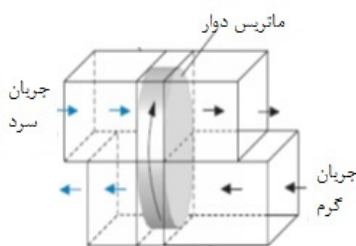


مدل سازی بازیاب‌های حرارتی دوار

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



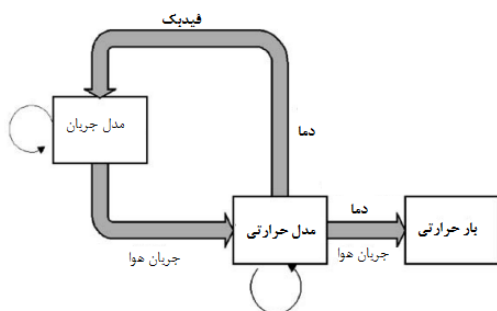
شکل ۱- بازیاب گرمایی دوار

مبدل‌های گرمایی 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 تربیت مدرس
۳. 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 فرایند 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

که در این معادله $\dot{Q} = [\dot{m} \cdot (e + Pv)] = [\dot{m} \cdot (KE + PE + PE + Pv)]$ کل انرژی سیال به ازای واحد جرم می باشد. u انرژی درونی، KE انرژی جنبشی، PE انرژی پتانسیل و Pv کار جریان می باشد. \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 می باشد [۵].

برای ساده تر شدن محاسبات، ماتریس استوانه ای شکل ۳- الف به صورت مکعب مستطیل شکل ۳-ب تقریب زده شده است. با نوشتن معادله ۱ برای سیال گرم و سرد و ماتریس، معادلات زیر حاصل می شود:

(۲)

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

(۳)

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

(۴)

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

که در این روابط:

(۵)

$$\dot{Q} = \dot{m}h = \dot{m}c_p \Delta T$$

(۶)

$$(7) \frac{dE}{dt} = M\dot{h} = Mc_p \frac{dT}{dt}$$

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

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 می شوند و با استفاده از معادلات بقای انرژی مدل ریاضی بدست می آید.

تغییرات دمایی جریان هوا و ماتریس می تواند 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 می شود.
- ۳- سیال در سرعت پایین و در فشار ثابت است، لذا می توان گفت آنتالپی سیال تنها تابع دما است.
- ۴- هیچ گونه کاری در ماتریس انجام نمی شود.
- ۵- ضریب جابجایی انتقال حرارت در سرتاسر ماتریس ثابت فرض می شود.
- ۶- دبی جرمی سیال ثابت است.
- ۷- از هدایت گرمایی در جهت عمود بر حرکت سیال صرف نظر می شود. در حالی که هدایت گرمایی در جهت سیال در نظر گرفته می شود.
- 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 می شود [۴].

بر مبنای این فرضیات ساده کننده با نوشتن بیلان انرژی برای جزء المان dz از ماتریس می توان معادلات دیفرانسیل دمای سیالات گرم و سرد و ماتریس را به دست آورد. با حل این معادلات توزیع دما بر حسب مکان و زمان $T=T(z,t)$ حاصل می شود. از زیر نویس $f-h$ برای سیال گرم که از محیط اتاق به سمت مبدل می آید و از زیر نویس $f-c$ برای سیال سردی که از مبدل به طرف اتاق می رود، استفاده می شود. همچنین از زیر نویس w برای ماتریس استفاده می شود.

بیلان انرژی بصورت زیر است:

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

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_c} و h_{f_h} را بدست آورد [۷].

(۱۶)

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]:

(۱۷)

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. $C_r = M_w C_{pw} \Phi$ نیز ظرفیت حرارتی ماتریس است. عبارت $[1 - \frac{1}{9[\frac{C_r}{C_{min}}]^{1.93}}]$ تصحیح کننده بازده به علت چرخش ماتریس است.

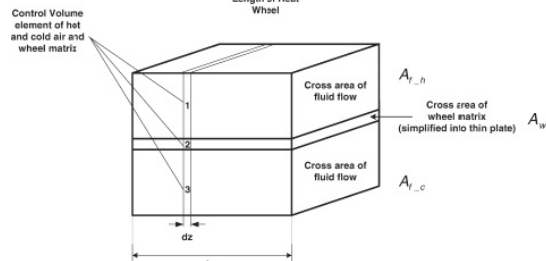
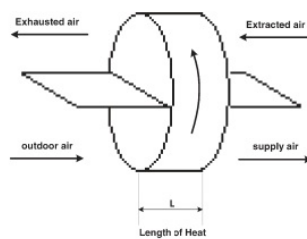
در مبدل با سرعت چرخش Φ انتقال حرارت بصورت متناوب انجام می شود و با تغییر Φ مقدار انتقال حرارت نیز تغییر می کند. برای در نظر گرفتن اثر سرعت چرخش ماتریس بر روی معادلات حاکم بر مبدل، انرژی منتقل شده از ماتریس به سیال را در ضریب $9[\frac{C_r}{C_{min}}]^{1.93}$ ضرب می کنیم. در نتیجه معادلات بصورت زیر در می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

(۱۸)

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

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

(۲۰)



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:

(۸)

(۹)

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{UB_w L}{M c_{p,w}} (T_{f_h} - 2T_w - T_{f_c}) + \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{p,w}} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad (10)$$

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:

$$T_{I|t=0} = T_{I,0}, \text{ for } I = f_{h,c,w} \quad (11)$$

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

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

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

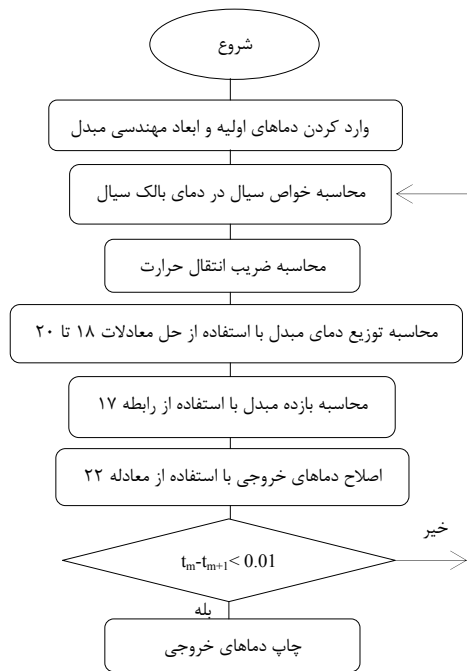
۲-۱- ضریب کلی انتقال حرارت

معمولاً ماتریس از موادی با ضریب هدایت بالا ساخته می شوند و از مقاومت هدایتی آن می توان صرف نظر کرد. لذا ضریب کلی انتقال حرارت با رابطه زیر بیان می شود:

[۶]

(۱۵)

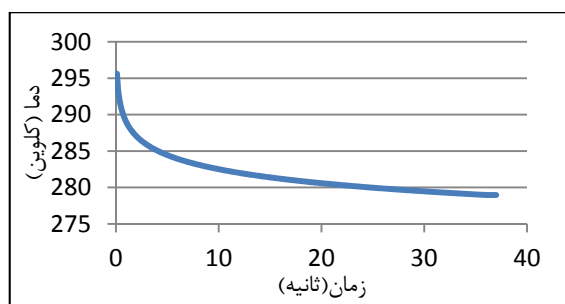
که در آن h_{f_h} ضریب جابجایی سیال گرم و h_{f_c} ضریب جابجایی سیال سرد می باشد.



شکل ۴- فلوچارت استفاده شده برای حل مدل در ویژوال بیسیک

۳- نتایج

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



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

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = 9 \left[\frac{C_r}{C_{\min}} \right]^{1.93} \times \frac{UB_{wL}}{Mc_{p,w}} (T_{fh} - 2T_w - T_{fc}) + \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{p,w}} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2}$$

برای بدست آوردن تابعیت دما از مکان و زمان و همچنین بازده مبدل از فلوچارت شکل ۴ استفاده می شود.

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]:

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

که:

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

همان طور که ملاحظه می شود، برای محاسبه سطح انتقال حرارت نیاز به دماهای خروجی می باشد، که این دماها با حل معادلات ۱۸ تا ۲۰ بدست می آیند.

بعد از محاسبه NTU ، بازده مبدل با استفاده از رابطه ۱۷ بدست می آید و سپس با استفاده از رابطه ۲۲ دماهای تصحیح شده خروجی حاصل می شود. اگر اختلاف دماهای بدست آمده در این مرحله بیشتر از 0.1 باشد با تصحیح دماهای خروجی سیال، دمای بالک سیال را دوباره محاسبه کرده و معادلات ۱۸ تا ۲۰ دوباره حل می شود و اگر این اختلاف دمایی کمتر از 0.1 باشد محاسبات خاتمه می یابد.

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

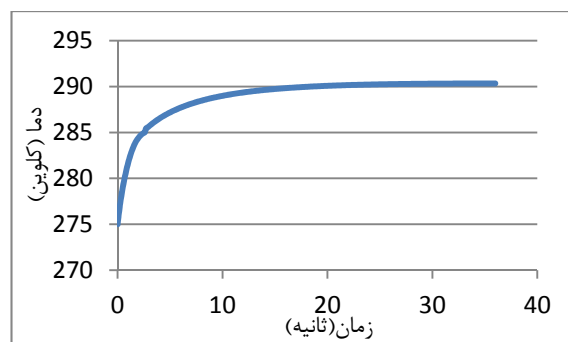
افزایش می یابد. بنابراین باید یک مقدار بهینه سرعت برای ماتریس در نظر گرفت تا هم مصرف انرژی مبدل به حداقل برسد و هم بازده مبدل به حداکثر برسد. مقایسه نتایج بین شکل های ۵ و ۹ نشان می دهد که با کاهش دبی جریان گرم، دمای خروجی جریان گرم کاهش می یابد و زمان رسیدن به حالت پایا نیز کاهش می یابد.

مقایسه نتایج شکل های ۵ و ۱۰ نشان می دهد که با کاهش جرم ماتریس دمای جریان گرم خروجی نسبت به حالت اول افزایش یافته و در نتیجه آن بازده مبدل کاهش یافته است، همچنین زمان رسیدن به حالت پایا کاهش پیدا کرده است.

شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نحوه تغییرات بازده مبدل بر حسب تغییرات قطر، طول مبدل و سرعت چرخش ماتریس را نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۱ با افزایش قطر مبدل تا مقدار ۰/۵۲ متر، بازده افزایش می یابد. اما با افزایش بیشتر قطر بازده کاهش می یابد. این کاهش احتمالاً به علت تغییرات ضریب انتقال حرارت با تغییرات قطر (رابطه ۱۶) می باشد، که در طول تغییرات قطر، این ضریب به مقدار بیشینه ای می رسد بنابراین نباید انتظار داشت که هر چه قطر مبدل افزایش پیدا کند، بازده نیز افزایش می یابد؛ بلکه برای قطر مبدل مانند سرعت چرخش ماتریس یک مقدار بهینه وجود دارد. در شکل ۱۲ با افزایش سرعت چرخش ماتریس، بازده افزایش می یابد. این افزایش تا سرعت حدوداً ۰/۲ سریع بوده، اما بعد از آن با شیب کمتری افزایش پیدا می کند، از یک طرف با افزایش سرعت چرخش ماتریس، بازده افزایش ولی مدت زمان رسیدن به حالت پایا و هزینه چرخش ماتریس نیز افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله از مدل ریاضی برای تحلیل گرمایی سیال و ماتریس استفاده شد. معادلات حاصل با استفاده از روش



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

همان طور که در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود، بعد از حدوداً ۳۶ ثانیه جریان های گرم و سرد به حالت پایا و مقادیر ۲۷۹ و ۲۹۱ کلوین می رسند. در ۵ ثانیه اول تغییرات دما شدید بوده و بعد از آن دما به آهستگی کاهش می یابد. نتایج بدست آمده از یک بازیاب آزمایشگاهی [۱۴] با شرایط ورودی یکسان، نشان می دهد که جریان گرم به دمای نهایی ۲۷۹ و جریان سرد به دمای نهایی ۲۹۳ درجه کلوین می رسد. این نتایج نشان می دهد که مدل ارائه شده عملکرد خوبی در پیش بینی دمای جریان های گرم و سرد داشته است.

توزیع درجه حرارت پایا در طول مبدل در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۷ مشخص است، توزیع دما در طول مبدل تقریباً به صورت خطی است.

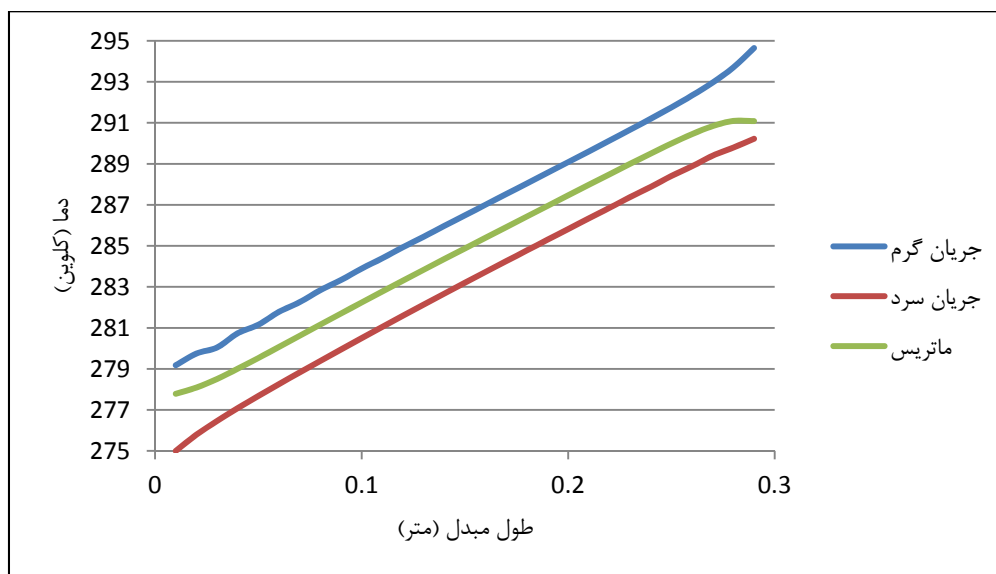
در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب اثر افزایش سرعت چرخش ماتریس، کاهش دبی جریان گرم و کاهش جرم ماتریس بر روی پاسخ گذرا و بازده مبدل بررسی شده است. با مقایسه بین شکل های ۵ و ۸ مشخص می شود که دمای جریان گرم خروجی در حالت اول ($\phi=0/1$) به ۲۷۹K و در حالت دوم ($\phi=0/15$) به ۲۷۷K می رسد. بنابراین بازده مبدل از ۸۰ درصد در حالت اول به ۸۶ درصد در حالت دوم افزایش می یابد، ولی زمان رسیدن به حالت پایا افزایش پیدا می کند. البته این نکته را باید در نظر گرفت که با افزایش سرعت در حقیقت مصرف انرژی مبدل که برای چرخش ماتریس استفاده می شود،

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.

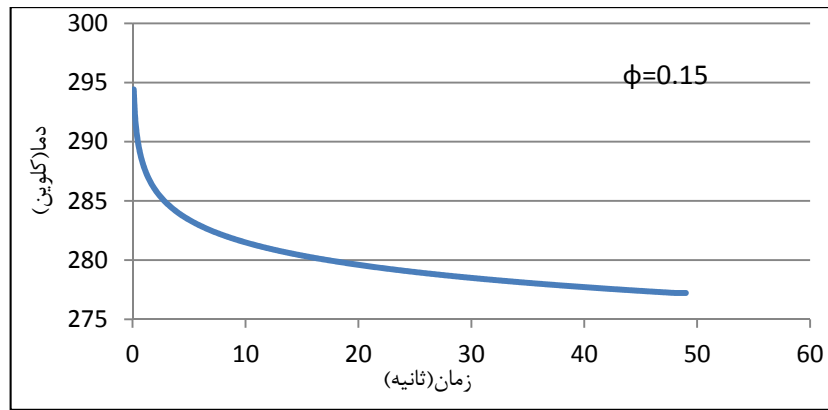
ضمنی در نرم‌افزار ویژوال بیسیک حل شد. با حل این معادلات توزیع دمای پایا در طول مبدل برای جریان‌های گرم و سرد و ماتریس و توزیع دمای حالت گذرا به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخش ماتریس

جدول ۱- مشخصات بازیاب حرارتی

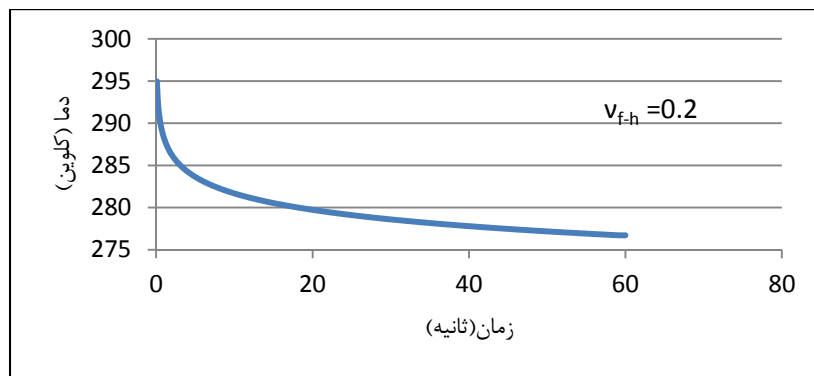
مقدار	نماد و واحد	مشخصه
۰/۰۷۰۷	A_f	سطح مقطع انتقال حرارت، (m^2)
۰/۳	D	قطر مبدل، (m)
۰/۲۵	V_{f-h}	دبی حجمی جریان گرم، ($m^3/sec.$)
۰/۲۵	V_{f-c}	دبی حجمی جریان سرد، ($m^3/sec.$)
۲۹۶	$T_{h,in}$	دمای جریان گرم ورودی، (K)
۲۷۵	$T_{c,in}$	دمای جریان سرد ورودی، (K)
۲۰۴	K	ضریب هدایت حرارتی ماتریس، ($W/(m^2.K)$)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



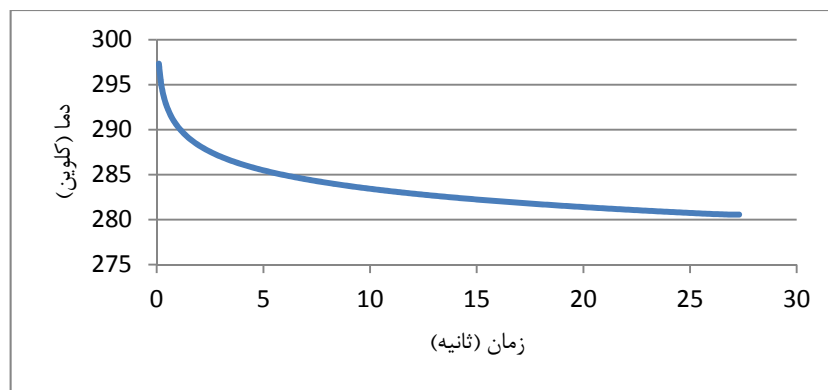
شکل ۷- توزیع دمای مبدل در حالت پایا



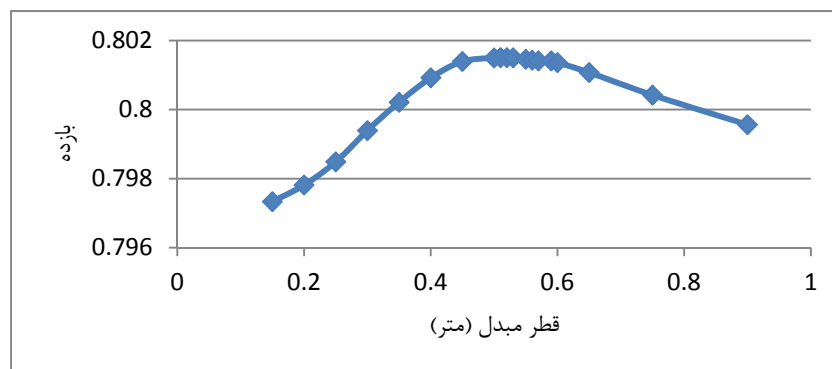
شکل ۸- اثر افزایش سرعت چرخش ماتریس بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



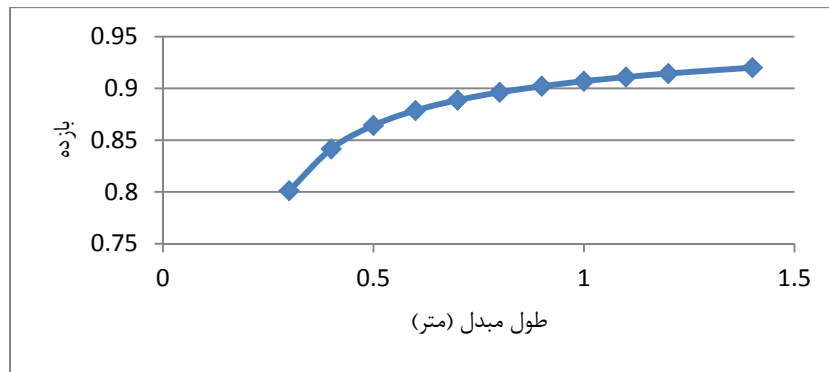
شکل ۹- اثر کاهش دبی جریان گرم بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



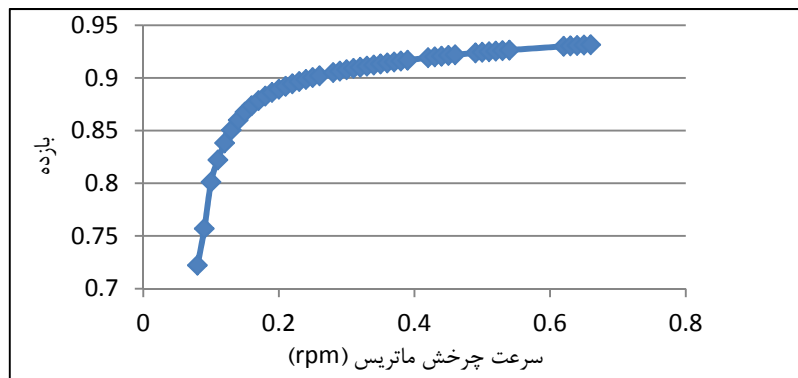
شکل ۱۰- اثر کاهش جرم ماتریس بر روی پاسخ گذرای دمای جریان گرم



شکل ۱۱- تغییرات بازده بر حسب تغییرات قطر مبدل



شکل ۱۲- تغییرات بازده برحسب تغییرات طول مبدل



شکل ۱۳- تغییرات بازده مبدل برحسب تغییرات سرعت چرخش ماتریس

جدول فهرست علائم

فهرست علائم	
A	سطح انتقال حرارت (m^2)
A _w	سطح مقطع ماتریس (m^2)
C _p	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)
P _v	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 شیفت (J/s)
φ	سرعت چرخش ماتریس (Rpm)
ε	بازده
λ	ضریب هدایت گرمایی ($W/m.C$)
ρ	دانسیته (Kg/m^3)

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., Yilmaz, 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.