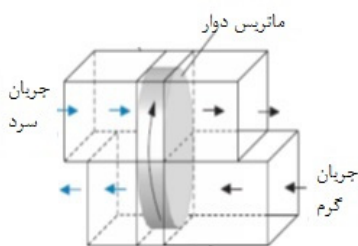


مدل سازی بازیاب‌های حرارتی دوار

علی زینلی^{۱*}، حسین اقبالی^۱ و وحید رفیعی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: بازیاب گرمایی، بازیافت انرژی، مدل سازی ریاضی، ماتریس.</p>	<p>بازیاب‌های گرمایی نوع دوار از دسته مبدل‌های فشرده‌ای هستند که در آن‌ها انرژی حرارتی جریان گاز داغ توسط ماتریس جذب شده و سپس این انرژی به جریان گاز سرد داده می‌شود. تحلیل ریاضی این نوع از مبدل و بررسی اثر پارامترهای مختلف می‌تواند نقش بسزایی در بهبود عملکرد آن‌ها داشته باشد. در این مقاله از مدل ریاضی برای تحلیل گرمایی سیال و ماتریس استفاده شده است. در مدل اثر پارامترهای سرعت چرخش ماتریس، هدایت حرارتی در جهت حرکت سیال و زمان در نظر گرفته شده است. این مدل با استفاده از حل عددی در نرم‌افزار ویژوال بیسیک حل شده و اثر پارامترهای مختلفی مانند سرعت چرخش ماتریس، طول و قطر مبدل بر دمای خروجی سیالات و بازده مبدل بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول مبدل و سرعت چرخش، ماتریس بازده مبدل افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش قطر مبدل، ابتدا بازده افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقایسه دماهای خروجی حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی، عملکرد مناسب مدل در پیش‌بینی دمای خروجی را نشان می‌دهد.</p>

۱- مقدمه



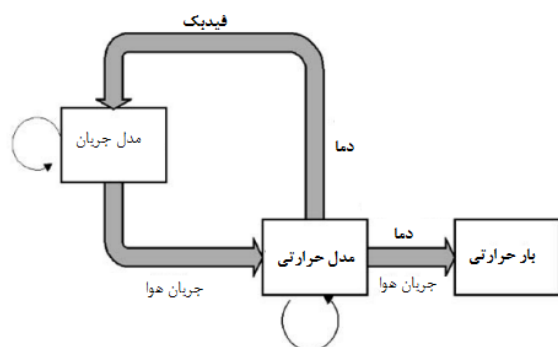
شکل ۱- بازیاب گرمایی دوار

مبدل‌های گرمایی نوع دوار از نوع مبدل‌های فشرده و غیرمستقیم هستند که در آن جریان گاز داغ از مبدل عبور کرده و گرمای آن به ماتریس منتقل می‌شود. بعد از مدت زمان مشخصی (سیکل داغ)، دیسک چرخیده و با عبور جریان سرد از ماتریس، گرمای ذخیره شده در آن به جریان سرد داده می‌شود (شکل ۱).

این نوع از مبدل‌ها بطور گسترده در سامانه‌های بازیافت انرژی، در دماهای متوسط و پایین استفاده می‌شوند. ماتریس‌ها از سطوح متخلخل فلزی با ساختار سلولی تشکیل شده‌اند که معبر جریان‌های گاز داغ و سرد می‌باشد. در صورت امکان می‌توان با نصب پره‌های کوچک بر روی این سطوح، سطح انتقال حرارت را افزایش داد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.zeinali@modares.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان



شکل ۲- سامانه کنترلی بازیافت انرژی با استفاده از کنترل کننده دما و دبی

تاکنون تلاش‌های زیادی در زمینه مدل‌سازی این نوع از مبدل‌ها شده‌است. سنایی و همکاران [۴] با استفاده از روش ε -NTU مبدل را مدل و اثر پارامترهای سرعت چرخش ماتریس، جرم ماتریس، ضخامت ماتریس و سطح انتقال حرارت را بررسی کردند. همچنین آن‌ها در کار دیگری شرایط بهینه برای مبدل را با استفاده از الگوریتم ژنتیکی^۱ بررسی کردند [۵]. میورالی و همکاران [۶] مبدل‌های دوار را با استفاده از روش‌های عددی در حالت پایا مدل کرده و شرایط بهینه کارکرد مبدل را بررسی کردند. ورک و همکاران [۷] با استفاده از روش ε -NTU اثر شرایط عملیاتی و فیزیکی مبدل را بررسی کردند. در این مقاله آنالیز مبدل گرمایی دوار بر مبنای مدل‌سازی و شبیه‌سازی انجام گرفت. در ابتدا برای این نوع مبدل بر مبنای اصول فیزیکی، مدل ریاضی استخراج گردید. برای نوشتن مدل از فرضیات اساسی استفاده شد. سپس با استفاده از روش ضمنی^۲ معادلات دیفرانسیل حاصل با مشتقات جزئی حل شد. با حل این معادلات توزیع دمایی و تغییرات آن با زمان برای پاسخ گذرای مبدل بدست آمد. در قسمت بعد به بررسی اثر دبی جریان و دمای هوا و سرعت چرخش ماتریس بر روی پاسخ گذرای فرآیند پرداخته شد.

این ماتریس بین دو لوله جریان سرد و گرم قرار دارد. این لوله‌ها بوسیله سطوح خاصی از هم جدا شده‌اند که از اختلاط دو جریان گرم و سرد جلوگیری می‌کند. جریان‌های گازهای داغ و سرد همزمان از این لوله‌ها عبور می‌کنند و انرژی محسوس آن‌ها با ماتریس تبادل می‌شود. از این نوع مبدل در پیش گرمایش هوا در نیروگاه‌ها، بازیافت انرژی در بویلرها و توربین‌های گازی استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای مهم این نوع مبدل در سامانه‌های تهویه است [۱].

مزایای استفاده از مبدل‌های دوار به صورت زیر است:

- ۱- سطح بالا و ارزان انتقال حرارت نسبت به انواع دیگر مبدل‌ها
 - ۲- خاصیت خود-پاک‌کنندگی ماتریس‌ها با استفاده از جریان‌های متقاطع گازهای گرم و سرد
 - ۳- افت فشار کم با استفاده از ساختار لانه زنبوری ماتریس‌ها
 - ۴- استهلاک کمتر نسبت به رکوپریتورها [۲].
- عوامل مختلفی در عملکرد مبدل‌های دوار تاثیر دارد. این عوامل عبارتند از:

- ۱- نشت کردن جریان‌ها از سطح جداکننده
- ۲- فضای مورد نیاز برای مبدل
- ۳- دما و فشار عملکرد
- ۴- آلودگی ماتریس‌ها و راه حل‌های رفع آن
- ۵- دبی‌های متفاوت جریان‌های گرم و سرد که بایستی در معادلات منظور گردد.
- ۶- کنترل.

فهم بهتر پاسخ گذرای مبدل و مدل‌سازی آن کمک شایانی به طراحی موثر آن می‌کند. دلیل اهمیت مدل‌سازی پاسخ گذرای مبدل این است که در ابتدای فرآیند که گرما مورد نیاز است، سرعت چرخش ماتریس بایستی افزایش یابد که لزوم کنترل دما و دبی هوای گرم بوسیله حلقه کنترلی PI را ایجاب می‌کند (شکل ۲) [۳].

¹ Genetic algorithm

² Implicit method

۲- مدل سازی ریاضی

استفاده می‌شود. همچنین از زیرنویس w برای ماتریس استفاده می‌شود.

بیان انرژی بصورت زیر است:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W} + q''_{w-f} = \dot{Q}_{out} + \left(\frac{dE}{dt} \right)_{cv} \quad (1)$$

که در این معادله $\dot{Q} = [\dot{m} \cdot (e + Pv)] = [\dot{m} \cdot (KE + PE + u + Pv)]$ کل انرژی سیال به‌ازای واحد جرم می‌باشد. u انرژی درونی، KE انرژی جنبشی، PE انرژی پتانسیل و Pv کار جریان می‌باشد. \dot{W} کار شفت ورودی، q_{w-f} انتقال حرارت از ماتریس به سیال و $\dot{E} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{cv}$ نیز شدت تجمع انرژی می‌باشد [۵].

برای ساده‌تر شدن محاسبات، ماتریس استوانه‌ای شکل ۳- الف به صورت مکعب مستطیل شکل ۳- ب تقریب زده شده‌است. با نوشتن معادله ۱ برای سیال گرم و سرد و ماتریس، معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{Q}_{f,h,z+dz} - \left(\lambda_{f,h} \cdot A_{f,h} \frac{\partial T_{f,h}}{\partial z} \Big|_{z+dz} - \lambda_{f,h} \cdot A_{f,h} \frac{\partial T_{f,h}}{\partial z} \Big|_z \right) = \dot{Q}_{f,h,z+dz} + q''_{f,h-w} + \frac{dE_{f,h}}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dE_w}{dt} = q''_{f,h-w} - q''_{w-f,c} + \left(\lambda_w \cdot A_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \Big|_{z+dz} - \lambda_w \cdot A_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \Big|_z \right) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{f,c,z} + q''_{w-f,c} + \left(\lambda_{f,c} \cdot A_{f,c} \frac{\partial T_{f,c}}{\partial z} \Big|_{z+dz} - \lambda_{f,c} \cdot A_{f,c} \frac{\partial T_{f,c}}{\partial z} \Big|_z \right) = \dot{Q}_{f,c,z+dz} + \frac{dE_{f,c}}{dt} \quad (4)$$

که در این روابط:

$$\dot{Q} = \dot{m}h = \dot{m}c_p \Delta T \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{M}h = \dot{M}c_p \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

$$q'' = U \cdot B_w (T_w - T_f) dz \quad (7)$$

در این روابط U ضریب کلی انتقال حرارت، B_w عرض مکعب مستطیل، M جرم کل ماتریس، λ ضریب هدایت گرمایی و ρ دانسیته است.

هدف اصلی در این قسمت بیان مدل ریاضی برای دینامیک مبدل است. ابتدا اصول فیزیکی بیان شده، فرضیات ساده کننده بصورت عبارات ریاضی بیان می‌شوند و با استفاده از معادلات بقای انرژی مدل ریاضی بدست می‌آید.

تغییرات دمایی جریان هوا و ماتریس می‌تواند تاثیر چشمگیری بر روی ضریب کلی انتقال حرارت داشته باشد که این اثر لحاظ شده است.

فرضیات ساده کننده:

- ۱- سیال غیرقابل تراکم و جریان یک بعدی است.
- ۲- کل مبدل آدیاباتیک فرض می‌شود.
- ۳- سیال در سرعت پایین و در فشار ثابت است، لذا می‌توان گفت آنتالپی سیال تنها تابع دما است.
- ۴- هیچ‌گونه کاری در ماتریس انجام نمی‌شود.
- ۵- ضریب جابجایی انتقال حرارت در سرتاسر ماتریس ثابت فرض می‌شود.
- ۶- دبی جرمی سیال ثابت است.
- ۷- از هدایت گرمایی در جهت عمود بر حرکت سیال صرف‌نظر می‌شود. در حالی که هدایت گرمایی در جهت سیال در نظر گرفته می‌شود.
- ۸- خواص گرمایی سیال از قبیل ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت گرمایی و دانسیته در هر سطح مقطع از ماتریس یکنواخت، و برابر با مقدار بالک فرض می‌شود [۴].

بر مبنای این فرضیات ساده کننده با نوشتن بیان انرژی برای جزء المان dz از ماتریس می‌توان معادلات دیفرانسیل دمای سیالات گرم و سرد و ماتریس را به‌دست آورد. با حل این معادلات توزیع دما بر حسب مکان و زمان $T=T(z,t)$ حاصل می‌شود. از زیر نویس $f-h$ برای سیال گرم که از محیط اتاق به سمت مبدل می‌آید و از زیرنویس $f-c$ برای سیال سردی که از مبدل به طرف اتاق می‌رود،

لذا ضریب کلی انتقال حرارت با رابطه زیر بیان می شود
[۶]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{f,h}} + \frac{1}{h_{f,c}}} \quad (15)$$

که در آن $h_{f,h}$ ضریب جابجایی سیال گرم و $h_{f,c}$ ضریب جابجایی سیال سرد می باشد.

ساختار سلولی ماتریس ها به گونه ای است که افت فشار محسوسی در جریان سیال مشاهده نمی شود، لذا می توان فرض کرد که جریان آرام است. بنابراین از رابطه زیر می توان $h_{f,h}$ و $h_{f,c}$ را بدست آورد [۷].

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{d}{L}\right) Re.Pr}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{d}{L}\right) Re.Pr\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (16)$$

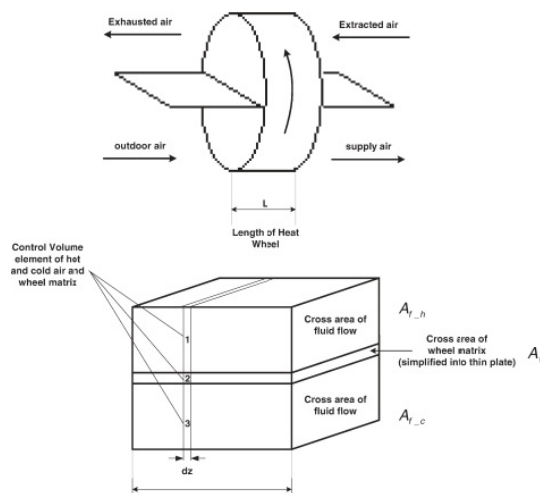
۲-۲- اثر سرعت چرخش ماتریس

در معادلات بدست آمده اثر چرخش ماتریس که مستقیماً بر بازده مبدل و پروفایل دما تاثیر می گذارد، در نظر گرفته نشده است. در این قسمت پارامتر سرعت چرخش ماتریس (φ) در روابط ریاضی بدست آمده، وارد می شود. اگر بازده مبدل ϵ_{rotary} باشد، داریم [۸]:

$$\epsilon_{rotary} = \frac{1 - e^{-NTU \cdot [1 - (C_{min}/C_{max})]}}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} e^{-NTU \cdot [1 - (C_{min}/C_{max})]}} \left[1 - \frac{1}{9 \left[\frac{C_r}{C_{min}}\right]^{1.93}} \right] \quad (17)$$

که در این معادلات $NTU = \frac{UA}{C_{min}}$ تعداد واحدهای انتقال، $A_s = L \cdot B_w$ کل سطح انتقال حرارت و C_{min} و C_{max} به ترتیب مینیمم و ماکزیمم ظرفیت حرارتی سیال می باشد. $C_r = M_w C_{p,w} \varphi$ نیز ظرفیت حرارتی ماتریس است. عبارت $\left[1 - \frac{1}{9 \left[\frac{C_r}{C_{min}}\right]^{1.93}} \right]$ تصحیح کننده بازده به علت چرخش ماتریس است.

در مبدل با سرعت چرخش φ انتقال حرارت بصورت متناوب انجام می شود و با تغییر φ مقدار انتقال حرارت نیز تغییر می کند. برای در نظر گرفتن اثر سرعت چرخش ماتریس بر روی معادلات حاکم بر مبدل، انرژی منتقل شده از ماتریس به سیال را در ضریب $9 \left[\frac{C_r}{C_{min}}\right]^{1.93}$ ضرب می کنیم. در نتیجه معادلات بصورت زیر در می آید:



شکل ۳- حجم کنترل و ساده سازی انجام شده

با جای گذاری روابط ۵ تا ۷ در روابط ۲ تا ۴ معادلات زیر حاصل می شود:

$$\frac{\partial T_{f,h}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{f,h}}{A_{f,h} \rho_{f,h}} \frac{\partial T_{f,h}}{\partial z} - \frac{B_w U}{A_{f,h} \rho_{f,h} c_{p,f,h}} (T_{f,h} - T_w) - \frac{\lambda_{f,h}}{\rho_{f,h} c_{p,f,h}} \frac{\partial^2 T_{f,h}}{\partial z^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_{f,c}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{f,c}}{A_{f,c} \rho_{f,c}} \frac{\partial T_{f,c}}{\partial z} + \frac{B_w U}{A_{f,c} \rho_{f,c} c_{p,f,c}} (T_w - T_{f,c}) + \frac{\lambda_{f,c}}{\rho_{f,c} c_{p,f,c}} \frac{\partial^2 T_{f,c}}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{U B_w L}{M c_{p,w}} (T_{f,h} - 2T_w - T_{f,c}) + \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{p,w}} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad (10)$$

برای حل هر کدام از این سه معادله نیاز به دو شرط مرزی و یک شرط اولیه است. شرایط اولیه و مرزی بصورت زیر است:

$$T_I|_{t=0} = T_{I,0}, \text{ for } I = f_h, f_c, w \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_I}{\partial t}(t, z=0) = 0, \text{ for } I = f_h, w \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_I}{\partial t}(t, z=L) = 0, \text{ for } I = f_c, w \quad (13)$$

$$T_h(t, z=L) = T_{h,in}, T_c(t, z=0) = T_{c,in} \quad (14)$$

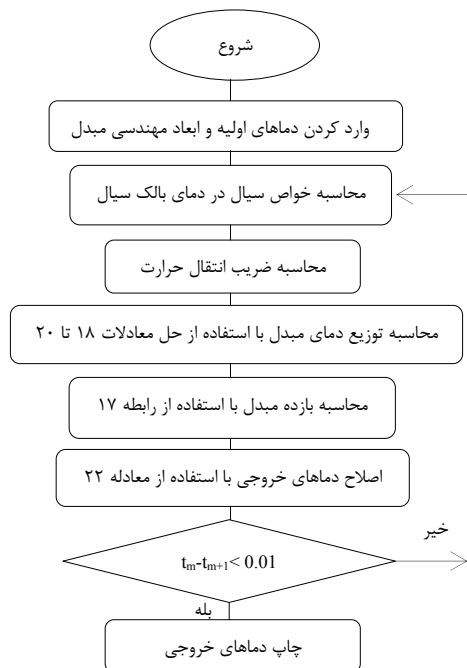
۲-۱- ضریب کلی انتقال حرارت

معمولاً ماتریس از موادی با ضریب هدایت بالا ساخته می شوند و از مقاومت هدایتی آن می توان صرف نظر کرد.

همان طور که ملاحظه می‌شود، برای محاسبه سطح انتقال حرارت نیاز به دماهای خروجی می‌باشد، که این دماها با حل معادلات ۱۸ تا ۲۰ بدست می‌آیند.

بعد از محاسبه NTU، بازده مبدل با استفاده از رابطه ۱۷ بدست می‌آید و سپس با استفاده از رابطه ۲۲ دماهای تصحیح شده خروجی حاصل می‌شود. اگر اختلاف دماهای بدست آمده در این مرحله بیشتر از ۰/۱ باشد با تصحیح دماهای خروجی سیال، دمای بالک سیال را دوباره محاسبه کرده و و معادلات ۱۸ تا ۲۰ دوباره حل می‌شود و اگر این اختلاف دمایی کمتر از ۰/۱ باشد محاسبات خاتمه می‌یابد.

$$\varepsilon_{\text{rotary}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{max}}} = \frac{c_{\text{min}}(T_{f,h,\text{in}} - T_{f-c,\text{in}})}{c_h(T_{f,h,\text{in}} - T_{f-h,\text{out}}) = c_c(T_{f-c,\text{in}} - T_{f-c,\text{out}})} \quad (22)$$



شکل ۴- فلوجارت استفاده شده برای حل مدل در ویژوال

بیسیک

۳- نتایج

برای بررسی نتایج مدل‌سازی، شرایط موجود برای هوا و مبدل در جدول ۱ با استفاده از مدل حل شده و پاسخ گذرای جریان گرم و سرد در شکل‌های ۵ و ۶ و پاسخ حالت پایا در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial T_{f,h}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{f,h}}{A_{f,h} \rho_{f,h}} \frac{\partial T_{f,h}}{\partial z} - 9 \left[\frac{C_r}{C_{\text{min}}} \right]^{1.93} \times \frac{B_w U}{A_{f,h} \rho_{f,h} c_{p,f,h}} (T_{f-h} - T_w) - \frac{\lambda_{f,h}}{\rho_{f-h} c_{p,f-h}} \frac{\partial^2 T_{f,h}}{\partial z^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{f,c}}{\partial t} = \frac{\dot{m}_{f,c}}{A_{f,c} \rho_{f,c}} \frac{\partial T_{f,c}}{\partial z} + 9 \left[\frac{C_r}{C_{\text{min}}} \right]^{1.93} \times \frac{B_w U}{A_{f,c} \rho_{f,c} c_{p,f,c}} (T_w - T_{f,c}) + \frac{\lambda_{f,c}}{\rho_{f,c} c_{p,f,c}} \frac{\partial^2 T_{f,c}}{\partial z^2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = 9 \left[\frac{C_r}{C_{\text{min}}} \right]^{1.93} \times \frac{U B_w L}{M c_{p,w}} (T_{f,h} - 2T_w - T_{f,c}) + \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{p,w}} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad (20)$$

برای بدست آوردن تابعیت دما از مکان و زمان و همچنین بازده مبدل از فلوجارت شکل ۴ استفاده می‌شود.

برای حل همزمان معادلات ۱۸ تا ۲۰، سیستم با فاصله مکانی برابر $\Delta x = 0.01$ و فاصله زمانی برابر $\Delta t = 0.001$ مش بندی شد. ابتدا دمای بالک سیال برابر متوسط دماهای ورودی سیال های گرم و سرد فرض شد و خواص سیال محاسبه شدند. سپس با حل معادلات ۱۸ تا ۲۰ به روش ضمنی، دماهای مرحله $1 \times \Delta t$ محاسبه شد. دماهای بدست آمده در این مرحله به عنوان پارامتر ورودی برای محاسبه مرحله بعد استفاده شد و دماهای همه گره های مکانی در زمان $2 \times \Delta t$ بدست آمد. محاسبات بالا تا مرحله ای که اختلاف دو دمای محاسبه شده در مراحل $n \times \Delta t$ و $(n+1) \times \Delta t$ کمتر از 10^{-6} بود، ادامه یافت. سپس دما در مرحله n به عنوان دمای پایای مبدل در نظر گرفته شد.

برای محاسبه سطح انتقال حرارت در رابطه NTU از رابطه زیر استفاده شده است [۹]:

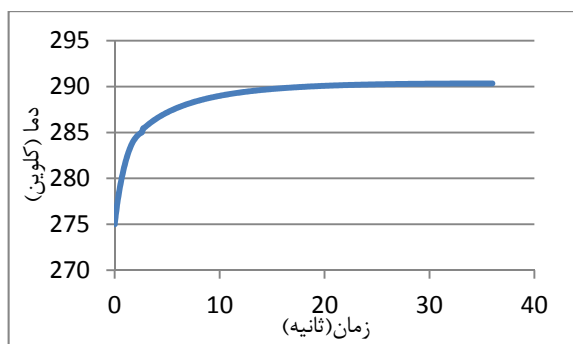
$$A = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{U \Delta T_{\text{LMTD}}} \quad (21)$$

که:

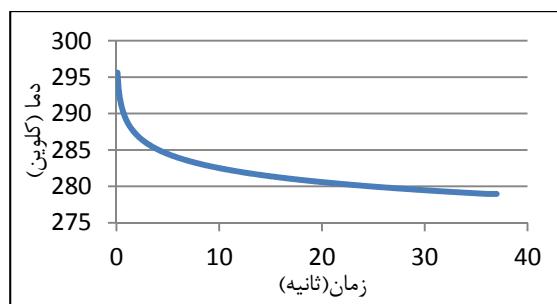
$$\Delta T_{\text{LMTD}} = \frac{\Delta T_{f-h} - \Delta T_{f-c}}{\ln \left(\frac{\Delta T_{f-h}}{\Delta T_{f-c}} \right)} \quad \text{و} \quad \Delta T = T_{f-h,\text{out}} - T_{f-h,\text{in}}$$

جدول ۱- مشخصات بازیاب حرارتی

مقدار	نماد و واحد	مشخصه
۰/۰۷۰۷	A_f	سطح مقطع انتقال حرارت، (m^2)
۰/۳	D	قطر مبدل، (m)
۰/۲۵	V_{f-h}	دبی حجمی جریان گرم، ($m^3/sec.$)
۰/۲۵	V_{f-c}	دبی حجمی جریان سرد، ($m^3/sec.$)
۲۹۶	$T_{h,in}$	دمای جریان گرم ورودی، (K)
۲۷۵	$T_{c,in}$	دمای جریان سرد ورودی، (K)
۲۰۴	K	ضریب هدایت حرارتی ماتریس، ($W/(m^2.K)$)
۸۹۶	C_p	ظرفیت حرارتی ویژه ماتریس، ($J/(Kg.K)$)
۲۰	m	جرم ماتریس، (Kg)
۰/۱	φ	فرکانس، (rpm)



شکل ۶- تغییرات دمای جریان سرد برحسب زمان در مکان خروجی مبدل



شکل ۵- تغییرات دمای جریان گرم برحسب زمان در مکان خروجی مبدل

در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب اثر افزایش سرعت چرخش ماتریس، کاهش دبی جریان گرم و کاهش جرم ماتریس بر روی پاسخ گذرا و بازده مبدل بررسی شده‌است. با مقایسه بین شکل‌های ۵ و ۸ مشخص می‌شود که دمای جریان گرم خروجی در حالت اول ($\varphi=0/1$) به $279K$ و در حالت دوم ($\varphi=0/15$) به $277K$ می‌رسد. بنابراین بازده مبدل از ۸۰ درصد در حالت اول به ۸۶ درصد در حالت دوم افزایش می‌یابد، ولی زمان رسیدن به حالت پایا افزایش پیدا می‌کند. البته این نکته را باید در نظر گرفت که با افزایش سرعت در حقیقت مصرف انرژی مبدل که برای چرخش ماتریس استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد. بنابراین باید یک مقدار بهینه سرعت برای ماتریس در نظر گرفت تا هم مصرف انرژی مبدل به حداقل برسد و هم بازده مبدل به حداکثر برسد. مقایسه نتایج

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، بعد از حدوداً ۳۶ ثانیه جریان‌های گرم و سرد به حالت پایا و مقادیر ۲۷۹ و ۲۹۱ کلون می‌رسند. در ۵ ثانیه اول تغییرات دما شدید بوده و بعد از آن دما به آهستگی کاهش می‌یابد. نتایج بدست‌آمده از یک بازیاب آزمایشگاهی [۱۴] با شرایط ورودی یکسان، نشان می‌دهد که جریان گرم به دمای نهایی ۲۷۹ و جریان سرد به دمای نهایی ۲۹۳ درجه کلون می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده عملکرد خوبی در پیش‌بینی دمای جریان‌های گرم و سرد داشته‌است.

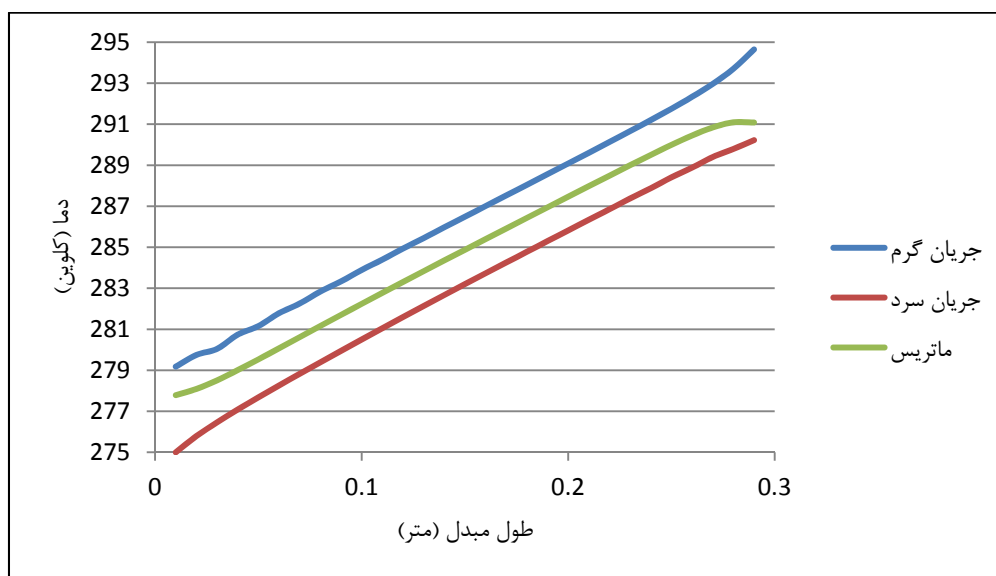
توزیع درجه حرارت پایا در طول مبدل در شکل ۷ نشان‌دهنده شده‌است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، توزیع دما در طول مبدل تقریباً به صورت خطی است.

کاهش احتمالاً به علت تغییرات ضریب انتقال حرارت با تغییرات قطر (رابطه ۱۶) می‌باشد، که در طول تغییرات قطر، این ضریب به مقدار بیشینه‌ای می‌رسد بنابراین نباید انتظار داشت که هر چه قطر مبدل افزایش پیدا کند، بازده نیز افزایش می‌یابد؛ بلکه برای قطر مبدل مانند سرعت چرخش ماتریس یک مقدار بهینه وجود دارد. در شکل ۱۲ با افزایش سرعت چرخش ماتریس، بازده افزایش می‌یابد. این افزایش تا سرعت حدوداً ۰/۲ سریع بوده، اما بعد از آن با شیب کمتری افزایش پیدا می‌کند، از یک طرف با افزایش سرعت چرخش ماتریس، بازده افزایش ولی مدت زمان رسیدن به حالت پایا و هزینه چرخش ماتریس نیز افزایش می‌یابد.

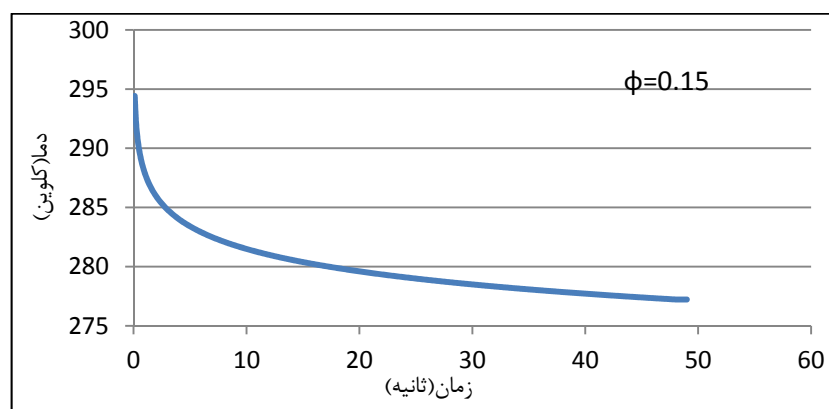
بین شکل‌های ۵ و ۹ نشان می‌دهد که با کاهش دبی جریان گرم، دمای خروجی جریان گرم کاهش می‌یابد و زمان رسیدن به حالت پایا نیز کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج شکل‌های ۵ و ۱۰ نشان می‌دهد که با کاهش جرم ماتریس دمای جریان گرم خروجی نسبت به حالت اول افزایش یافته و در نتیجه آن بازده مبدل کاهش یافته‌است، همچنین زمان رسیدن به حالت پایا کاهش پیدا کرده‌است.

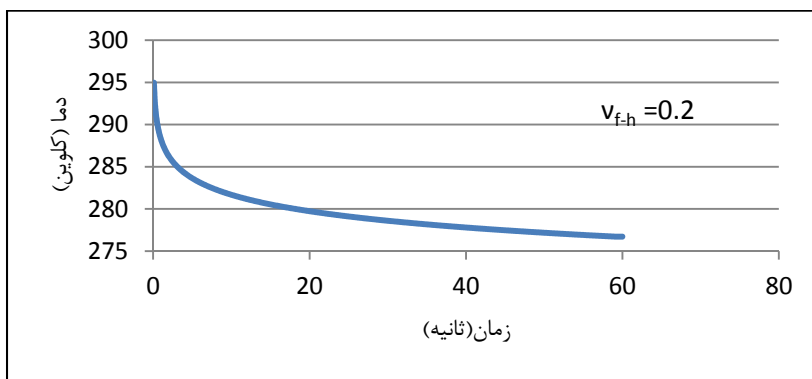
شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نحوه تغییرات بازده مبدل برحسب تغییرات قطر، طول مبدل و سرعت چرخش ماتریس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱ با افزایش قطر مبدل تا مقدار ۰/۵۲ متر، بازده افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر قطر بازده کاهش می‌یابد. این



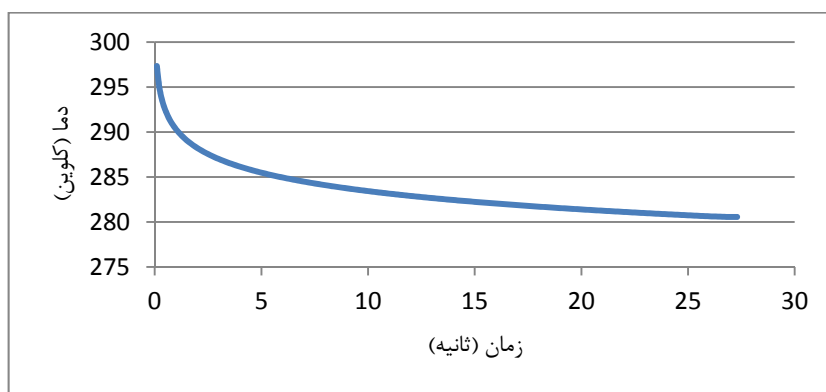
شکل ۷- توزیع دمای مبدل در حالت پایا



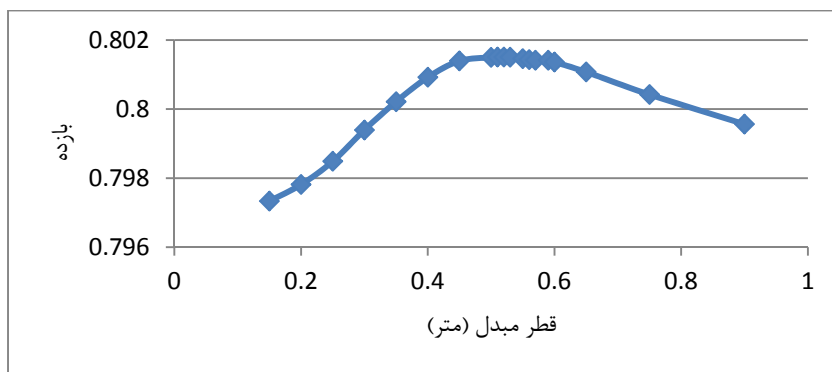
شکل ۸- اثر افزایش سرعت چرخش ماتریس بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



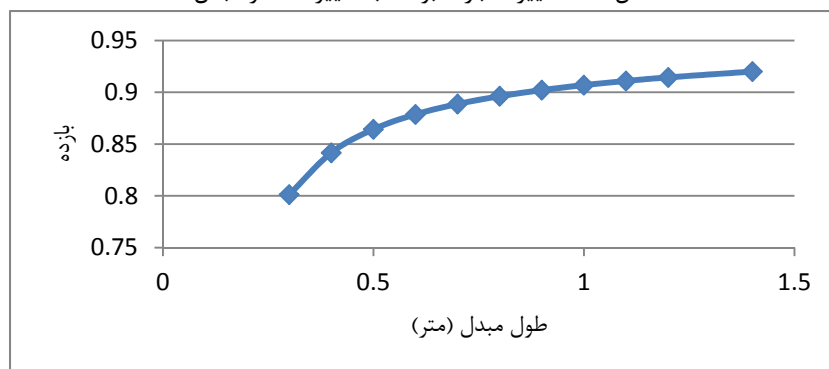
شکل ۹- اثر کاهش دبی جریان گرم بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



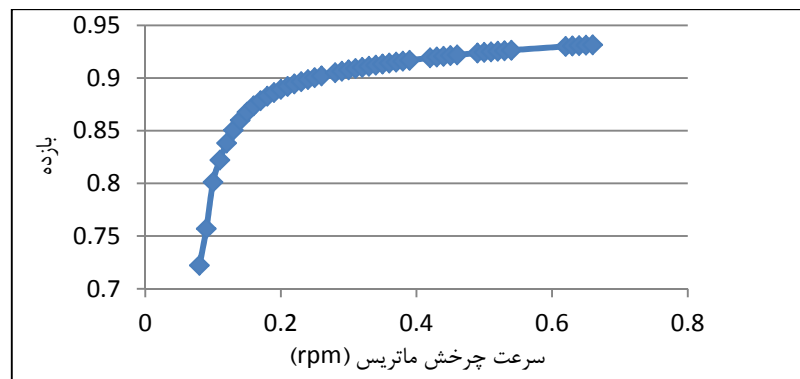
شکل ۱۰- اثر کاهش جرم ماتریس بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



شکل ۱۱- تغییرات بازده بر حسب تغییرات قطر مبدل



شکل ۱۲- تغییرات بازده بر حسب تغییرات طول مبدل



شکل ۱۳- تغییرات بازده مبدل برحسب تغییرات سرعت چرخش ماتریس

جدول فهرست علائم

علائم	فهرست علائم
A	سطح انتقال حرارت (m^2)
Aw	سطح مقطع ماتریس (m^2)
Cp	ظرفیت گرمایی ($J/Kg.C$)
E	شدت تجمع انرژی (J/s)
h	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2.C$)
KE	انرژی جنبشی (J/s)
L	طول مبدل (m)
m	نرخ جریان (Kg/s)
M	جرم ماتریس (Kg)
Nu	عدد ناسلت
NTU	تعداد واحدهای انتقال
PE	انرژی پتانسیل (J/s)
Pv	کار جریان (J/s)
q"	فلاکس انتقال حرارت ($J/m^2.s$)
Q	نرخ انتقال حرارت (J/s)
T	دما (K)
t	زمان (s)
U	ضریب انتقال حرارت کل ($W/m^2.C$)
u	انرژی درونی (J/s)
W	کار شیفیت (J/s)
ϕ	سرعت چرخش ماتریس (Rpm)
ε	بازده
λ	ضریب هدایت گرمایی ($W/m.C$)
ρ	دانسیته (Kg/m^3)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله از مدل ریاضی برای تحلیل گرمایی سیال و ماتریس استفاده شد. معادلات حاصل با استفاده از روش ضمنی در نرم افزار ویژوال بیسیک حل شد. با حل این معادلات توزیع دمای پایا در طول مبدل برای جریان‌های گرم و سرد و ماتریس و توزیع دمای حالت گذرا به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ماتریس بازده مبدل افزایش می‌یابد ولی زمان رسیدن به حالت پایا نیز افزایش می‌یابد. با افزایش طول مبدل و جرم، ماتریس بازده مبدل افزایش یافت در حالی که با افزایش قطر مبدل، ابتدا بازده افزایش و سپس کاهش یافت.

مراجع

- [1] Dincer, I., Rosen, M. (2010). "Thermal Energy Storage: Systems and Applications". USA, John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Zhang, L.Z. (2008). "Total Heat Recovery: Heat and Moisture Recovery from Ventilation Air". USA, Nova Science Publishers.
- [3] Shah, R.K., Sekulić, D.P. (2003). "Fundamentals of Heat Exchanger Design". USA, John Wiley & Sons Ltd.

- [4] Sanaye, S., Hajabdollahi, H. (2009). "Multi-objective optimization of rotary regenerator using genetic algorithm". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 10, pp. 1967–1977.
- [5] Sanaye, S., Jafari, S., Ghaebi, H. (2008). "Optimum operational conditions of a rotary regenerator using genetic algorithm". *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 9, pp. 1637–1642.
- [6] Mioralli, P.C., Ganzarolli, M.M. (2013). "Thermal analysis of a rotary regenerator with fixed pressure drop or fixed pumping power". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52, pp. 187-197.
- [7] Sphaier, L.A., Worek, W.M. (2009). "Parametric analysis of heat and mass transfer regenerators using a generalized effectiveness-NTU method". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2265-2272.
- [8] Büyükalaca, O., Yılmaz, T. (2002). "Influence of rotational speed on effectiveness of rotary type heat exchanger". *Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 441–447.
- [9] London, A.L., Biancardi, F.R., Mitchell, J.W. (1959). "The transient response of gas turbine-plant heat exchangers-regenerators". *Intercoolers, pre coolers, and ducting, Engineering for Power*, Vol. 81, pp. 433–448.
- [10] Kays, W.M., London, A.L. (1984). "Compact Heat Exchangers". USA, Krieger Publishing Company.
- [11] Kreith, F., Bohn, M.S. (1997). "Principles of Heat Transfer". USA, PWS Publishing Company.
- [12] Slayzak, S.J., Ryan, J.P. (2000). "Desiccant Dehumidification Wheel Test Guide". National Renewable Energy Laboratory.
- [13] Shah, R.K., Skiepko, T. (1999). "Influence of leakage distribution on the thermal Performance of a rotary regenerator". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, pp. 685–705.
- [14] Shah, N., Sddrdmeli, M. (2003). "Experimental and sensitivity analysis of a rotary air preheater for the flue gas heat recovery". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 571–580.