل است که ترم اول سمت چپ معرف تغییر زمانی انرژی حرارتی، ترم دوم بیانگر انتقال حرارت همرفتی توسط سیال می باشد. ضمن اینکه در سمت راست، ترم اول معرف انتقال حرارت هدایتی و ترم دوم معرف منبع حرارتی می باشند.

راندمان پیش گرم کن هوای دوار از حاصلضرب راندمان حرارتی و راندمان جرمی به صورت زیر بدست می آید:

$$\eta = \frac{\dot{m}_a c_{p,a}}{\dot{m}_g c_{p,g}} \cdot \frac{T_{a,out} - T_{a,in}}{T_{g,in} - T_{a,in}} \quad (9)$$

نکته مهم در شبیه سازی پیش گرمکن دوار ژانگستروم، چرخش ماتریس و ثابت بودن بدنه و جریان های ورودی می باشد. برای این منظور از روش مختصات مرجع متحرک استفاده شده است که امکان اعمال شرط دوران به ماتریس دوار را می دهد، از این رو از معادلات پیوستگی، معادله بقای اندازه حرکت خطی، و معادله انرژی در مختصات مرجع متحرک بر حسب سرعت مطلق، به شرح زیر استفاده شده است:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}_r \bar{\mathbf{v}}) + \rho (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{v}}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_r + \bar{\mathbf{F}} \end{aligned} \quad (11)$$

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

در معادلات فوق به جهت سازگاری با مختصات مرجع متحرک، از سرعت مطلق استفاده شده است. در معادله ۱۱ ترم های اول و دوم

سمت چپ توضیح داده شد. ترم سوم، نیروی کوریولیس و اثر چرخش مبدل را مدل می کند. در سمت راست معادله ترم اول توضیح داده شده و ترم های دوم و سوم بترتیب معرف تنش ویسکوز هستند که نیروی لزجت سیال و نیروی خارجی (مقاومت محیط متخلخل، نیروی بویانسی یا نیروی سانتریفیوژ) را مدل می کنند.

معادله ۱۲ به جهت مدل سازی انتقال حرارت در مبدل دوار ژانگستروم استفاده می شود. در سمت چپ معادله، ترم اول معرف تغییر انرژی کل در زمان، ترم دوم بیانگر همرفت انرژی (ترم جابجایی) می باشند. ضمن اینکه در سمت راست معادله، ترم اول، هدایت و کار ویسکوز، ترم دوم منبع حرارتی در واحد حجم را بیان می کنند.

دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک با استفاده از معادله ورهوف و بانچرو براساس آنالیز گازهای دودکش، محاسبه می شود که این عدد در محدوده ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد می باشد.

$$\begin{aligned} \frac{1000}{T_{DEW}} \\ = [2.275 - 0.0294 \ln(p_{H_2O}) \\ - 0.0858 \ln(p_{SO_3}) \\ + 0.0062 \ln(p_{H_2O}) \ln(p_{SO_3})] \end{aligned} \quad (13)$$

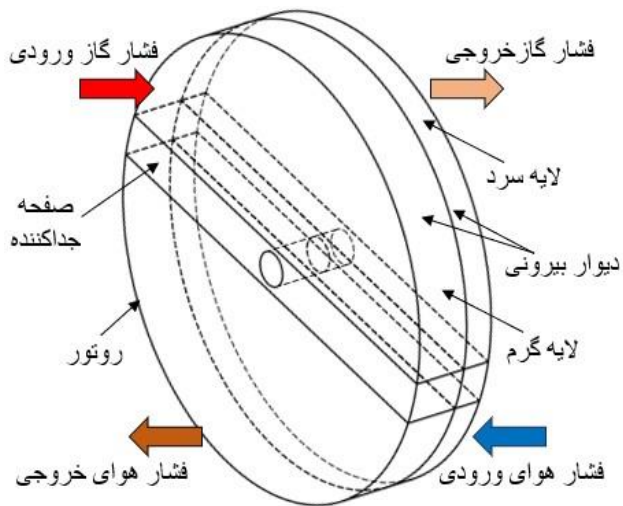
در معادله فوق، p نشان دهنده فشار جزئی بر حسب میلی متر جیوه است.

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از روش حجم محدود، روش بالادست مرتبه دوم برای گسسته سازی معادلات و از الگوریتم جفت شده (Coupled) به منظور ارتباط معادلات سرعت و فشار استفاده شده است. مدلسازی ماتریس با نرم افزار سالیید ورکس انجام شد. برای تولید شبکه با سلول چهاروجهی (Tetrahedron)، از نرم افزار انسیس مشینگ، و برای حل مسئله از نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، با توجه به آنچه در شکل ۴ مشاهده می شود، تعداد گره های شبکه در هر مرحله اضافه شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می شوند (در اینجا دمای خروجی هوا و گاز). با توجه به انطباق نتایج دو شبکه بندی، حل از شبکه مستقل شده و شبکه نشان داده شده در ردیف ۴ و ۵ جدول ۳، با تعداد شبکه کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، زمانی که تعداد شبکه از ۱۵۹۹۶۰ به ۵۷۷۵۷۹ می رسد، نتایج ۲/۳ درصد تغییر می کند.

جدول ۳- مطالعه تعداد شبکه واستقلال نتایج حاضر.

ردیف	زمان اجرا (min)	تعداد شبکه	دمای هوای خروجی (K)	دمای گاز خروجی (K)	تغییر نتایج (%)	مشخصات نرم افزار و سیستم اجرا
۱	۲۴	۱۵۹۹۶۰	۴۴۲/۱۳	۵۰۰/۳۵	-	IdeaPad Gaming 3-15IHU6-Type 82k1 Processor: 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-11300H @ 3.10GHz 3.11 GHz RAM: 16.0 GB Edition: Windows 11 Version 22H2
۲	۲۴	۲۸۳۱۱۵	۴۴۷/۵۳	۵۰۵/۰۲	۱/۲	
۳	۳۶	۳۷۷۹۸۷	۴۵۰/۷۸	۵۰۹/۰۶	۰/۷۲	
۴	۴۰	۵۷۷۵۷۹	۴۵۲/۳۹	۵۱۲/۸۳	۰/۳۵	
۵	۷۲	۷۳۴۹۷۶	۴۵۲/۷۴	۵۱۲/۶۳	۰/۰۸	

سیال هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ظرفیت گرمایی متوسط، تابعی از چند جمله ایی تکه ایی (Piecewise-Polynomial) برحسب ژول بر کیلوگرم کلین در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- شرایط مرزی پیش گرمکن هوای دوار.

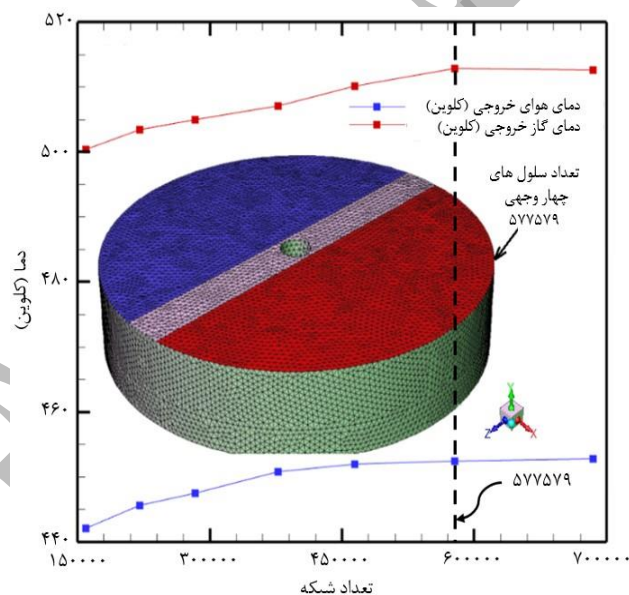
۴- اعتبارسنجی

قبل از بررسی و تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر کارایی ژانگستروم، لازم است از صحت و اعتبار شبیه سازی و حل عددی انجام شده اطمینان حاصل شود. در اینجا به منظور شبیه سازی مدل پیش گرمکن هوای ژانگستروم از مشخصات فنی و شرایط عملکردی پیش گرمکن دوار هوای ارائه شده در مقاله مرجع [۲۰]، استفاده شده است و به منظور راستی آزمایی، نتایج تحقیق حاضر با داده های واقعی نیروگاه و مقاله مرجع مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، توافق قابل قبولی بین نتایج تحقیق حاضر، داده های واقعی نیروگاه و مقاله مرجع وجود دارد.

جدول ۴- مقایسه نتایج حل عددی تحقیق حاضر با مقاله

مورد مطالعه و داده های واقعی نیروگاه

پارامتر	دمای هوای	دمای دود خروجی
---------	-----------	----------------



شکل ۴- شبکه محاسباتی پیش گرمکن هوای دوار

(شبکه بندی و تغییرات دمایی نسبت به تعداد شبکه).

۳- شرایط مرزی و روش حل

وجود فن های دریافت کننده اجباری (FD)، دریافت کننده القایی (ID) و دریافت کننده اولیه (PD) در مسیر پیش گرمکن، منجر به اختلاف فشار در ژانگستروم (ورودی و خروجی هر دو سیال هوا و دود) می شود، که با کمک دستگاههای اندازه گیری فشار، قابل اندازه گیری است. لذا در تحقیق حاضر بطوری که در شکل ۵ قابل مشاهده می باشد، از شرایط مرزی ورودی شامل دمای ورودی، فشار ورودی، سرعت ورودی، و تخلخل در لایه های گرم و سرد و شرایط مرزی خروجی شامل دمای خروجی و فشار خروجی استفاده شده است. با فرض عایق بودن دیواره اطراف پیش گرمکن هوا و تفاوت خواص ترمودینامیکی سیال سمت هوا و دود، به منظور تطابق شرایط تئوری و عملیاتی، از دو سیال در میدان محاسباتی استفاده شده است. چگالی

	خروجی (K)	(K)
داده های واقعی نیروگاه	۵۳۴/۳	۳۹۳/۴
نتایج مقاله مرجع	۵۴۴/۵	۴۲۲/۹
نتایج تحقیق حاضر	۵۴۲/۲	۴۱۳/۷۵
درصد خطا با مقاله مرجع	۰/۴۲٪	۲/۳٪

۵- تجزیه و تحلیل و نتایج حل عددی

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، ماتریس با سرعت دورانی حدود ۲ دور بر دقیقه، تاثیر مستقیم روی حداقل دمای هوای خروجی و حداکثر دمای گاز خروجی دارد، حداقل دمای هوای خروجی و حداکثر دمای گاز خروجی به ترتیب روندی مشابه با میانگین دمای هوای خروجی و گاز خروجی دارند. به دلیل تشکیل نقطه شبنم در پیش گرم کن و خوردگی ماتریس، حداقل دمای خروجی گاز مهم است. با افزایش سرعت چرخش، حداکثر دمای سبدها در هنگام قرار گرفتن در قسمت گرم کاهش می یابد و حداقل دمای سبدها زمانی که در قسمت سرد قرار می گیرند افزایش می یابد که منجر به کاهش راندمان پیش گرمکن می شود. با افزایش سرعت چرخش تا ۶ دور در دقیقه، در یک بازه زمانی ثابت، ضمن کاهش میانگین دمای گاز خروجی به ۳۷۶ درجه کلوین، میانگین دمای هوای خروجی به ۵۹۰ درجه کلوین و راندمان به ۸۴ درصد می رسد. (روش میانگین جرمی دما در مواردی که توزیع دما و سرعت در سطح مقطع خروجی یکنواخت نیست، دقیق ترین معیار برای ارزیابی عملکرد حرارتی محسوب می شود. دمای میانگین جرمی عبوری از هر سطح که از روی هر سطح محاسبه می شود). در حالی که بیش از ۶ دور در دقیقه، میانگین دمای گازهای خروجی ۱۶ درجه کلوین و راندمان ۹ درصد افزایش می یابد. سرعت چرخش علاوه بر عدم تأثیر معنی دار بر حداکثر دمای هوای خروجی و حداقل دمای گاز خروجی بر حداکثر دمای خروجی گاز و حداقل دمای خروجی هوا تأثیر مستقیم دارد، ضمن اینکه افزایش ۲۰ درجه سانتیگراد در دمای هوای ورودی، میانگین دمای گاز خروجی و هوای خروجی را به ترتیب حدود ۲ و ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش می دهد. همچنین افزایش ۲۰ درجه سانتیگراد دمای گاز ورودی، میانگین دمای گاز خروجی و دمای هوای خروجی را به ترتیب حدود ۷ و ۲ درجه سانتیگراد افزایش می دهد.

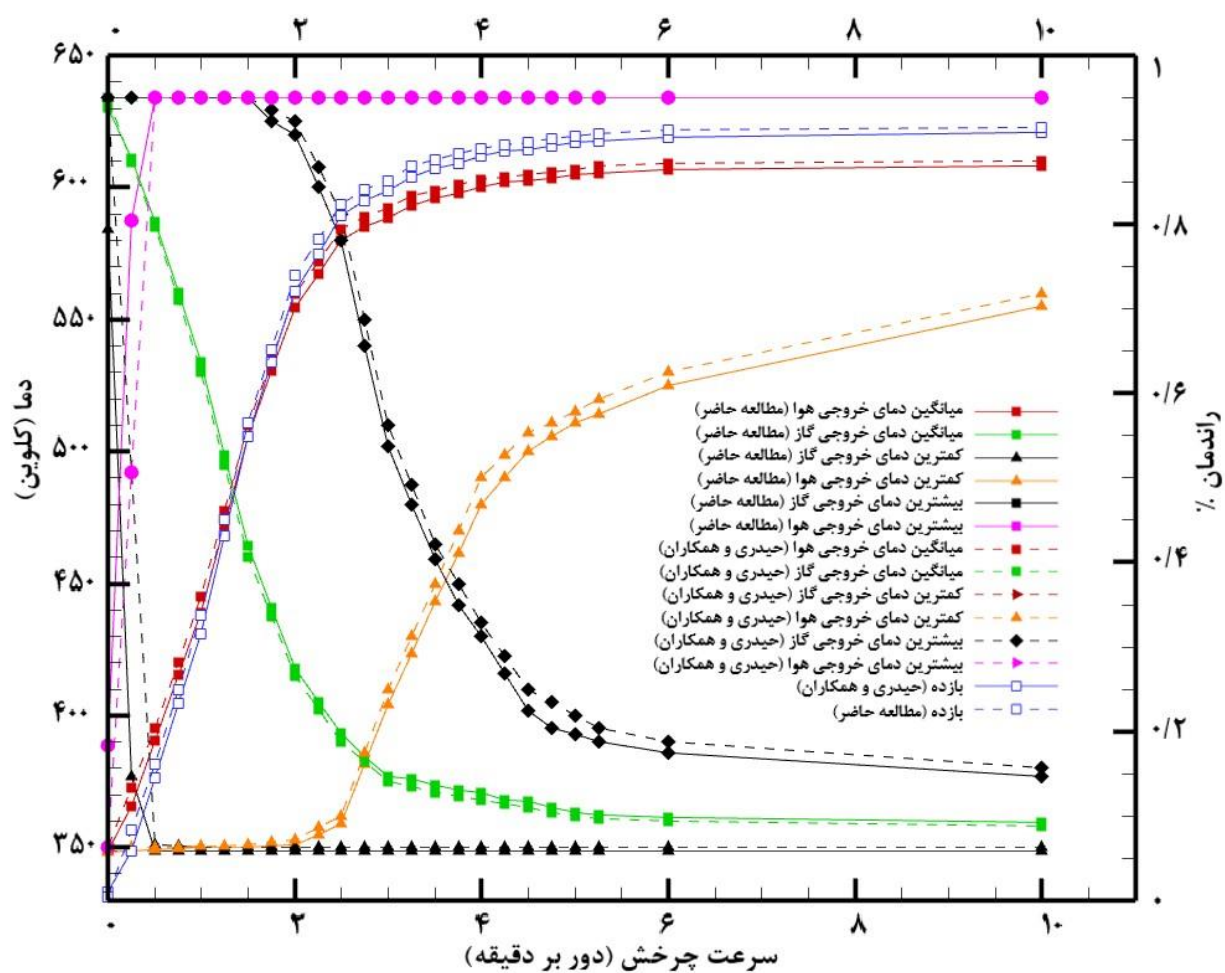
منحنی های توزیع دمای عناصر گرمایشی در شکل های ۸، ۷ و ۹ نشان می دهد که در ابتدای چرخش ماتریس (موقعیت صفر

درجه)، امکان چگالش اسیدی بر روی تمام سطوح عنصر گرمایی حتی در قسمت بالای لایه گرم وجود دارد. چرخش ماتریس به سمت انتهای گرم، دمای عناصر حرارتی را به دلیل انتقال حرارت با گازهای دودکش، به ویژه در لایه های بالایی که ابتدا با گازهای دودکش گرم در تماس هستند، به سرعت افزایش می دهد. زمانی که چرخش ماتریس به موقعیت ۹۰ درجه می رسد، دمای لایه بالایی عنصر گرمایی به طور قابل توجهی افزایش می یابد. درشرایطی که دما در لایه پایینی ماتریس هنوز پایین است. این توزیع دما در شکل نشان داده شده است. با چرخش بیشتر ماتریس (موقعیت ۱۸۰)، عناصر گرمایی به دمای بیشینه خود یعنی دمای گازهای داغ دودکش می رسند، که در این منطقه، هیچ تراکم اسید رخ نمی دهد.

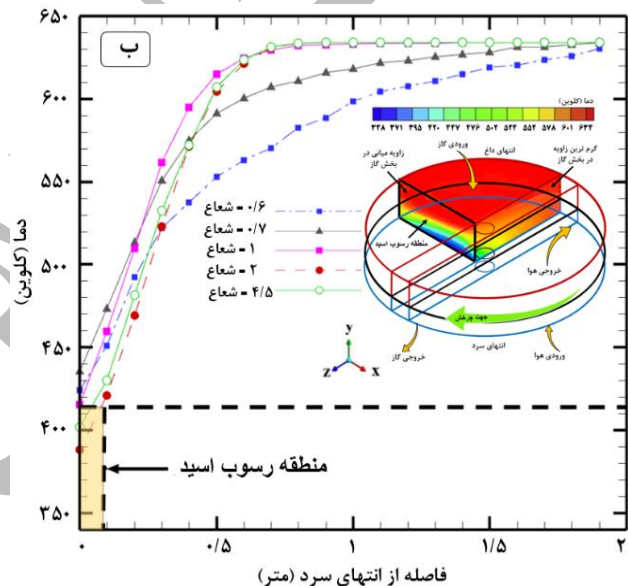
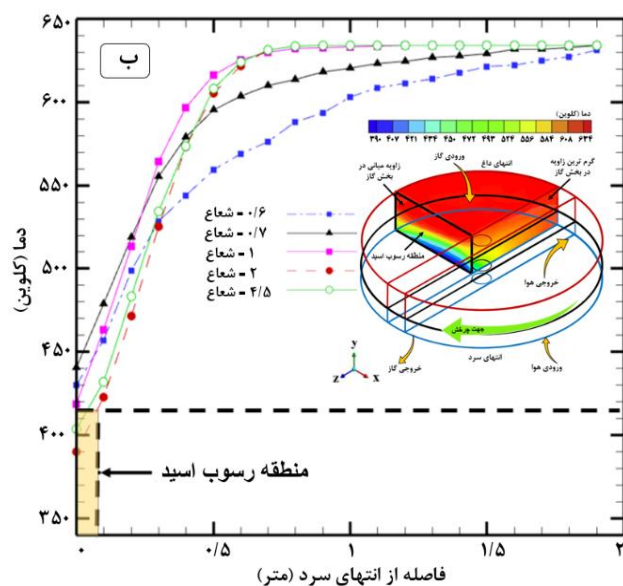
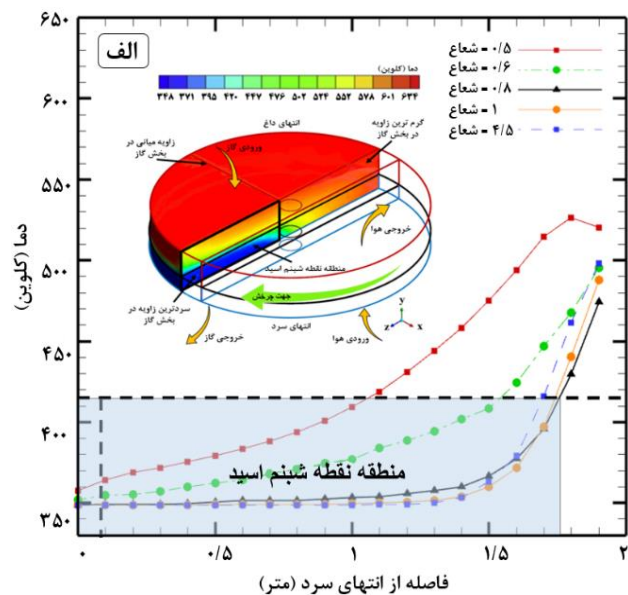
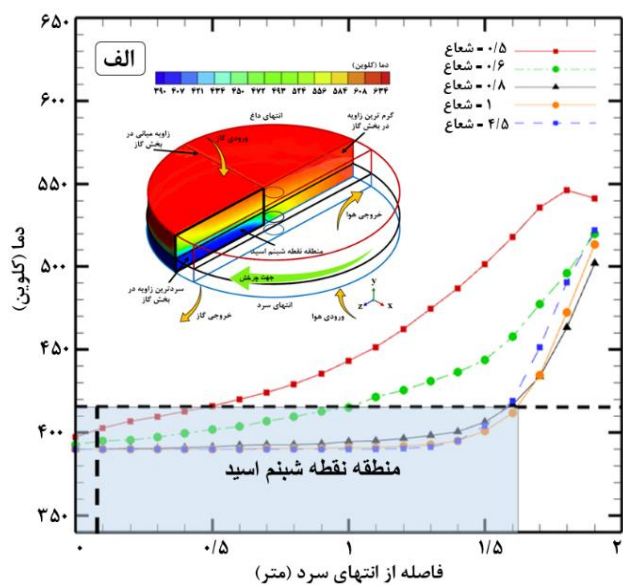
منطقه دمای پایین یا به اصطلاح منطقه بحرانی در ارتفاعی در حدود ۶۰۰ میلیمتر دورتر از کف لایه نهایی سرد واقع شده است. هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می شود، بیشترین خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس رخ می دهد (شکل ۱۰).

درماتریس، سرعت دورانی تأثیری بر شروع چگالش سیال و نقطه شبنم ندارد، یعنی با تغییر سرعت دوران نمی توان از فرآیند خوردگی جلوگیری کرد. افزایش سرعت چرخشی ژانگستروم با صفحه جداکننده موجب افزایش نشستی و سایش بیشتر نشت بندها و شکستگی بیشتر آنها می شود که باعث کاهش ضریب عملکرد و اثربخشی بازیاب خواهد شد. در حالی که در سرعت های چرخشی پایین صفحه جداکننده تأثیر محسوسی بر توزیع دمای مبدل حرارتی ندارد.

توزیع دما در صفحه عمودی ماتریس نشان می دهد که گرم ترین و سردترین دما در حداکثر شعاع ماتریس اتفاق می افتد. به دلیل مشکل نشت، برای کنترل موثر آب بند شعاعی، کاهش سطح صفحه جداکننده نمی تواند کمتر از حد خاصی باشد. در صورت کاهش سطح صفحه جداکننده بازده پیش گرم کن بعلاوه افزایش سطح موثر انتقال حرارت بین صفحات و سیالات افزایش می یابد. با افزایش نرخ جریان سیال، دمای متوسط هوای خروجی کاهش می یابد، در حالی که دمای متوسط گاز خروجی افزایش می یابد، که منجر به کاهش عملکرد پیش گرم کن هوا می شود. این کاهش به دلیل نبود ظرفیت ماتریس برای انتقال انرژی است. در شکل های ۱۱ و ۱۲، کانتورهای مربوط به توزیع دمای پیش گرمکن هوا در سرعت های چرخشی مختلف (۶ و ۲ دور در دقیقه) از سمت انتهای داغ نشان داده شده است.

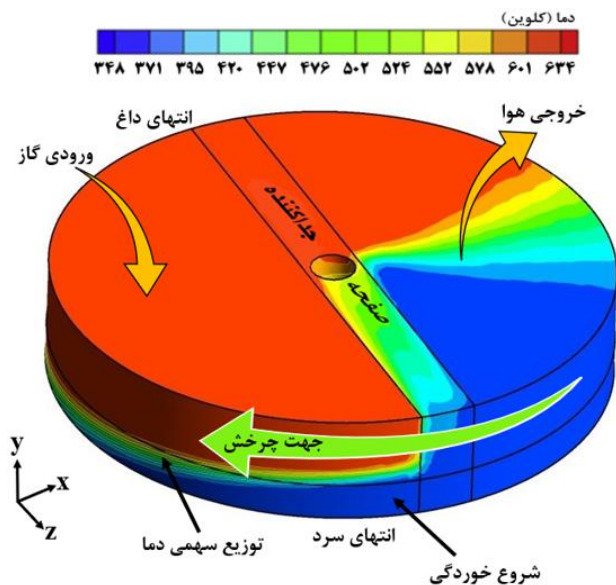


شکل ۶- اثر سرعت دورانی بر رانندمان، حداقل و حداکثر دماهای خروجی هوا و گاز.

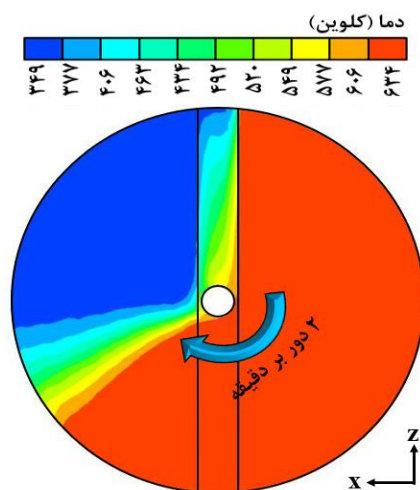


شکل ۸- توزیع دمای پیش گرمکن هوا با افزایش ۴۱ درجه سانتیگراد در دمای هوای ورودی، در شعاع ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه.

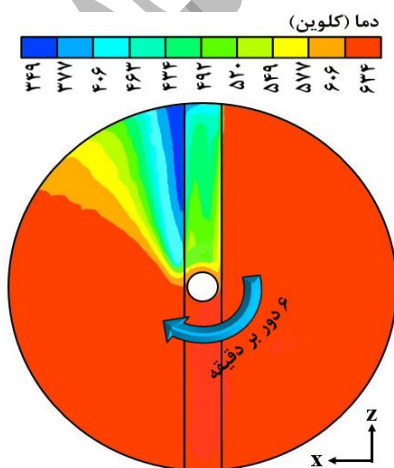
شکل ۷- توزیع دمای پیش گرمکن هوا بر حسب شرایط واقعی در شعاع ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه.



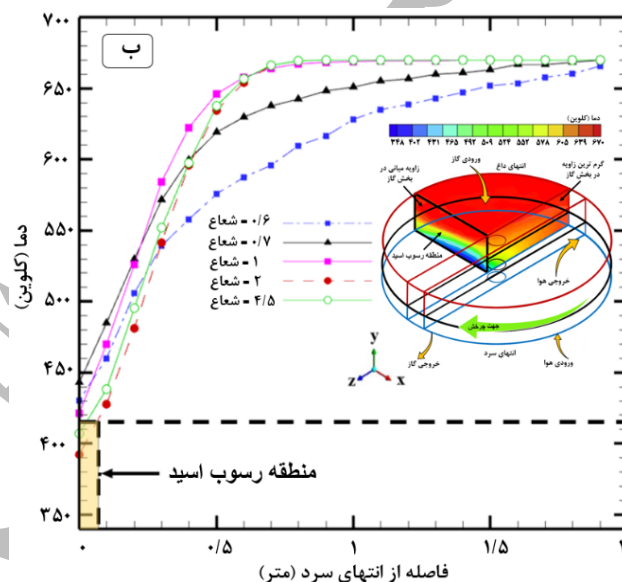
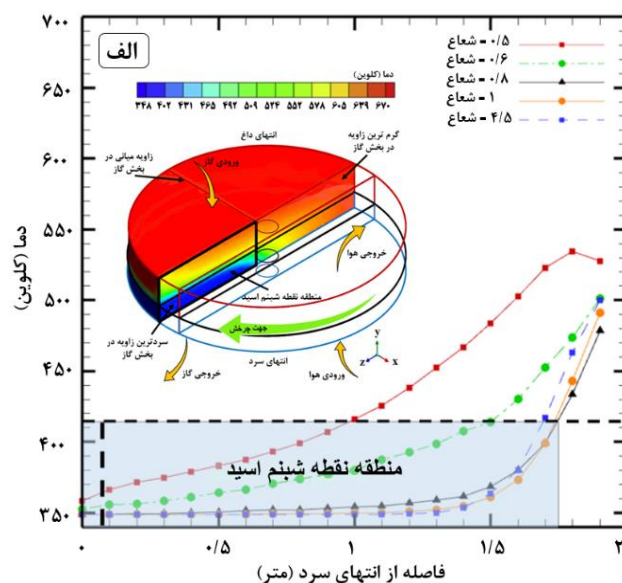
شکل ۱۰- توزیع دمای پیش گرمکن هوا، زمانی که انتهای داغ در بالا باشد.



شکل ۱۱- توزیع دمای پیش گرمکن هوا، سرعت چرخش ۲ دور در دقیقه.



شکل ۱۲- توزیع دمای پیش



شکل ۹- توزیع دمای پیش گرمکن هوا با افزایش ۳۶ درجه سانتیگراد در دمای گاز ورودی، در شعاع ها و فواصل مختلف از لایه انتهایی سرد؛ الف) ماتریس در ابتدای جریان هوا در موقعیت صفر درجه. ب) ماتریس بعد از چرخش در موقعیت ۹۰ درجه.

گرمکن هوا، سرعت چرخش ۶ دور در

دقیقه.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق توزیع دمای پیش گرمکن هوا به منظور تعیین سطوح مستعد خوردگی با نرم افزار فلوئنت بدست آمد. تجزیه و تحلیل پیش گرمکن هوای دوار تک ماتریسی انجام شد. بیشترین خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس یعنی هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می‌شود، رخ می‌دهد. این موضوع جهت رسیدن دمای دود به زیر نقطه شبنم ایجاد می‌شود که اهمیت حداقل دمای گاز خروجی را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از چگالش بر روی ماتریس و تشکیل اسیدهای خورنده؛ یک روش مناسب، پیش گرمایش هوای ورودی سرد برای رسیدن به دمایی بین ۳۴۰ تا ۳۶۰ درجه کلوین با استفاده از مبدل حرارتی است. اما با توجه به دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک (۳۹۳ تا ۴۱۳ درجه کلوین)، که بر اساس دی اکسید گوگرد گازهای دودکش تعیین شده است، پیش گرمایش فوق باید رسیدن به دمایی بین ۳۸۵ تا ۴۰۵ درجه کلوین باشد. انرژی گرمایی برای مبدل حرارتی توسط بخاری که از بخش‌های فرعی توربین می‌آید، می‌تواند تامین شود. با افزایش دمای هوای ورودی، میانگین دمای گاز خروجی افزایش می‌یابد. این پدیده به دور شدن از دمای نقطه شبنم جریان کمک می‌کند.

مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نمونه واقعی و مقاله مرجع، نشان داد که مطالعه حاضر، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. مطالعه حاضر نشان داد هنگامی که ماتریس سرد در ابتدا وارد کانال گاز در سطوح نزدیک به محیط می‌شود، بیش‌ترین خوردگی معمولاً در لایه پایینی ماتریس رخ می‌دهد. حضور صفحه جداکننده، توزیع دما در ماتریس را به ویژه در نزدیکی مرکز تغییر می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی سرعت چرخشی در ژانگستروم، به این صورت بود که بیشترین تأثیر سرعت چرخشی بر کارایی ژانگستروم در محدوده ۰/۵ تا ۶ دور بر دقیقه خواهد بود و با افزایش سرعت چرخشی بیشتر از ۶ دور بر دقیقه مقدار کارایی حرارتی مبدل تغییر نمی‌کند. از طرفی با توجه به لزوم نشت بندی مورد نیاز در ژانگستروم، سرعت چرخشی نباید از حداکثر مقدار مجاز بیشتر شود بنابراین سرعت چرخشی بهینه در بازه ۰/۵ تا ۴ دور بر دقیقه می‌باشد.

۷- نمادها

۷-۱- علائم و نشانه‌ها:

Re	عدد رینولدز، (بی بعد)
R	شعاع روتور (m)
V	سرعت سیال، (ms)
ν	سرعت نشت، (ms^{-1})

D_H

A

P

$\bar{V}$

ν_f

ν_s

p

k

q_s''

$\dot{m}$

T

$\bar{F}$

E

S_h

H

$\bar{u}_r$

$\bar{v}_r$

C_p

T_{DEW}

SO_3

H_2O

قطر هیدرولیکی، (m)

سطح مقطع عبور سیال (m^2)

محیط درگیر با جریان سیال (m)

سرعت مطلق، (ms^{-1})

سرعت سیال مایع، (ms^{-1})

سرعت سیال جامد، (ms^{-1})

فشار، ($kgm^{-1}s^{-2}$)

ضریب هدایت حرارتی سیال، ($Wm^{-1}k^{-1}$)

تولید حرارت در واحد حجم، (Wm^{-3})

دبی جرمی، (kgs^{-1})

دما، (K)

نیروهای بدنه خارجی

انرژی داخلی نسبی kgm^2/s^2

چشمه حرارتی

آنتالپی کل

سرعت در مختصات مرجع متحرک، (ms^{-1})

سرعت نسبی، (ms^{-1})

گرمای ویژه فشار ثابت، ($Jkg^{-1}k^{-1}$)

دمای نقطه شبنم (K)

تری اکسید گوگرد

بخار آب

۷-۲- حروف یونانی:

$\bar{u}_r$	تانسور تنش نسبی
α	ضریب تراوایی (نفوذپذیری) محیط متخلخل، (m^2s^{-1})
γ	ضریب تخلخل، (بی بعد)
η	بازده، (بی بعد)
ν	لزجت سینماتیکی، (m^2s^{-1})
μ	لزجت دینامیکی، ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی، (kgm^{-3})
ω	سرعت زاویه ای

۷-۳- زیر نویسها:

a	مربوط به هوا
f	مربوط به سیال
g	مربوط به گاز
in	ورودی
m	مربوط به مخلوط
out	خروجی

۸- مراجع

- [10] I. Warren, Ljungstrom heat exchangers for waste heat recovery, Heat Recovery Syst. CHE 2 (3), pp. 257-271, (1982).
- [11] B. Drobic, J. Oman, M. Tuma, A numerical model for the analyses of heat transfer and leakages in a rotary air preheater. Int. J. Heat Mass Transfer. 49(25-26) (2006) 5001-5009,
- [12] H.Y. Wang, L.L. Zaho, Z.G. Xu, W.G. Chun, H.T. Kim, the study on heat transfer model of tri-sectional rotary air preheater based on the semi-analytical method, Appl. Therm. Eng. 28 (14-15) (2008) 1882-1888.
- [13] S. Sanaye, S. Jafari, H. Ghaebi, Optimum operational conditions of a rotary regenerator using genetic algorithm, Energy Build. 40 (9) (2008) 1637-1642,
- [14] Yufan. Bu, L. Wang, Xun. Chen, Xiao. Wei, Lei Deng, Defu Che, Numerical analysis of ABS deposition and corrosion on a rotary air preheater 131 669 677 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.082>, (2018).
- [15] M. Mousavi, M. Passandideh-Fard, M. Ghazikhani, Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a rotary regenerator, in: The 16th Annual Conference of the CFD Society of Canada, (2008).
- [16] H. Chen, P. Pan, H. Shao, Y. Wang, Q. Zhao. Corrosion and viscous ash deposition of a rotary air preheater in a coal-fired power plant / Applied Thermal Engineering 113, 373-385, (2017).
- [17] M. Hajjari, Gh. Salehi, M. E. Nimvari. CFD Simulation of Ljungstrom Rotary Preheater in Steam Power Plant for Leakage Assessment Using Porous Media Approach DOI: 10.22044/jsfm.9607.3170, (2021).
- [18] N. Ghodsipour, M. Sadrameli, Experimental and sensitivity analysis of a rotary air preheater for the flue gas heat recovery, Appl. Therm. Eng. 23 (5) (2003) 571-580.
- [19] L.A. Sphaier, W.M. Worek, Analysis of heat and mass transfer in porous sorbents used in rotary regenerators, Int. J. Heat Mass Transf. 47 (14-16) (2004) 3415-3430.
- [20] N.B. Khedher, S.B. Nasrallah, Three-dimensional modeling and analysis of a
- [1] Optimization of primary air inlet opening of tri-sector air pre-heater for minimizing primary air pressure drop in air preheater (APH) & to study the effect of variation of rpm on APH performance using CFD analysis M. Tech. dissertation by Mohit Rajput, D. M. Eng. Malaviya National Institute of Technology Jaipur-(2016).
- [2] S. Vulloju et al, Analysis of Performance of Ljungstrom Air Preheater Elements International Journal of Current Engineering and Technology, Special Issue-2, (2014).
- [3] I. Farhadi, F. Veysi, M. Mirza Asgari, Numerical simulation of rotary regenerative air preheater (Ljungstrom) in steam power plant with the aim of optimizing of thermal performance, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No.03, pp.291-301, (2018).
- [4] R. K. Shah, D. P. Sekulic, Fundamentals of Heat Exchanger Design, pp. 3-74, USA John Wiley & Sons, (2003).
- [5] H. Hajebzadeh, A. Ansari, Modification of rotary air preheater toward achieving extended life-span utilizing porous media approach: A case study article in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy, (2021).
- [6] Dr. Tawfig Ahmad El-din et al. Relation between exhaust gases and efficiency in Khartoum north power station Retrieved from <http://repository.sustech.edu/handle/123456789/19896>, (2017).
- [7] A. Usami, T. Noguchi, H. Tezuka, S. Nishimura, T. Kusunoki, Development of a Water Dew Corrosion Resistant New Steel Element for Air Preheaters at Natural Gas Fired Power Plants NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 87, (2003).
- [8] J. Manivel, L. Manimaran, M. Thiyagarajan, P. Satheeshkumar; International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. Performance Analysis of Air Preheater in 210mw Thermal Power Station. ISSN: 2454-132X. (2017).
- [9] L.P. Bondurant III, SCR Compatibility for the Ljungstrom Air Preheater, Proceeding of the

خطه حسن الخط

- خطه حسن الخط