

تحلیل و بهبود کاهش زمان رسیدن به حالت پایای سامانه‌های گرمایی

فرهاد طالبی^۱، سید مهدی سیدنصراله^۲ و فاطمه یوسفی لالیمی^۳
Smsnasrollah@alum.sharif.edu

چکیده

مقاله حاضر نتیجه تحقیق بر روی کاهش زمان رسیدن به حالت پایای سیستم‌های حرارتی است. به این ترتیب که شرایط مرزی با توجه به مشخصات فیزیکی سامانه تا وصول به حالت دائم تحت کنترل قرار می‌گیرد. در این پژوهش یک سامانه حرارتی آزمایشگاهی با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی شده و نتایج حل عددی با نتایج اجرای چند آزمایش تجربی مقایسه انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از دو روش اعمال شار حرارتی اولیه و اعمال تغییر سرعت اولیه می‌توان زمان رسیدن به حالت پایای سامانه‌های حرارتی را به میزان بسیار زیادی کاهش داد. این دوروش در برنامه‌ریزی آزمایش‌های تجربی و همچنین اجرای برنامه‌های محاسباتی کاربرد دارد. نتایج آزمایشگاهی حاصل از دو روش بالا در مقالات قبلی ارائه شدند، در این پژوهش با مروری کوتاه بر نتایج حاصل، تحلیل فیزیکی از رفتار مشابه سیستم‌های حرارتی ارائه شده است. همچنین با استفاده از روش‌های آماری روابط همبستگی برای زمان رسیدن به زمان بدون بعد بر حسب سرعت اولیه بدون بعد و گرمای اولیه بدون بعد ارائه شده است.

کلیدواژه:

انتقال حرارت غیر دائم - سطوح پره‌دار - کاهش زمان رسیدن به حالت دائم - بررسی تجربی - حل عددی

۱- استادیار، دانشگاه سمنان

۲- کارشناسی ارشد، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف

۱- مقدمه

سامانه های حرارتی عموماً با تغییر مداوم شرایط کارکرد از یک حالت به حالت دیگر روبرو هستند، در حالی که اغلب کارکرد حالت دائم سامانه موردنظر است. بدیهی است هرچقدر زمان رسیدن به حالت پایا کمتر باشد، عملکرد مطلوبتر است. از جمله سامانه های حرارتی که با تغییرات مداوم روبرو هستند می توان به نیروگاه های حرارتی و کوره ها اشاره کرد. تحقیقات زیادی به منظور شبیه سازی رفتار گذرای سامانه های حرارتی انجام شده است که اطلاعات کاملی در مقاله مروری ارکرت و همکاران [۱] ارائه شده است. از آن جمله به کار برخی محققین می توان اشاره کرد که از روش ظرفیت کلی اصلاح شده استفاده کرده اند [۲،۳،۴].

اما در یک بررسی کنترلی این مسئله به معنی ایجاد تغییرات مطلوب در خروجی سامانه است که از طریق تغییر ورودی ها امکان پذیر است. در صورتی که خروجی مورد نظر معلوم باشد، این کار با استفاده از مقایسه دائم این مقدار با خروجی لحظه ای سامانه و اعمال تغییرات مطلوب در ورودی ها انجام می گیرد. در صورتی که هرگاه پاسخ نهایی سامانه به ورودی های متفاوت مدنظر باشد، خروجی سامانه نامشخص است و مقایسه امکان پذیر نیست. لذا توسعه یک روش کنترل به منظور کاهش زمان رسیدن به حالت پایا نیاز به تمهیدات خاص دارد. کاربرد دیگر این موضوع در تحقیقات آزمایشگاهی است که در بررسی تاثیر پارامترهای مختلف استفاده می شود. در این تحقیق جابجایی اجباری روی یک سطح حرارتی پره دار^۱ به عنوان سامانه حرارتی بررسی شده است. شرایط مرزی این سامانه به عنوان ورودی های سامانه قابل تغییر است. این شرایط عبارتند از: الف) شار گرمایی در سطح پایه پره و ب) سرعت جریان هوا. نتایج حالت الف) در مقاله طالبی و سید نصراله [۵] و نتایج حالت ب) در مقاله سید نصراله و همکاران [۶] ارائه شده است. نکته مشترک قابل مشاهده در دو مورد این است که با انتخاب پارامترهای بدون بعد مناسب می توان کلیه حالات تحت آزمایش را با انطباق خوبی توسط یک رابطه مدلسازی نمود. در مقاله حاضر با مقایسه این دو روش اولاً تحلیل فیزیکی از نحوه دستیابی به کمترین زمان لازم برای ایجاد شرایط پایا ارائه شده است. در مرحله بعد با استفاده از روش های آماری روابط همبستگی برای زمان بدون بعد بر حسب سرعت اولیه بدون بعد و یک گرمای اولیه اعمال شده بدون بعد ارائه شده است.

۲- تئوری و روش حل

در شکل (۱) هندسه مسئله به طور کامل نشان داده شده است. با توجه به ضخامت کم پره ها از تغییرات دما در امتداد ضخامت صرف نظر می شود. بنابراین معادله انرژی به فرم شبه دو بعدی و غیر دائم چنین است:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + dq_{conv} + c_p \frac{\partial T}{\partial t} dm = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه:

$$q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$q_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

$$A_x = Hdz \quad (4)$$

$$A_z = \left(H + \frac{dH}{2}\right) dx \quad (5)$$

$$H = H_1 + \frac{H_2 - H_1}{L} x \quad (6)$$

$$dm = \rho \left(H + \frac{dH}{2}\right) dx dz \quad (7)$$

$$dq_{conv} = h(T - T_\infty) dA_s \quad (8)$$

$$dA_s = 2ds dz \quad (9)$$

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + \left(\frac{dH}{2}\right)^2} \quad (10)$$

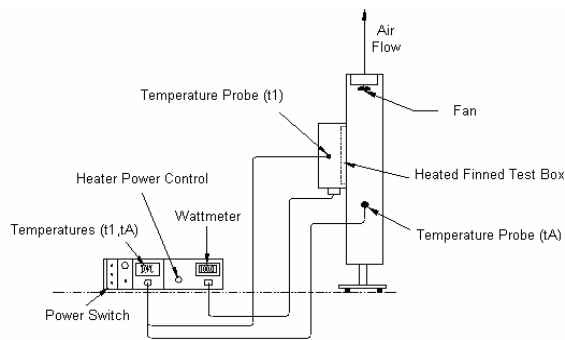
و h ضریب جابجایی است که متغیر است و از روابط همبستگی بدست می آید.

همان گونه که در شکل (۱) نیز پیداست، شرایط مرزی و اولیه را می توان به صورت زیر توضیح داد:

۱. اعمال شار گرمایی مشخص از پایه پره
۲. جریان یکنواخت هوا با سرعت مشخص در راستای طولی پره
۳. توزیع دمایی یکنواخت در بدنه پره در حالت زمان صفر

۳- شرح سامانه و روش آزمایش

مطابق شکل‌های (۲) و (۳) سامانه حرارتی شامل یک صفحه پره دار است که روی دیواره کانال نصب شده است و توسط یک المنت الکتریکی در پای پره حرارت داده می‌شود و شرایط نزدیک به شار حرارتی ثابت در آن ایجاد می‌شود. توان الکتریکی قابل تغییر است و مقدار آن روی صفحه نمایش ثبت می‌شود. همچنین سرعت هوا در کانال توسط یک فن با دور متغیر کنترل می‌شود و مقدار آن توسط یک سرعت سنج سیم داغ (Hot Wire Anemometer) اندازه‌گیری می‌شود. همچنین دمای هوا و دمای پای پره توسط ترموکوپل قابل اندازه‌گیری و ثبت است.

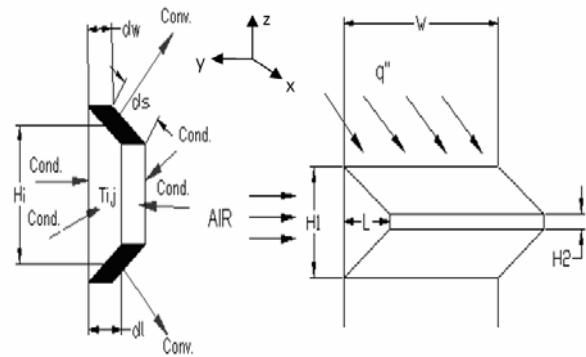


شکل (۲): اجزای مختلف سامانه

۴- اجزاء سامانه آزمایش

مطابق شکل‌های (۲) و (۳)، سامانه از اجزاء زیر تشکیل شده است:

- مجرای مربعی عمود عبور هوا (۱)
- فن با سوئیچ کنترل سرعت (دور) (۲)
- صفحه تخت که توسط المان‌های الکتریکی گرم می‌شود (۳)
- سرعت سنج قابل حمل و حس گر مربوطه (Anemometer) (۴)
- صفحه پره دار مستطیلی (Finned Plate) که توسط المان‌های الکتریکی گرم می‌شود (۵)
- سیم اتصال ترموکوپل (۶،۷)
- سوئیچ کنترل گرمکن (۸)
- حسگر دما با سیم اتصال مربوطه (۹،۱۰)



شکل (۱): شمای هندسه و شرایط مرزی

با توجه به موارد فوق هر یک از المان‌های شبکه را می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلف شرایط مرزی قرار داد که به عنوان نمونه وضعیت یکی از المان‌های داخلی در شکل (۱) نشان داده شده است. طبق شکل (۱) این المان داخلی از چهار سمت در برابر جریان گرمایی ناشی از رسانایی المان‌های مجاور و از دو سمت بالا و پایین در برابر جریان گرمایی ناشی از جابجایی اجباری جریان هوا قرار دارد.

بر اساس حداکثر سرعت جریان آزاد که برابر ۲/۵ متر بر ثانیه است، $Re_{D,max}=2304$ بدست می‌آید و لذا جریان آرام است. اما با محاسبه طول ورودی مشخص می‌شود که سامانه به لحاظ حرارتی و هیدرودینامیکی در دهانه ورودی قرار دارد. مقادیر Nu_x برحسب طول بدون بعد x^+ و عدد پراندل در مرجع [۴] داده شده است. به دلیل کاربرد مکرر این مقادیر در برنامه کامپیوتری از برازش منحنی بر داده‌های جدول مطابق رابطه (۱۱) استفاده شده است.

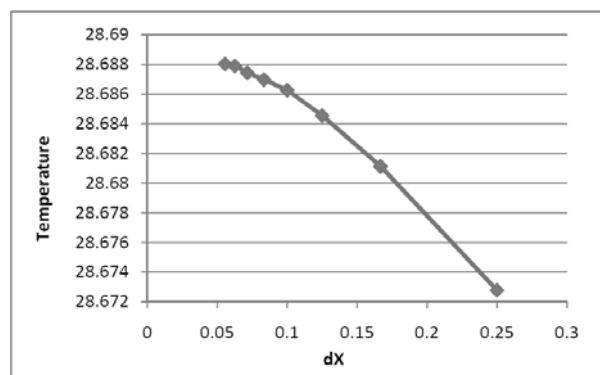
$$Nu_x = 2.1 + 0.47(x^+)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

که در آن:

$$x^+ = \frac{2x/D_h}{Re_D Pr} \quad (12)$$

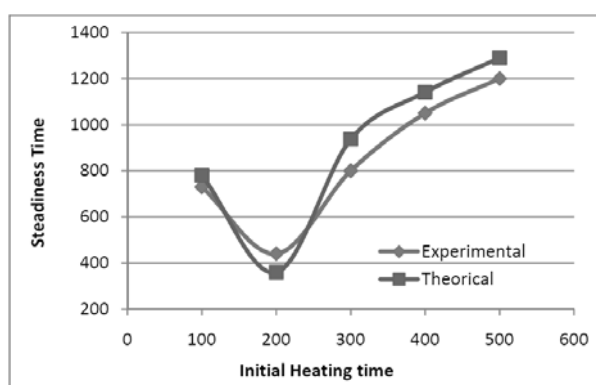
$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k} \quad (13)$$

معادله فوق به روش صریح و حجم کنترلی جداسازی و حل عددی شده است. بر اساس شبکه بندی دوبعدی ۹ دسته المان متفاوت ایجاد شده است که جزئیات کامل معادلات جداسازی در مرجع [۵] آمده است.

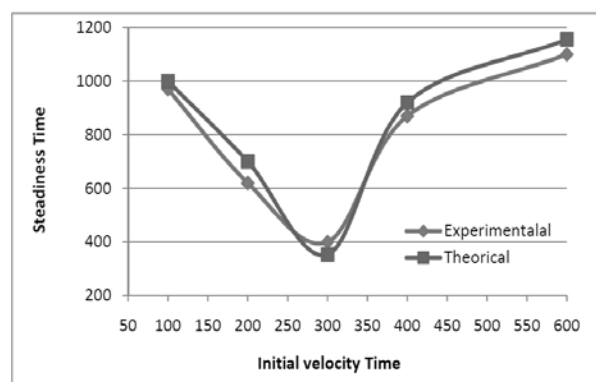


شکل (۴): تغییرات دمای نوک پره برحسب اندازه شبکه

در شکل های (۵) و (۶) مدت زمان رسیدن به حالت دائم حاصل از حل عددی با مقادیر آزمایش مقایسه شده است. در این حالت سرعت متوسط هوا در کانال ۲ متر برثانیه، شار گرمایی ۵۰ وات، گرمای اولیه اعمال شده برابر ۹۰ وات و سرعت اولیه اعمال شده برابر ۱/۵ متر برثانیه است.

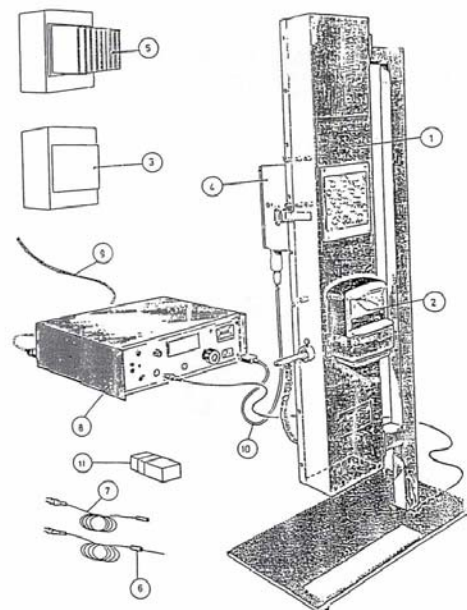


شکل (۵): مقایسه نتایج آزمایش و تئوری - روش گرمای اولیه



شکل (۶): مقایسه نتایج آزمایش و تئوری - روش سرعت اولیه

همانطور که مقادیر تجربی و تئوری نشان می دهد یک زمان بهینه اعمال سرعت (یا گرما) اولیه وجود دارد. به عبارت دیگر با کنترل



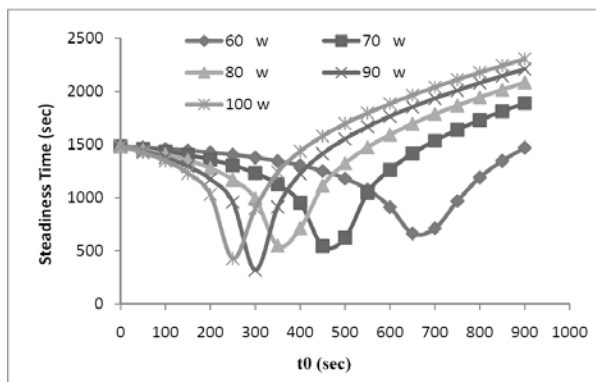
شکل (۳): نمای کلی سامانه

هر آزمایش برای سرعت هوا و توان گرمایی ورودی معین انجام شده است. در این تحقیق برای افزایش سرعت رسیدن به حالت پایا ابتدا در روش گرمای اولیه، یک شار گرمایی اولیه (بیشتر از مقدار مورد نظر)، و در روش سرعت اولیه، یک سرعت اولیه برای جریان هوا (کمتر از مقدار مورد نظر) برای مدت مشخصی اعمال می شود. سپس با بازگشت سرعت جریان به مقدار مورد نظر تغییرات مدت زمان رسیدن به حالت پایا را بررسی شده است. عموماً در صورتی که تغییر دمای پای پره کمتر از ۰/۱ درجه در دقیقه باشد، وضعیت پایا در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج عددی و تجربی

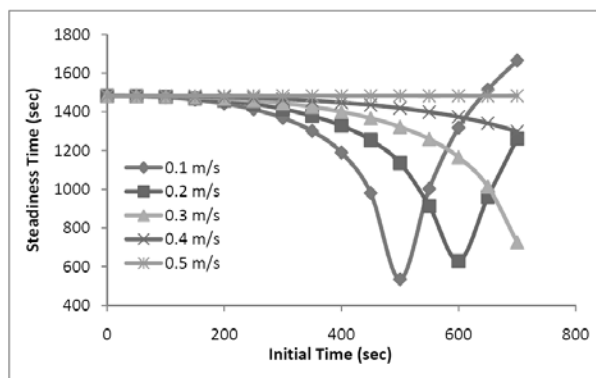
در شکل (۴) اثر اندازه شبکه توسط نمودار تغییرات دمای نوک پره نشان داده شده است. همان گونه که در نمودار پیداست با کاهش اندازه شبکه تا میزان ۰/۰۵ میلی متر مقدار دمای تئوریک نقطه نوک پره تقریباً ثابت می ماند و با کاهش اندازه شبکه به کمتر از ۰/۰۵ میلی متر می توان ثبات مقادیر تئوریک را مشاهده نمود، بنابراین می توان گفت با انتخاب این مقدار حل مساله مستقل از شبکه فرض خواهد شد که اندازه مناسب انتخاب شده و در بررسی های بعدی بکار رفته است.

در شکل (۷) نتایج حل عددی برای توان اولیه متفاوت ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ وات نشان داده شده است. در این حالت سرعت متوسط هوا در کانال ۰/۵ متر در ثانیه و توان گرمایی مورد نظر ۵۰ وات است. هرچه توان اولیه بیشتر باشد، حداقل زمان رسیدن به حالت دائم کاهش می یابد. از طرفی حساسیت سیستم کنترل بیشتر می شود. این مسئله در کاهش پهنای باند منحنی ها حول و حوش زمان بهینه دیده می شود.



شکل (۷): تغییرات زمان حالت دائم در حالت های مختلف

در شکل (۸) نتایج حل عددی برای سرعت اولیه ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در این حالت سرعت متوسط هوا در کانال ۰/۵ متر بر ثانیه و شار گرمایی ۵۰ وات است. هرچه سرعت اولیه کمتر باشد، حداقل زمان رسیدن به حالت دائم کاهش می یابد. از طرفی حساسیت سیستم کنترل بیشتر می شود. این مسئله در کاهش پهنای باند منحنی ها حول و حوش زمان بهینه دیده می شود.



شکل (۸): تغییرات زمان حالت دائم در حالت های مختلف - روش سرعت اولیه

در شکل (۹) مقایسه حداقل زمان رسیدن به حالت دائم و زمان اعمال توان اولیه برای توان های ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ وات نشان

مناسب پارامترهای ورودی می توان زمان رسیدن به شرایط دائم را تا حد زیادی کاهش داد.

۶- بررسی میزان خطا

همانگونه که در شکل های (۵) و (۶) دیده شد، نتایج به دست آمده از تئوری با نتایج تجربی تا حدی اختلاف دارد. جدول (۱) نشان دهنده خطای بین نتایج تجربی- تئوری مربوط به روش گرمای اولیه می باشد.

جدول (۱): خطای بین نتایج تجربی- تئوری در روش گرمای اولیه

خطای نسبی	زمان پایداری تئوری	زمان پایداری تجربی	زمان اعمال
٪۶/۵۳	۷۸۱	۷۳۰	۱۰۰
٪۱۱/۲۳	۳۵۹/۶	۴۰۰	۲۰۰
٪۹/۲۹	۹۳۷/۱	۸۵۰	۳۰۰
٪۷/۹۸	۱۱۴۱	۱۰۵۰	۴۰۰
۶/۹۸	۱۲۹۰	۱۲۰۰	۵۰۰
٪۸/۴	خطای نسبی میانگین		

جدول (۲) نیز نشان دهنده خطای بین نتایج تجربی- تئوری مربوط به روش سرعت اولیه می باشد.

جدول (۲): خطای بین نتایج تجربی- تئوری در روش سرعت اولیه

خطای نسبی	زمان پایداری تئوری	زمان پایداری تجربی	زمان اعمال
٪۸/۸۸	۸۴۵	۹۲۰	۱۰۰
٪۱۲/۴۲	۷۶۵	۶۷۰	۲۰۰
٪۹/۳۸	۳۳۴	۳۶۵	۳۰۰
٪۷/۹۴	۹۴۵	۸۷۰	۴۰۰
٪۱۰/۱۸	۱۳۳۶	۱۲۰۰	۶۰۰
٪۹/۷۴	خطای نسبی میانگین		

همانگونه که در جدول های (۱) و (۲) دیده می شود خطای نسبی در روش سرعت اولیه بیشتر به نظر می رسد که البته، اختلاف مقادیر تجربی و تئوری به خصوص با افزایش زمان اعمال گرما و یا سرعت اولیه مشاهده می شود و می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

۱- تلفات گرمایی سامانه به محیط در آزمایش
۲- عدم وجود گرمای اولیه سامانه در آزمایش های اول (در حالت های ۱۰۰ و ۲۰۰ ثانیه) و وجود گرمای اولیه در آزمایش های بعدی

۳- خطای تجهیزات اندازه گیری

در عین حال تطابق کلی در روند تغییرات مقادیر تجربی و تئوریک دیده می شود.

در واقع در هر یک از روش های مورد نظر هدف آن است که سطح انرژی سامانه به سطح انرژی حالت پایا برسد، یعنی برای روش گرمای اولیه خواهیم داشت:

$$E_{steady} = E_{initial} + E_{forced-heated} \quad (15)$$

و همین طور در روش سرعت اولیه:

$$E_{steady} = E_{initial} + E_{forced-velocity} \quad (16)$$

به عبارت کلی می توان نوشت:

$$E_{natural} = E_{forced-heated} = E_{forced-velocity} = \Delta E \quad (17)$$

که در آن:

$$\Delta E = E_{steady} - E_{initial} \quad (18)$$

هر قدر زمان انتقال سطح انرژی کمتر باشد، روش کارایی بیشتری دارد، یعنی برای روش گرمای اولیه خواهیم داشت:

$$Time_{natural} > Time_{forced-heated} \quad (19)$$

و همین طور در روش سرعت اولیه:

$$Time_{natural} > Time_{forced-velocity} \quad (20)$$

علاوه بر مطابق شکل (۷) همان طور که اختلاف گرمای اولیه با گرمای حالت پایا بیشتر می شود، زمان رسیدن به حالت پایا کاهش می یابد که روند نزولی نمودار حاکی این مطلب است.

همین پدیده نیز در روش سرعت اولیه مشاهده می گردد، یعنی با افزایش سرعت اولیه و کاهش اختلاف آن با سرعت حالت پایا، زمان رسیدن به حالت پایا افزایش می یابد که در این حالت این پدیده در روند صعودی نمودار پدیدار می گردد.

پاسخ سامانه در حالت های مختلف با تعریف سه پارامتر بدون بعد در یک نمودار نشان داده شده است. این دو پارامتر عبارتند از:

- زمان بدون بعد θ^* : نسبت زمان رسیدن به حالت دائم در بهترین وضعیت (کمترین زمان) به زمان حالت پایا بدون کنترل خاص.

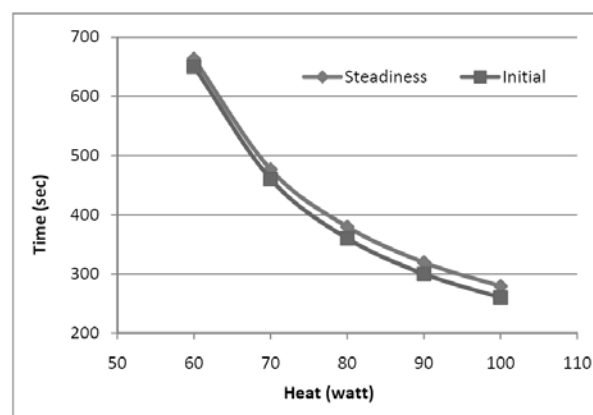
- شار گرمایی اولیه بدون بعد w^* : نسبت شار اولیه اعمال شده به شار گرمایی مورد نظر حالت پایا

- سرعت اولیه بدون بعد v^* : نسبت سرعت اولیه اعمال شده به سرعت مورد نظر. حالت پایا

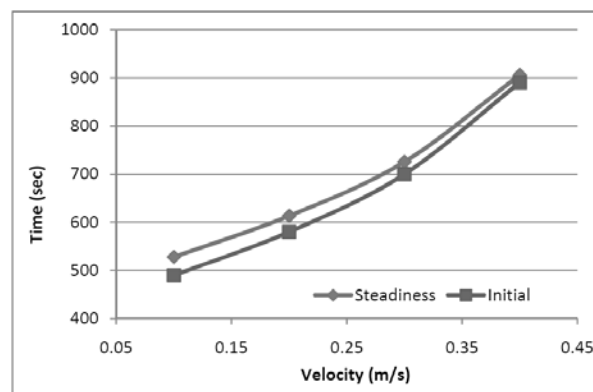
شکل های (۱۱) و (۱۲) زمان بدون بعد را به ترتیب برحسب گرما و سرعت اولیه بدون بعد در حالت های مختلف نشان می دهد. انطباق منحنی ها بر هم نشانگر آن است که پاسخ زمانی سامانه اساساً تابع مشخصات سامانه و محیط پیرامون آن است و از آنجا که انتقال حرارت به صورت جابجایی اجباری است، رفتار حرارتی به مقدار پارامتر اولیه اعمال شده بستگی ندارد و در شرایط مختلف یکسان است.

داده شده است. در شکل (۱۰) نیز مقایسه حداقل زمان رسیدن به حالت دائم و زمان اعمال سرعت اولیه برای سرعت اولیه ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ متربرثانیه نشان داده شده است. چیزی که در هر دو نمودار پیداست، اینکه در حالت بهینه تفاوت زیادی بین زمای اعمال اولیه و زمان رسیدن به حالت پایا وجود ندارد. به عبارت دیگر در مدت کوتاهی پس از ایجاد حالت مورد نظر شرایط دائم حاصل می شود.

علاوه بر این، تأثیر میزان سرعت اولیه (و یا گرمای اولیه) بر کاهش زمان حالت دائم با افزایش سرعت اولیه به تدریج کاهش می یابد و با توجه به روند نمودارها یک حداقل زمان رسیدن به حالت دائم به صورت خط مجانب وجود دارد که این مقدار برای روش سرعت اولیه در حدود ۵۰۰ ثانیه و برای روش توان اولیه حدود ۲۵۰ ثانیه است.



شکل (۹): مقایسه زمان رسیدن به حالت دائم و زمان اعمال شار اولیه در بهترین وضعیت



شکل (۱۰): مقایسه زمان رسیدن به حالت دائم و زمان اعمال سرعت اولیه در بهترین وضعیت

اگر وضعیت سامانه از نظر سطح انرژی بررسی گردد، در حالت عادی خواهیم داشت:

$$E_{steady} = E_{initial} + E_{natural} \quad (14)$$

جریان، قطر معادل هیدرولیکی را بر اساس محیط تر شده و مساحت مقطع محاسبه نمود و از آن به ترتیب عدد نوسلت و ضریب جابجایی موضعی را محاسبه کرد.

همچنین می‌توان با حل معادله سیال در هندسه مساله به جای استفاده از ضریب جابجایی به طور مستقیم با استفاده از حل همزمان معادلات انرژی و جریان به نتایج دقیق تری رسید. علاوه بر این می‌توان با در نظر گرفتن اثرات جابجایی آزاد فرضیات مساله را کاملتر نمود.

۸- نتیجه گیری

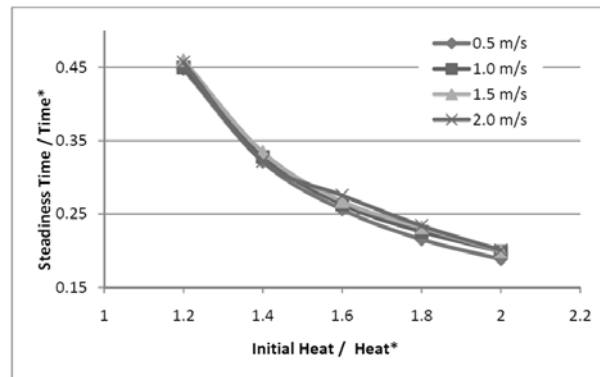
با بررسی نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با یک رابطه کلی می‌توان وضعیت سامانه حرارتی را به طور مستقل از شرایط کارکرد، تحلیل نمود که در اینجا دو رابطه مناسب به عنوان پاسخ سامانه به دست آمد.

با استفاده از «روش گرمای اولیه» و «روش سرعت اولیه» می‌توان زمان رسیدن به حالت پایای سامانه‌های حرارتی را به ترتیب به میزان ۷۰٪ و ۸۵٪ کاهش داد. که در آن رفتار دقیق سامانه به طور کامل قابل پیشگویی است. این دو روش در برنامه‌ریزی آزمایش‌های تجربی و همچنین اجرای برنامه‌های محاسباتی کاربرد دارد.

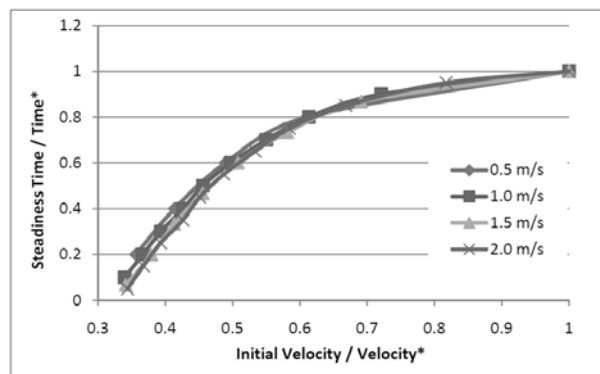
نکته مهم تر که در این مقاله به آن اشاره شد، تعریف پارامترهای بدون بعد برای سامانه بود و همان گونه که دیده شد، رفتار سامانه در حالت بهینه در برابر تغییر پارامترها مستقل از پارامترهای اضافی است و تنها به متغیر بدون بعد سرعت و یا شار گرمایی وابسته است و با مشخص بودن این مقدار به سادگی می‌توان نقطه بهینه تعادل سامانه را مشخص نمود و نکته جالب تر اینکه این حقیقت در هر دو روش سرعت اولیه و یا شار اولیه دیده می‌شود.

به علاوه مساله‌ای که باید به آن توجه کرد این است که زمان بدون بعد در مقادیر سرعت بدون بعد نزدیک صفر به سمت بینهایت میل می‌کند که البته باید توجه داشت این مساله به علت تاثیرات جابجایی آزاد در حالت سرعت صفر، حل مساله را با مشکل مواجه می‌کند و فرض جابجایی اجباری بی معنی خواهد بود، به همین علت دیده می‌شود که در سرعت‌های کمتر اختلاف با مقادیر تجربی بیشتر می‌شود. همین طور در هر دو روش با افزایش متغیر بدون بعد سرعت و یا شار گرمایی، میزان زمان بدون بعد به سمت مجانب مشخصی میل می‌کند، که این مساله نشان می‌دهد میزان کاهش زمان بهینه حد مشخصی دارد.

مسئله دیگری که شاید در ادامه این کار لازم به نظر برسد، در نظر گرفتن طول ورودی جریان داخل لوله به جای جریان خارجی برای محاسبه ضریب جابجایی انتقال گرما می باشد. در زمینه ضریب جابجایی در طول ورودی لوله های غیر دایره‌ای، مرجع [۷] می‌تواند راهگشای مفیدی باشد. برای اینکار می‌توان برای مقطع دوزنقه‌ای شکل عبور



شکل (۱۱): نمودار تغییرات زمان بدون بعد برحسب شار اولیه بدون بعد



شکل (۱۲): نمودار تغییرات زمان بدون بعد برحسب سرعت اولیه بدون بعد

همچنین شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که با اعمال این روش‌ها در مدت مناسب می‌توان زمان رسیدن به شرایط دائم را تا ۸۵ درصد کاهش داد.

از برازش داده‌های فوق می‌توان رابطه‌های زیر را برای توصیف رفتار سامانه در هر یک از شرایط استخراج نمود:

برای روش گرمای اولیه:

$$\theta^* = \frac{0.0675}{1 - 1.3925e^{-0.4012\theta^*}} \quad (21)$$

و به همین گونه برای روش سرعت اولیه:

$$\theta^* = 0.978 \ln \left(1 - \frac{0.2478}{v^*} \right) + 1.2847 \quad (22)$$

۷- پیشنهادات برای ادامه کار

مسئله‌ای که شاید در ادامه این کار لازم به نظر برسد، در نظر گرفتن طول ورودی جریان داخل لوله به جای جریان خارجی برای محاسبه ضریب جابجایی انتقال گرما می باشد. در زمینه ضریب جابجایی در طول ورودی لوله های غیر دایره‌ای، مرجع [۷] می‌تواند راهگشای مفیدی باشد. برای اینکار می‌توان برای مقطع دوزنقه‌ای شکل عبور

		رسانایی در راستای X
kJ	q_z	گرما انتقال یافته در اثر رسانایی در راستای Z
-	Re_D	عدد رینولدز
°C	T	دمای المان
°C	T_∞	دمای سیال آزاد
s	t	زمان

s	$Time_{natural}$	زمان رسیدن به حالت پایا حالت طبیعی
s	$Time_{forced-heated}$	زمان رسیدن به حالت پایا در روش گرمای اولیه
s	$Time_{forced-velocity}$	زمان رسیدن به حالت پایا در روش سرعت اولیه
-	x^+	طول بدون بعد

۱۰- علائم یونانی

-	*	سرعت اولیه بدون بعد
-	*	زمان بدون بعد
kg/m ²	ρ	چگالی المان پره
-	*	شار گرمایی اولیه بدون بعد

۱۱- مراجع

- [1] E. R. G. Eckert et al., "Heat Transfer- a Review of 1995 Literature", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, 1999, pp. 2717-2797.
- [2] F. Alhama, A. Campo, "The Connection Between The Distributed and Lumped Models for Asymmetric Cooling of Long Slab by Heat Convection", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No. 1, pp. 127-137, 2001.
- [3] Shitzer et al., "Application of a Lumped-Parameter Heat Exchanger Model to Cold-Induced Temperature and Blood Flow Measurements in the Finger-Tip", Journal of Thermal Biology, Vol. 21, No. 4, 1996, pp. 213-220.
- [4] Zhao-Fen Jin, Yutaka Asako, and Yoshiyuki Yamaguchi, "Parametric Study of Thermal Responses of a Highly Water Content Fire Wall", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 33, Issue 4, pp. 403-414, March 1998.

[۵] ف. طالبی، س. م. سیدنصراله، " بررسی تحلیلی و تجربی یک روش کنترل در کاهش زمان رسیدن به حالت پایای یک سیستم حرارتی"، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴.

جابجایی در طول ورودی لوله های غیر دایره‌ای، مراجع [۷ و ۸] می‌توانند راهگشای مفیدی باشند. برای اینکار می توان برای مقطع دوزنقه‌ای شکل عبور جریان، قطر معادل هیدرولیکی را بر اساس محیط تر شده و مساحت مقطع محاسبه نمود و از آن به ترتیب عدد نوسلت و ضریب جابجایی موضعی را محاسبه کرد.

۹- فهرست علائم و واحدها

m ²	A_s	سطح موثر در انتقال گرمای جابجایی
m ²	A_x	سطح موثر در انتقال گرمای رسانایی در راستای X
m ²	A_z	سطح موثر در انتقال گرمای رسانایی در راستای Z
kJ/kgK	c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
m	D_h	قطر هیدرولیکی جریان
kJ	E	سطح انرژی سامانه
kJ	E_{steady}	سطح انرژی سامانه در حالت پایا
kJ	$E_{initial}$	سطح انرژی سامانه در حالت اولیه
kJ	$E_{natural}$	مقدار انرژی مورد نیاز در حالت طبیعی
kJ	$E_{forced-heated}$	مقدار انرژی مورد نیاز در روش گرمای اولیه
kJ	$E_{forced-velocity}$	مقدار انرژی مورد نیاز در روش سرعت اولیه
m	H	ضخامت موضعی پره
m	H_1	ضخامت پره در پایه
m	H_2	ضخامت پره در نوک
kW/m ² K	h	ضریب انتقال گرمای جابجایی
kW/mK	k	ضریب انتقال گرمای رسانایی
m	L	طول پره
kg	m	جرم المان
-	Nu_x	عدد ناسلت
-	Pr	عدد پراوندل
kJ	q_{conv}	گرما انتقال یافته در اثر جابجایی
kJ	q_x	گرما انتقال یافته در اثر

- [7] W. M. Kays, M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [8] C. Lee, K. Lim, S. Lee, Y.J. Yoon, N.W. Sung, "A study of the heat transfer characteristics of turbulent round jet impinging on an inclined concave surface using liquid crystal transient method", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 36, Issue 6, pp. 559-565, 2006.
- [۶] س. م. سیدنصراله، س. ا. حسینی و ف. طالبی، "یک روش موثر در کاهش زمان رسیدن به حالت پایای سیستم‌های حرارتی"، پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.