

مدلسازی و کنترل تطبیقی دما و رطوبت یک موزه

تأثیر رفتار آب و هوایی در نواحی جغرافیایی مختلف بر انواع گیاهان، جانوران و اشیاء باعث شده است که بررسی ایده‌های مربوط به کنترل متغیرهای هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود. در مقاله حاضر، به بررسی رفتار گرمایی و کنترل متغیرهای یک موزه (یک ناحیه محصور)، پرداخته شده است. برای مدلسازی دینامیکی از روش انتقال حرارت یک بعدی برای المانهای ناحیه استفاده شده است. کنترل دما و رطوبت با روش تطبیقی مدل مرجع و بهبودیافته انجام شده است. نتایج عددی، شامل بررسی پاسخ سیستم بدون اعمال کنترلر و با اعمال آن، نمودار تعقیب مشخصه مطلوب توسط متغیرهای دینامیکی، نمودار خطا و تغییرات سیگنال کنترل و بهره‌های تطبیقی، مورد بحث قرار گرفته است. بررسی نتایج و مشاهده نمودارهای خطا و تعقیب مشخصه مطلوب حاکی از موفقیت بیشتر و اثربخشی بهتر روش کنترل تطبیقی بهبودیافته در کنترل دما و رطوبت ناحیه مطالعه شده می‌باشد.

بهنام میری پور فرد^۱

استادیار

امید نادری^۲

کارشناسی

واژه های راهنما: مدلسازی موزه، کنترل تطبیقی، ناحیه محصور، رفتار گرمایی

۱- مقدمه

با توجه به این که در محیطهای دارای کاربرد خاص، مانند واحد مراقبت نوزادان، فضاهای موزه و آزمایشگاهها استانداردهای آب و هوایی بسیار سختگیرانه‌ای مورد نظر است، اینگونه فضاها باید دارای شرایط آب و هوایی بسیار مطلوب باشند. اگرچه داخل این فضاها ممکن است اهداف مختلفی دنبال شود ولی اغلب نیازمند کنترل دما و رطوبت خیلی دقیق می‌باشند. این محیطها اغلب دارای فضاهای داخلی شامل نواحی بسته (به عنوان مثال جعبه نمایش شیشه‌ای با مصنوعات از بین رفتنی در سالن موزه) می‌باشند. در اینجا باید شرایط مختلف آب و هوایی با توجه به محیط پیرامون ناحیه گرمایی نگه داشته شوند. اگرچه این نواحی اغلب با بارهای گرمایی محیط‌هایی که در آنها هستند تحت فشار قرار می‌گیرند. در تمام این موارد، استراتژی‌های مخصوص کنترلی باید در نظر گرفته شوند تا از پایداری این سیستمها در شرایط آب و هوایی مختلف و در تمام نواحی اطمینان حاصل شود. پیش از هرگونه تحلیلی پیرامون مدلسازی اینگونه فضاها باید در نظر داشت که رسیدن به مدل واقعی تقریباً امری غیرممکن می‌باشد. البته اخیراً پژوهشگران گام‌های موثری برای مدلسازی دقیق تر این نواحی برداشته‌اند و مدل‌های نسبتاً دقیقی ارائه داده‌اند. به عنوان مثال به منظور مدلسازی و بررسی شرایط

^۱نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران bmf@guilan.ac.ir

^۲کارشناسی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران omidnaderi951@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۰۳

داخلی آب و هوایی، روشها و پیشنهادات متنوعی توسط پژوهشگران در مواردی مانند موزه یا واحد مراقبت نوزادان آسیب پذیر ارائه شده است. اخیرا بررسی با مدل هوای توده‌ای و مرطوب گرم (که HAMLAB نامیده می‌شود) با کنترلر و و طراحی سیستم HVAC ایده‌آل انجام شده است [۱]. این روش (با مدل کردن دو معادله وابسته دما) برای چنین فضاهایی با اضافه کردن شبیه‌ساز مناسبی ارتقاء یافته است. این ابزار با کنترل کردن آب و هوای داخل موزه یا فضاهای خاص با استراتژی مدیریت کردن نقطه تنظیم‌ها بکار گرفته شده است [۲]. همچنین مدل‌های شبیه‌سازی عددی برای مطلوب ساختن رطوبت با مواد جاذب و ارزیابی فعل و انفعالات دمایی بررسی شده است [۲ و ۳]. در مجموع، این نکته که میزان پژوهش در مواردی مانند مدلسازی فضاهای ویژه محدود است و امکان بررسی دقیق وجود ندارد، حائز اهمیت است. در خصوص بهبود بخشیدن به متغیرهای آب و هوایی این نواحی، دو راهکار پیش روی پژوهشگران وجود دارد [۴]. اولین راه تلاش برای رسیدن به مدل دقیق از نواحی و بکارگیری کنترلرهای متداول مانند کنترلرهای کلاسیک (مثلا PID و ...)، می‌باشد. اشکال این کار این است که به دلیل تنوع نرخ تغییر شرایط آب و هوایی نسبت به زمان و امکان بروز تغییرات ناگهانی، تنظیم بهره‌های کنترلی در اینگونه کنترلرها در این مورد نیازمند تلاش تجربی بسیار زمانبری می‌باشد و در صورت تنظیم نامناسب بهره‌های کنترلی و وقوع تغییرات مدل نشده، مشخصات پاسخ گذرای سیستم دستخوش تغییر می‌شود و امکان وقوع فراجاهش، کم شدن اثربخشی در کاهش اغتشاش، و درنهایت ناپایداری وجود دارد. راه حل دوم و مطمئن‌تر، تلاش برای کنترل مطلوب متغیرهای یک مدل که دارای عدم قطعیت‌های بسیار فراوان است، می‌باشد. در نواحی ساختمانی آسیب‌پذیر و حساس، مانند موزه، استراتژی‌های مخصوص کنترلی باید به منظور اطمینان از پایداری در شرایط آب و هوایی داخل ناحیه در نظر گرفته شوند. این کار از طریق دستکاری همه بارهای گرمایی مستقل از سرعت و شدت تغییرات آنها انجام می‌شود. در واقع، در این فضاها الگوریتم کنترل (که برای نواحی آب و هوایی کوچک جوابگو هستند) باید قادر به خنثی کردن یا کاهش دادن تمام آشفتگی‌های ناشی از تغییرات سریع یا نوسانات دمایی و رطوبت هوا حول شرایط ایده آل باشند. بکارگیری الگوریتم‌های کنترل کلاسیک (مانند تناسبی، انتگرالی، مشتق گیر (PID)) با توجه به وجود عدم قطعیت‌های فراوان در مدلسازی امکان اثربخشی کمی دارند [۴]. با توجه به تمام دلایل ذکر شده (به ویژه رسیدن به تنظیم دقیق و مقاوم)، در [۴] یک طرح تطبیقی مدل-مرجع پیشنهاد شده است. چنین روشی به کنترلرهای دما و رطوبت هوای داخل، تحت شرایط غیرپیش‌بینی شده اجازه می‌دهد که با تطبیق بهره‌ها در حین اجرای الگوریتم خود را با شرایط جدید وفق دهند. لازم به ذکر است در این روشها عملگر کنترل به طور خودکار قادر خواهد بود تا تمام انحرافات رفتار آب و هوایی غیرمنتظره و عدم قطعیت‌ها را بدون احتیاج به تنظیم مجدد بهره‌ها یا دانش دقیق راجع به مدل دینامیکی سیستم، کنترل کند. در [۵] به منظور مدلسازی و شبیه‌سازی رفتار آب و هوایی و شرایط مختلف و سختگیرانه محیطی یک مدل انعطاف‌پذیر و قابل تنظیم به نام DETECT 2.3.1 در نظر گرفته شده است. چنین مدلی که یک ابزار برای شبیه‌سازی کارکرد انرژی در ساختمان می‌باشد، برای تحقیق و پژوهش در حوزه انرژی و ساختمان توسعه داده شده است. با چنین ابزاری می‌توان بهینه‌سازی و طراحی‌های جدید ساختمان و سناریوهای کاربردی را بررسی کرد (به عنوان مثال طرح‌های خلاقانه جدید در ساختمان، کاربرد مواد جدید، اثر تکنولوژی‌های جدید در حوزه انرژی در ساختمان، انرژی‌های تجدیدپذیر و ...).

با مدل DETECT می‌توان مدلسازی یک ناحیه یا چند ناحیه مشبک را انجام داد. در جدیدترین ویرایش DETECT 2.3.1 شبیه‌سازی به صورتی که در ادامه به آن اشاره شده است، انجام می‌شود:

- آنالیز اثر کلی و آسایش هاپروترمال^۱ در چند ناحیه مشبک و ناحیه پوشش دهنده
 - کنترل رفتار آب و هوایی نواحی مورد بررسی با استراتژی‌های تطبیقی کنترل برای دما و رطوبت که از خارج ناحیه تحت تغییرات ناگهانی و در داخل تحت اثر بارهای گرمایی موجود می‌باشند.
- هدف پژوهش فوق نمایش ویژگی‌ها و ظرفیت مدل شبیه‌سازی و تاثیرگذاری و مقاومت روشهای کنترلی مربوط می‌باشد. نمونه‌هایی از نتایج اولیه استفاده از مدل DETECT 2.3.1 در [۶] آمده است. لازم به ذکر است در مورد نواحی مشبک که در [۵] بکار رفته است، برای کنترل از روند کنترل غیرمتمرکز استفاده شده است [۷]. همچنین یک روش تطبیقی در [۸] استفاده شده است که در آن اثر متقابل میان نواحی به عنوان یک نامعینی در نظر گرفته شده است و در ترم اغتشاش کلی به سیستم غیرمتمرکز وارد می‌شود، جایگذاری شده است. در مقاله حاضر، هدف، بررسی نقاط قوت و ضعف کنترلرهای پیشرفته مانند کنترلرهای تطبیقی، در کارایی و خنثی‌سازی عدم قطعیت‌ها می‌باشد. بنابراین، ضمن مدلسازی شرایط آب و هوایی برای یک موزه طبق روند ذکر شده در [۵]، یک کنترلر تطبیقی بهبود یافته برای تنظیم شرایط آب و هوایی آن طراحی شده است. با هدف انجام مقایسه، روش تطبیقی مدل-مرجع نیز شبیه‌سازی شده است. مقایسه موفقیت این دو روش در بخش نتایج عددی انجام شده است.

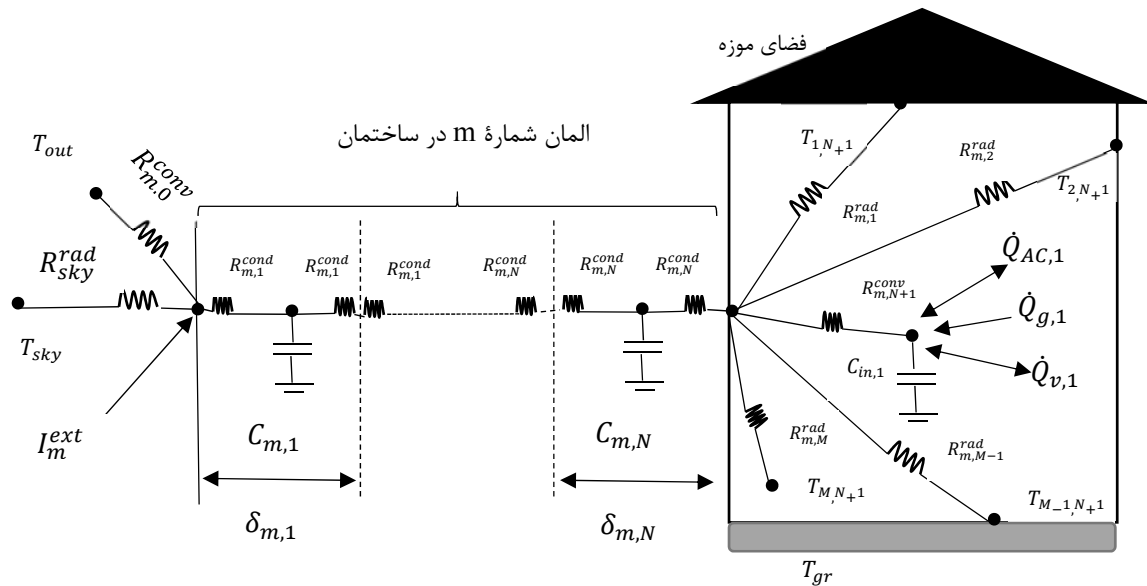
۲- تئوری و مدلسازی ریاضی

در این بخش با توجه به جبران عدم قطعیتها توسط کنترلر تطبیقی و کم شدن اهمیت دقت مدلسازی، ضمن تشریح مدلسازی ریاضی با تعداد گره‌ها و دقت بالا، مدلسازی تقریبی و با حداقل تعداد گره دمایی (همانگونه که در [۱۱] اشاره شده است)، بررسی شده و طراحی سیستم کنترل بر پایه طرح کنترل تطبیقی برای شرایط آب و هوایی داخل ناحیه ارائه شده است. روش مدلسازی تقریبی انجام شده در مقاله حاضر در بخش ۲-۴ (مدلسازی موزه) کاملاً توضیح داده شده است.

۲-۱-۱-۲ DETECT 2.3.1 مدل هاپروتریک نواحی مشبک

به منظور شبیه‌سازی رفتار هاپروترمال محیط‌های ویژه که با نواحی مشبک مشخص شده است، از مدل ابزار دینامیکی شبیه‌سازی با نام DETECT استفاده شده است [۴ و ۹]. این ابزار اجازه بررسی تمام موارد مدل شده اعم از دما، رطوبت، گرمادهی، سرمادهی و مقتضیات گرمایی را می‌دهد. مدلسازی بر پایه مدل شبکه گرمایی مقاومتی-خازنی (RC) می‌باشد که در آن هدایت به صورت یک بعدی انجام می‌شود. جزئیات این روش در منابع [۴ و ۵] ارائه شده است.

^۱ مربوط می‌شود به حرکت، تغییرات و ترکیب رطوبت و گرما در ساختمان Hygrothermal



شکل ۱- مدلسازی به روش شبکه گرمایی مقاومتی خازنی، C نشان دهنده ظرفیت گرمایی، T دما، R مقاومت گرمایی، δ زاویه لغزشی ساعتی و I شار تشعشع خورشیدی است. همچنین زیر نویس $gr\ m$ و n به ترتیب نشان دهنده شماره المان، زمین و شماره زیر لایه می‌باشند.

در این مقالات مدل DETECT به منظور آنالیز صحیح هاپروترومال برای نواحی مشبک بهبود بخشیده شده است. مدلسازی شبکه گرمایی RC مربوط به Z ناحیه گرمایی که یکی از آنها ناحیه پوشش می‌باشد، دارای $Z-1$ ناحیه کوچک است که در داخل ناحیه پوشش قرار گرفته است (شکل ۱). در این مدل، روند محاسبات شار گرمایی بین: ۱- بیرون پوشش ناحیه اصلی (ناحیه ۱) - ۲- ناحیه اصلی و نواحی کوچکتر را شامل می‌شود. به علاوه چندین فرض در نظر گرفته می‌شود:

۱- هوای داخل ناحیه به صورت کامل مختلط است. بنابراین یک گره برای دمای هوای متحدالشکل در نظر گرفته می‌شود.

۲- ساختمان پوشش ناحیه اصلی به وسیله تعداد مناسبی گره در نظر گرفته شده در حالی که پوشش نواحی کوچکتر با روش پوشش فشرده مدلسازی شده است.

۳- هر دو فرض ایزوتروپ بودن، نامتغیر با زمان بودن، (برای چگالی، گرمای ویژه و رسانایی گرمایی) برقرار می‌باشد. سیستم کلی شامل ناحیه اصلی و نواحی کوچکتر می‌باشد که به وسیله شبکه گرمایی RC مرتبه بالا مدلسازی شده است: ۱- $M(N+2)$ گره در پوشش ناحیه اصلی (شامل M المان و N زیرلایه) ۲- $Z-1$ گره برای توده پوشش نواحی کوچک ۳- Z گره برای هوای داخل نواحی در نظر گرفته می‌شود.

در هر τ امین گام برای n امین گره از m امین المان، معادله دیفرانسیلی که نرخ تغییر انرژی در هر گره دمایی را توضیح می‌دهد، برای پوشش ناحیه اصلی برابر است با:

$$C_{m,n} \frac{dT_{m,n}}{dt} = \sum_{j=n-1}^{n+1} \frac{T_{m,j} - T_{m,n}}{R_{m,j}^{eq}} \quad (1)$$

که در این معادله T و C به ترتیب دما و ظرفیت گرمایی، $R_{m,j}^{eq}$ جمع نیم مقاومت زیرلایه‌هایی است که در همسایگی n امین گره از پوشش قرار دارند.

برای سطوح بدون ظرفیت مرزی ($n=0$) و ($n=N+1$) (گره‌های بدون ظرفیت) معادله جبری انتقال گرما به صورت معادله (۲) توضیح داده می‌شود.

$$\sum_{j=n-1}^{n+1} \frac{T_{m,j} - T_{m,n}}{R_{m,j}^{cv}} + \dot{Q}_{m,n} = 0 \quad (2)$$

که در آن $R_{m,j}^{cv}$ یا مقاومت گرمایی همرفتی ($R_{m,0}^{conv}$ و $R_{m,N+1}^{conv}$) یا مقاومت گرمایی رسانایی است که گره را به همسایه آن در پوشش مرتبط می‌سازد. $R_{m,0}^{conv}$ و $R_{m,N+1}^{conv}$ گره‌های بدون ظرفیت را به گره‌های هوای داخل ($T_{in,1}$) و خارج (T_{out}) مرتبط می‌سازد. توجه شود که ضریب انتقال حرارت همرفتی واحد سطح در خارج ناحیه (برای سطوح سخت) به وسیله رابطه تجربی بر حسب سرعت باد محاسبه می‌گردد.

ضرایب انتقال حرارت همرفتی واحد سطح داخل نیز تابع شیب سطوح داخل می‌باشد که در آن صعود و نزول جریان هوا در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. در مورد المان‌های کف T_{out} و $R_{m,j}^{cv}$ توسط دمای زمین (T_{gr}) و مقاومت گرمایی رسانایی معادل زمین R_{gr}^{eq} جایگزین شده است. تابع مدل شده $\dot{Q}_{m,n}$ شامل تشعشع خورشیدی (که از پنجره عبور کرده و به m امین المان می‌رسد) و عمل انتقال تشعشع طول موج بلند بر سطوح خارجی داخل ناحیه ۱ می‌باشد [۴].

همچنین نرخ تغییرات دمای پوشش $Z-1$ ناحیه دیگر از رابطه (۳) محاسبه خواهد شد:

$$C_{w,z} \frac{dT_{w,z}}{dt} = \sum_{i=1}^z \frac{T_{in,i} - T_{w,z}}{R_{i,z}^{glob}} \quad (3)$$

۲-۲- نرخ تغییر انرژی هوای داخل

نرخ تغییر انرژی هوای داخل برابر با اختلاف انرژی تغذیه با انرژی خارج شونده از ناحیه گرمایی می‌باشد. در هر τ امین معادله دیفرانسیل گره هوای داخل شبکه گرمایی برابر خواهد بود با:

$$C_{in,1} \frac{dT_{in,1}}{dt} = \sum_{m=1}^M \frac{T_{m,N} - T_{in,1}}{R_{m,int}^{conv}} + \frac{T_{w,z} - T_{in,1}}{R_{1,z}^{glob}} + \frac{T_{out} - T_{in,1}}{R_{v,1}} + \sum_{z,2}^Z \frac{T_{in,z} - T_{in,1}}{R_{v,z}} + \dot{Q}_{g,1} \pm \dot{Q}_{AC,1} \quad (4)$$

و برای $Z-1$ ناحیه دیگر نیز به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$C_{in,z} \frac{dT_{in,z}}{dt} = \frac{T_{w,z} - T_{in,z}}{R_{2,z}^{glob}} + \frac{T_{in,1} - T_{in,z}}{R_{v,z}} + \dot{Q}_{g,z} \pm \dot{Q}_{AC,z} \quad (5)$$

که در آن مقاومت‌های گرمایی $R_{v,1}$ و $R_{v,2}$ مربوط به بارهای گرمایی نفوذپذیری و تهویه می‌باشند. به خصوص $R_{v,1}$ به گره هوای داخل ناحیه Z و ناحیه ۱ متصل می‌شود. تمام بارهای گرمایی محسوس فقط روی گره هوای داخل اثرگذار هستند (به جز $\dot{Q}_{m,n}$ که مربوط به تشعشع می‌باشد). آنها شامل: ۱- بارهای گرمایی متاثر از ساکنان و افراد داخل، روشنایی و تجهیزات ($\dot{Q}_{g,1}$ و $\dot{Q}_{g,2}$) ۲- گرمای محسوس وارد شونده (خارج شونده) به فضای ساختمان (از فضای ساختمان)، ($\dot{Q}_{AC,1}$ و $\dot{Q}_{AC,2}$) توسط یک سیستم HVAC ایده آل که برای رسیدن به مقتضیات گرمایی بکار می‌رود تامین می‌شود. بنابراین با فرض ایده آل بودن، دینامیک سیستم تامین حرارت و برودت بررسی نشده است. روشن است که معادلات دیفرانسیل مذکور برای گره‌های گرمایی با یک سیستم شبیه‌سازی معادلات دیفرانسیل و جبری حل خواهد شد. به منظور بررسی گرمای نهان افزوده شده (یا کم شده) به نواحی گرمایی با هدف حفظ رطوبت نسبی هوای داخل در نقطه تنظیم‌های مطلوب یک روند دی‌کوپله‌سازی پیگیری می‌شود [۴]. در هر τ امین گام زمانی تعادل رطوبت انجام شده در هر زمان شبیه‌سازی برای ناحیه اصلی و نواحی مشمول به ترتیب با روابط (۶) و (۷) مشخص می‌شود:

$$\Omega_{in,1} \frac{d\omega_{in,1}}{dt} = \dot{m}_{v,1}(\omega_{out} - \omega_{in,1}) + \sum_{z=2}^Z \dot{m}_{v,z}(\omega_{in,z} - \omega_{in,1}) + \dot{m}_{wg,1} \quad (6)$$

$$\pm \frac{\dot{Q}_{AC,1}^{lat}}{\Delta h_{vs}}$$

$$\Omega_{in,z} \frac{d\omega_{in,z}}{dt} = \dot{m}_{v,1}(\omega_{in,1} - \omega_{in,z}) + \dot{m}_{wg,z} \pm \frac{\dot{Q}_{AC,z}^{lat}}{\Delta h_{vs}} \quad (7)$$

که Ω_{in} جرم هوای خشک، \dot{m}_v نرخ جریان تهویه جرم هوا، \dot{m}_{wg} نرخ جریان جرم بخار آب درون هوا، ω_{in} و ω_{out} به ترتیب رطوبت ویژه هوای خارج و داخل و h_{vs} گرمای نهان تبخیر آب در صفر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۲-۳- مدلسازی موزه

در اینجا کنترلر آب و هوایی دقیق برای دما و رطوبت هوای داخل در مورد سالن و موزه نیاز است. یک موزه معمولاً شامل چندین جعبه است (شامل جواهرات، سنگ یا ابزار سرامیکی، اشیاء فلزی). قیود آب و هوایی ویژه‌ای برای پرهیز از بروز خسارات جبران ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. ناحیه سالن موزه براساس دو کنترلر مختلف که تحت تغییرات ناگهانی شرایط هائروترومال قرار می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی این ناحیه (شکل ۱) با روابط (۸) و (۹) توضیح داده می‌شود [۹]:

$$c_w \frac{dT_w}{dt} = \frac{T_{out} - T_w}{R_{ext}^{eq}} + \frac{\bar{I}_{ext} \cdot h_o^{-1}}{R_{ext}^{eq}} + \frac{T_{in} - T_w}{R_{int}^{eq}} + \frac{T_{gr} - T_w}{R_{gr}^{eq}} \quad (8)$$

$$c_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{T_w - T_{in}}{R_{int}^{eq}} + \frac{T_{out} - T_{in}}{R_v} + \dot{Q}_g + \dot{Q}_{HC}^S \quad (9)$$

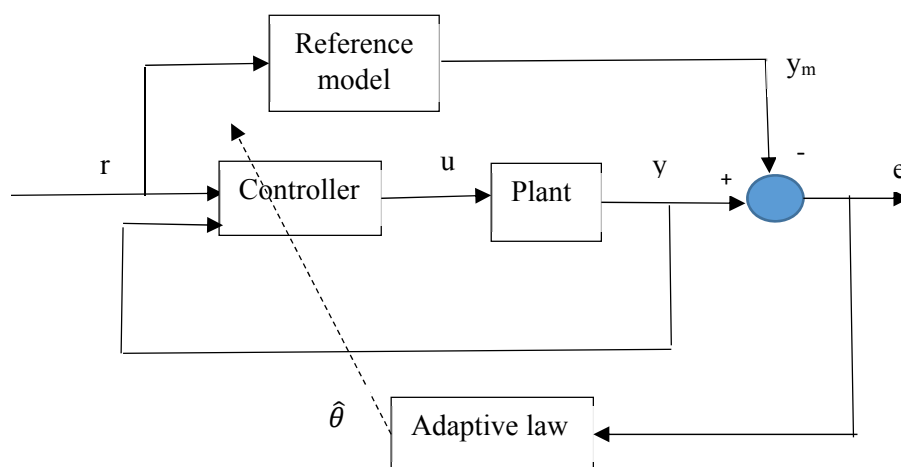
در واقع این دو رابطه بیانگر این است که برای مدلسازی فقط دو گره در نظر گرفته می‌شود. یکی برای کل محیط ساختمان و دیگری برای هوای داخل ساختمان و پارامترهای این دو رابطه براساس مدلسازی دقیق که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، تعیین می‌شوند، به این صورت که R_{int}^{eq} و $C_w = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{m,n}$ و نیز R_k به ترتیب از جمع $\frac{R_k}{2}$ با مقاومت همرفتی داخل و خارج ($R_{m,0}^{cr}$ و $R_{m,N+1}^{cr}$) بدست می‌آید، که R_k به صورت $R_k = \sum_{m=1}^M ((\sum_{n=1}^N R_{m,n}^{cond})^{-1})^{-1}$ محاسبه می‌شود. برای رطوبت نیز تک معادله (۶) کافی می‌باشد. ورودی کنترلی \dot{Q}_{HC}^S می‌باشد که توسط سیستم HVAC ایده‌آل ایجاد می‌شود. توجه شود که با فرض ایده‌آل بودن دینامیک این سیستم بررسی نشده است. محاسبات مربوط به این پارامترها از طریق روش انتقال حرارت یک بعدی و توضیحات مذکور در بخش‌های قبلی، انجام می‌پذیرد. در واقع برای ناحیه اول که سالن موزه است، به ترتیب طول، عرض و ارتفاع، ۲۰، ۱۰ و ۳٫۵ متر در نظر گرفته می‌شود. پنجره‌هایی که دارای محور طولی شرق-غرب می‌باشند و در وجه جنوبی قرار دارند (۴-۶-۴ دوجداره پر شده با هوا) ۳۲ متر مربع با مقدار U به بزرگی $2.1W/m^2k$ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر در نظر گرفته شده برای ضخامت و مقدار U عبارت است از: ۱- برای دیوارهای ساختمان ۲۵cm و $0.45W/m^2k$ ، ۲- برای کف ۳۰cm و $0.43W/m^2k$ ، ۳- برای سقف ساختمان ۳۰cm و $0.40W/m^2k$. لایه‌بندی آنها به وسیله آجرکسانتره شده ($\lambda = 0.51W/mk$ و $\rho = 1400kg/m^3$ و $c = 1000J/kg.k$) و عایق‌بندی گرمایی ($\lambda = 0.04W/mk$ و $\rho = 15kg/m^3$ و $c = 1400J/kg.k$) طراحی شده است. لازم به ذکر است که هر المان ساختمان به وسیله ۱۰ زیرلایه با ضخامت برابر مدلسازی شده است. تشعشع خورشیدی گذرنده از پنجره به داخل ناحیه با ضریب جذب ۰٫۳ جذب می‌شود. ضرایب جذب و انتشار برای سطوح داخلی به ترتیب ۰٫۱۵ و ۰٫۹ فرض شده است. برای این ناحیه نرخ تهویه $1.0vol/h$ و شاخص فشردگی $0.12p/m^2$ محسوب می‌شوند. گرمای محسوس و رطوبت تولید شده توسط ساکنان به ترتیب از ۵۵ تا $85W/p$ و از ۳۵ تا $90g/hp$ به صورت تابعی از دمای هوا بیان می‌شود (از دمای ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد) که به ترتیب متناظر با ترمهای \dot{Q}_g و \dot{m}_{wg} در معادلات (۲۰) و (۱۷) می‌باشند. بارهای گرمایی محسوس برای تجهیزات و روشنایی برابر $8W/m^2$ در نظر گرفته می‌شود (این عدد هم در ترم \dot{Q}_g حساب می‌شود). ضمناً مقدار جملات فوق وابسته به ویژگی‌های جسمی افراد داخل سالن می‌باشد و برای دمای ۱۲ درجه مورد شبیه‌سازی مقادیری کمتر لحاظ می‌شود. لازم به ذکر است در این مقاله فقط یک ناحیه مورد بررسی قرار گرفته است بنابراین کوپلینگ بین نواحی در معادلات در نظر گرفته نشده است.

۳- روشهای کنترلی

به منظور نشان دادن قابلیت کنترل تطبیقی بهبود یافته و مقایسه عملکرد این کنترلر با کنترلر MRAC معمولی هر دو روش به تفصیل در این قسمت توضیح داده شده‌اند و نتایج هر دو مورد بررسی شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

۳-۱- طراحی MRAC به روش مستقیم

روش کلی تطبیقی مدل-مرجع به صورت شکل (۲) می‌باشد:



شکل ۲- دیاگرام بلوکی کنترلر MRAC

دینامیک سیستم مطابق رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{x} = Ax + B(u - f(x)) \quad (10)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \theta_i \cdot \phi_i(x) = \theta^T \phi(x) \quad (11)$$

که در آن A ماتریس انتقال حالت و B ماتریس ورودی، $f(x)$ پارامتر غیرخطی نامعین، θ بردار پارامترهای ناشناخته، $\phi(x)$ بردار توابع پایه‌ای شناخته شده هستند.

۳-۱-۱- مدل مرجع

هدف کنترل تطبیقی تعقیب کردن سیستم مرجع می‌باشد. مدل مرجع به شکل یک سیستم LTI تعریف شده و با استراتژی خطی مرتبه دو (LQ) تنظیم شده است [۱۳]. اولین قدم برای تنظیم، انتخاب کردن سیستم نامی LTI به فرم رابطه (۱۲) می‌باشد:

$$\dot{x}_o(t) = A_o x_o(t) + B_o u_o(t) \quad (12)$$

$$y_o(t) = C_o \cdot x_o(t) \quad (13)$$

که $x \in R^n$ بردار حالت، $y_o \in R$ خروجی سیستم، $A_o \in R^{n \times n}$ ماتریس دینامیک سیستم، $B_o \in R^n$ بردار ورودی و $C_o \in R^{1 \times n}$ بردار خروجی می‌باشد. توجه شود که در مورد ساختمان کنترلر یک انتخاب ممکن بر پایه تخمین تقریبی که در [۹] توضیح داده شده است، می‌باشد.

بر طبق تئوری تنظیم کننده‌های مرتبه ۲، با انتخاب u_0 طبق رابطه (۱۴) سیستم، تنظیم خواهد شد:

$$u_0 = k^{opt} \cdot x_0 + k_R^{opt} \cdot r \quad (14)$$

در نتیجه فرم مدل مرجع به صورت (۱۵) خواهد شد:

$$\dot{x}_m = A_m \cdot x_m(t) + B_m \cdot r(t) \quad (15)$$

که $x_m(t) \in R^n$ بردار حالت، $r(t) \in R$ سیگنال ورودی مرجع، $A_m \in R^{n \times n}$ و $B_m \in R^n$ به ترتیب ماتریس حالت و ورودی به صورت (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$A_m = A_0 + B_0 k^{opt} \quad (16)$$

$$B_m = B_0 k_R^{opt} \quad (17)$$

کنترل فیدبک u را به صورت رابطه (۱۸) در نظر می‌گیریم:

$$u = \hat{k}_x x + \hat{k}_r r + \hat{\theta}^T \phi(x) \quad (18)$$

تعداد پارامترهایی که باید به صورت آنلاین محاسبه گردند $N+2$ می‌باشد و این پارامترها $\hat{\theta}$ و \hat{k}_x و \hat{k}_r می‌باشند، که همان بهره‌های تطبیقی می‌باشند. با جایگذاری u در معادلات سیستم، معادلات حلقه بسته سیستم بدست خواهد آمد:

$$\dot{x} = (A + B\hat{k}_x)x + B[\hat{k}_r r + (\hat{\theta} - \theta)\phi(x)] \quad (19)$$

$$\dot{x}_m = A_m x + B_m r \quad (20)$$

با در نظر گرفتن روابط (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) پایداری سیستم تضمین خواهد شد:

$$\dot{\hat{k}}_r = -\gamma_r r e \operatorname{sgn}(B) \quad (21)$$

$$\dot{\hat{k}}_x = -\gamma_x x e \operatorname{sgn}(B) \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma_\theta \phi(x) e \operatorname{sgn}(B) \quad (23)$$

در روابط فوق، \hat{k}_r ، \hat{k}_x و $\hat{\theta}$ بهره‌های کنترل کننده تطبیقی هستند، e خطای تعقیب، r ورودی مرجع و γ_x ، γ_r و Γ_θ ضرایب ثابتی هستند که باید طراحی شوند. sgn تابع علامت، B ماتریس ورودی سیستم و ϕ بردار توابع شناخته شده است. اثبات پایداری با روندی که در ادامه ذکر می‌شود انجام خواهد شد:
فرضیات شرایط تطابق: بهره‌های ایده‌آل k_r و k_x وجود دارند به گونه‌ای که:

$$A + Bk_x = A_m \quad (24)$$

$$Bk_r = B_m \quad (25)$$

توجه شود که نیاز به داشتن بهره‌های ایده‌آل نیست و فقط دانستن این که وجود دارند کافیهست.

$$A + B\hat{k}_x - A_m = A + B\hat{k}_x - A - Bk_x = B(\hat{k}_x - k_x) \quad (26)$$

$$B\hat{k}_r - B_m = B(\hat{k}_r - k_r) \quad (27)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_m(t) \rightarrow \dot{e}(t) = A_m e + B[\Delta k_x x + \Delta k_r r + \Delta \theta^T \phi(x)] \quad (28)$$

تابع کاندید لیاپانوف را به صورت معادله (۲۹) در نظر می‌گیریم:

$$V(e(t), \Delta k_x(t), \Delta k_r(t), \Delta \theta(t)) \quad (29)$$

$$= e^2 + |B|[\gamma_x^2 \Delta k_x^2 + \gamma_r^{-1} \Delta k_r^2 + \Delta \theta^T \Gamma_\theta^{-1} \hat{\theta}]$$

که در آن $\gamma_x > 0$ و $\gamma_r > 0$ و $\Gamma = \Gamma^T > 0$ ماتریسهای مثبت متقارن هستند، مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{V} = & 2A_m e^2 + 2|B| \left[\Delta k_x \left(x.e.sgn(B) + \gamma_x^{-1} \dot{\hat{k}}_x \right) \right] \quad (30) \\ & + 2|B| \left[\Delta k_r \left(r.e.sgn(B) + \gamma_r^{-1} \dot{\hat{k}}_r \right) \right] \\ & + 2|B| \Delta \theta^T \left[\left(\phi(x).e.sgn(B) + \Gamma_\theta^{-1} \dot{\hat{\theta}} \right) \right] \end{aligned}$$

باشد، ردیابی مجانبی خواهد بود. \dot{V} همواره منفی بماند. اگر روابط (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) برقرار

$$\rightarrow \dot{V} = 2A_m e^2 \leq 0$$

به روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) قوانین تطبیق گفته می‌شود:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) - x_m(t)] = 0 \quad (31)$$

۳-۲- کنترل تطبیقی بهبود یافته (LQ-EMRAC)

دیگرام بلوکی روش کنترلی تطبیقی بهبود یافته به صورت شکل (۳) می‌باشد:

به منظور برطرف کردن عدم تطابق میان مدل واقعی و مدل مرجع ورودی کنترل u با روالی که در ادامه گفته خواهد شد، انتخاب می‌شود:

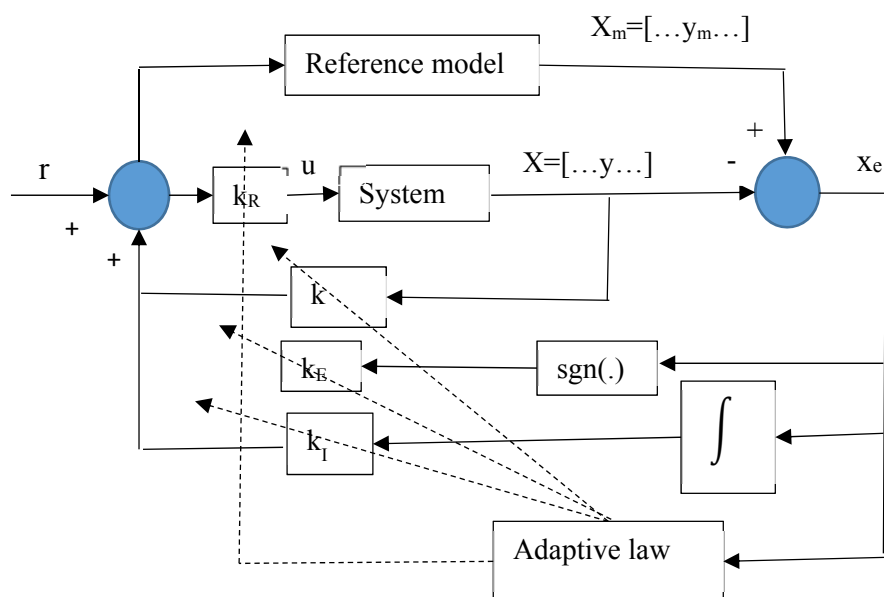
$$u(t) = u_{MRAC}(t) + u_I(t) + u_E(t) \quad (32)$$

$$u_{MRAC}(t) = k(t).x(t) + k_R(t).r(t) \quad (33)$$

$$u_E(t) = k_E(t).sgn(y_e(t)) \quad (34)$$

$$u_I(t) = k_I(t).x_I(t) \quad (35)$$

$$x_I(t) = \int_{t_0}^t x_e(\tau) d\tau \quad (36)$$



شکل ۳- شمای کنترلر تطبیقی بهبود یافته

و بهره‌های تطبیقی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k(t) = k^I(t) + y_e(t) \cdot x^T(t) \cdot \Gamma_\beta \tag{۳۷}$$

$$k_R(t) = k_R^I(t) + y_e(t) \cdot r(t) \cdot \psi_\beta \tag{۳۸}$$

$$k_I(t) = k_I^I(t) + y_e(t) \cdot x_I^T(t) \cdot \Omega_\beta \tag{۳۹}$$

$$k_E(t) = \gamma \int_{t_0}^t |y_e| \cdot d\tau \tag{۴۰}$$

در روابط فوق:

$$k^I(t) = \int_{t_0}^t y_e \cdot x^T \cdot \Gamma_\alpha \cdot d\tau \quad k^I(t_0) = k_0^I \tag{۴۱}$$

$$k_R^I(t) = \int_{t_0}^t y_e \cdot r \cdot \psi_\alpha \cdot d\tau \quad k_R^I(t_0) = k_{R0}^I \tag{۴۲}$$

$$k_I^I(t) = \int_{t_0}^t y_e \cdot x_I^T \cdot \Omega_\alpha \cdot d\tau \quad k_I^I(t_0) = k_{I0}^I \tag{۴۳}$$

که k_0^I ، k_{R0}^I و k_{I0}^I مقادیر اولیه قسمت انتگرالی بهره‌های تطبیقی، $\Gamma_\alpha, \Gamma_\beta, \Omega_\alpha, \Omega_\beta \in D_n$ (که D_n ماتریس زیر فضای قطری $R^{n \times n}$ می‌باشد) و $\psi_\alpha, \psi_\beta, \gamma \in R$ وزنهای تطبیقی هستند که دارای همان علامت k_R^{opt} طبق توضیحات ارائه شده در [۱۳] می‌باشند. بنابر آنچه که گفته شد، خروجی خطا y_e که برای محاسبه برخط دینامیک بهره‌ها لازم است طبق رابطه (۴۴) محاسبه خواهد شد:

$$x_e(t) = X_m(t) - X(t) \quad Ce = B_m^T \cdot P_c \tag{۴۴}$$

و P_c از رابطه (۴۵) محاسبه خواهد شد (معادله لیاپانوف):

$$P_c \cdot A_m + A_m^T P_c = -M \cdot M > 0 \quad (45)$$

برای اطلاعات بیشتر در مورد پایداری به مرجع [۱۳] مراجعه شود. لازم به توضیح است مدلسازی و همه شبیه‌سازی‌های مقاله حاضر به کمک نرم افزار MATLAB (MATLAB release 2014a, The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) انجام شده است.

۴- نتایج شبیه سازی عددی

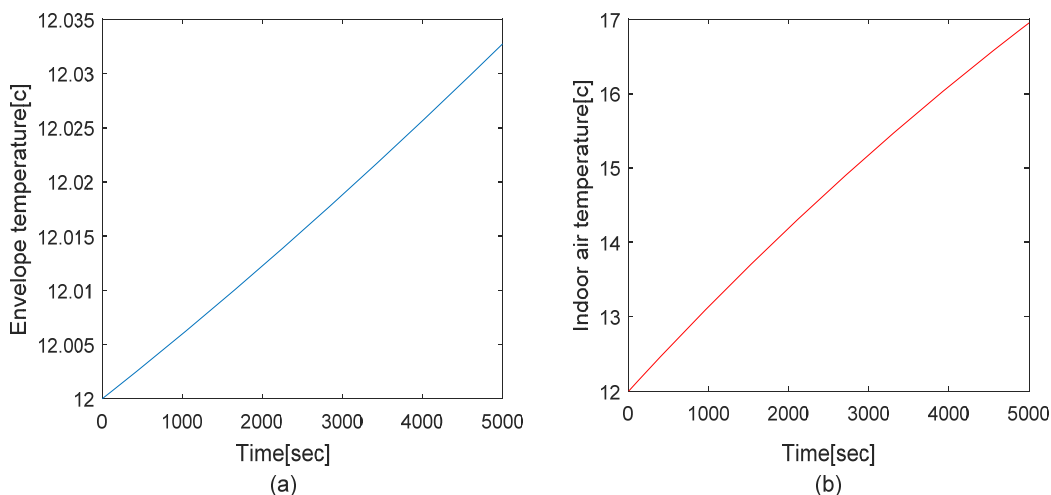
به منظور تحلیل عملکرد کنترل، نمودار دما و رطوبت نسبی هوای داخل موزه به عنوان خروجی‌های سیستم و میزان گرمای محسوس و دبی جریان بخار هوا به عنوان ورودی‌های کنترلی به همراه مشخصه مدل مرجع ترسیم شده است. ابتدا پاسخ سیستم بدون اعمال کنترل مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۴) (a) و (b) به ترتیب نمودار تغییرات دمای پوشش و دمای هوای داخل ناحیه را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است به ازای حضور ۲۴ نفر در ۲۰۰ متر مربع و همچنین روشنایی و دیگر پارامترهای تاثیرگذار روی دمای هوا، با گذشت حدود یک ساعت و بیست دقیقه (۵۰۰۰ ثانیه) دما از ۱۲ درجه سانتیگراد به حدود ۱۷ درجه سانتیگراد می‌رسد. به منظور مقایسه روش‌های تطبیقی مدل مرجع و بهبود یافته، ابتدا باید به این نکته توجه داشت که مقادیر مختلف ضرایب Ω_α و ψ_α و Γ_α و Ω_β و ψ_β و Γ_β و برای کنترلر تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته و γ_x و γ_r برای کنترلر تطبیقی مدل مرجع طیف‌های متنوعی از پاسخ را بدست خواهند داد. در حقیقت بهترین انتخاب برای این ضرایب از طریق ایجاد مصالحه میان زمان همگرایی و اثر متقابل عملکرد کنترلی انجام می‌پذیرد [۸].

با در نظر گرفتن این موضوع این انتخابها به صورت زیر انجام شده است:

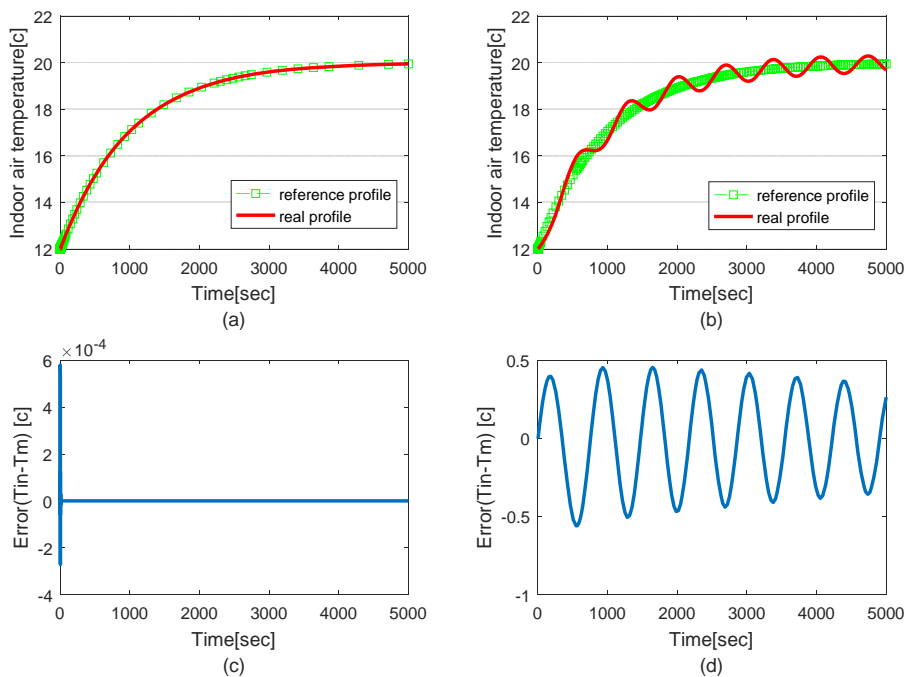
$$\gamma = 2 \text{ و } \Gamma_\beta = 5 * 10^5 I_2 \text{ و } \psi_\beta = 5 * 10^5 I_2 \text{ و } \Omega_\beta = 5 * 10^3 \text{ و } \Gamma_\alpha = 0.1 \Gamma_\beta \text{ و } \psi_\alpha = 0.1 \psi_\beta \text{ و } \Omega_\alpha = 0.1 \Omega_\beta$$

$$\gamma_x = 0.09 \text{ و } \gamma_r = 0.09$$

از نتایج بدست آمده برای این دو روش کنترلی در شکل (۵) مشاهده می‌شود که عمل تعقیب مشخصه مطلوب در روش کنترلی تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته با کیفیت بسیار بهتری هم از نظر مشخصه خطا و هم از لحاظ نوسانات حول مشخصه مطلوب انجام می‌پذیرد. ضمناً در نمودار ورودی کنترلی که در شکل (۶) برای هر دو روش رسم شده است مشاهده می‌شود که در روش تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نوسانات کمتر با فرکانس و دامنه بسیار محدودتری انجام شده است و این به معنی سویچینگ کمتر میان گرمادهی و سرمادهی و عملکرد مطلوب تر برای سیستم انتقال حرارت می‌باشد. در ادامه نظر به برتری روش کنترلی تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نتایج این روش بررسی خواهد شد.



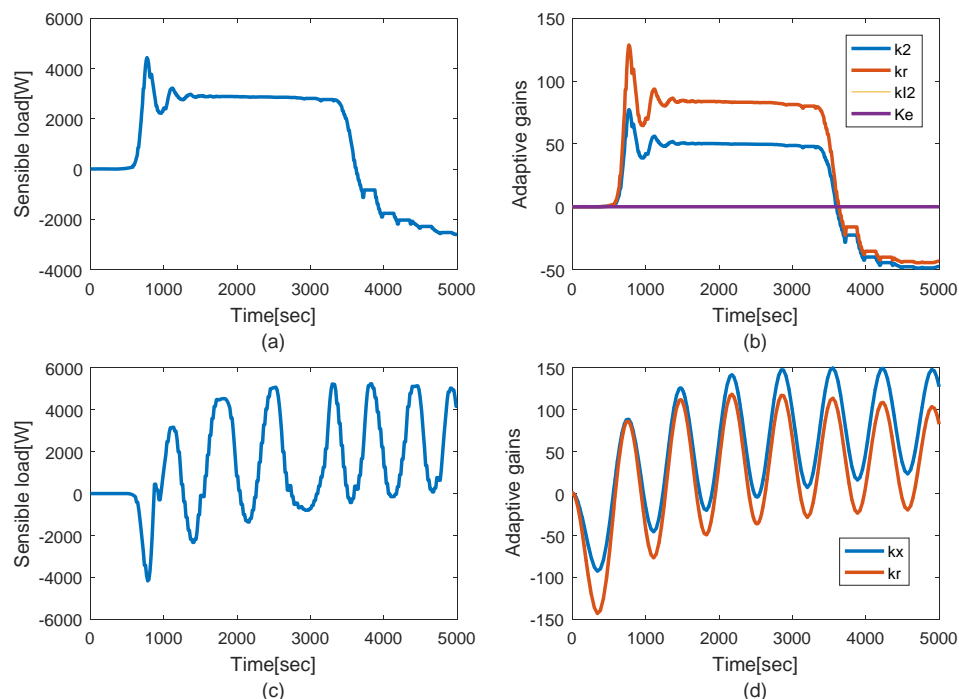
شکل ۴- (a) تغییرات دمای پوشش ناحیه و (b) تغییرات دمای هوای داخل ناحیه بدون اعمال کنترل



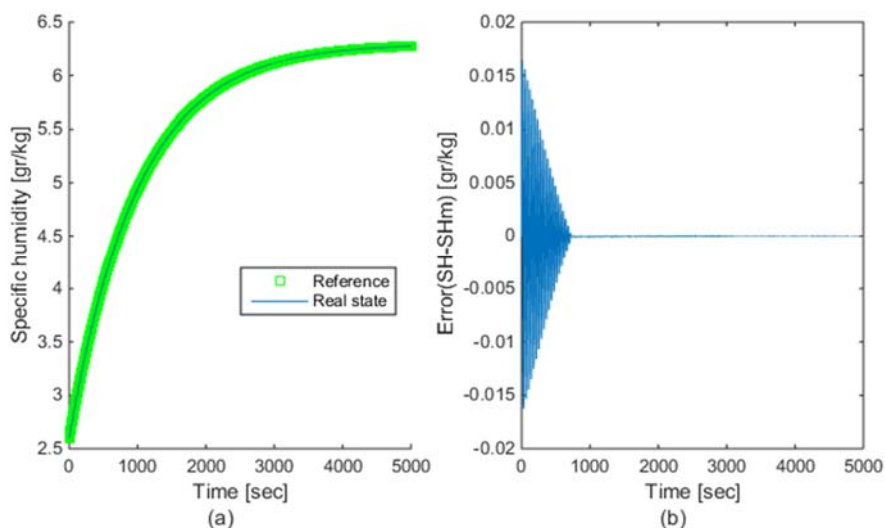
شکل ۵- تعقیب مشخصه مرجع توسط (a) کنترل تطبیقی بهبود یافته و (b) مدل مرجع (c) نمودار خطا با اعمال کنترل تطبیقی بهبود یافته و (d) نمودار خطا با اعمال کنترل تطبیقی مدل مرجع

شکل (۷) (a) و (b) به ترتیب تغییرات رطوبت ویژه و نمودار خطا در کنترل تطبیقی بهبود یافته را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی رطوبت نسبی همانگونه که گفته شد از یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول استفاده شده است. مدل‌سازی رطوبت از طریق رطوبت ویژه انجام شد اما بر اساس رابطه ۴۶ رطوبت ویژه به رطوبت نسبی قابل تبدیل است:

$$\varphi = \frac{x * (\rho - \rho_{ws}) * 100}{0.622 * \rho_{ws} * 1000} \tag{46}$$



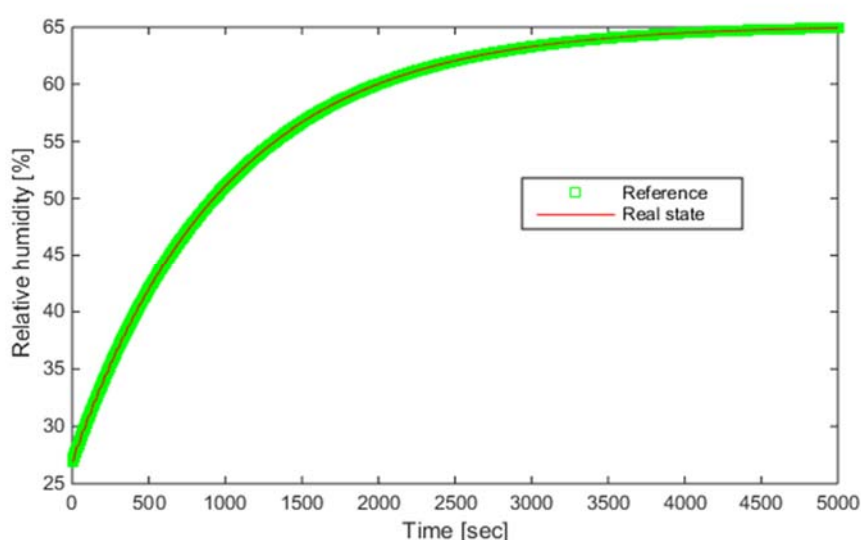
شکل ۶- (a) نمودار تغییرات ورودی کنترلی در کنترلر تطبیقی بهبود یافته **(b)** نمودار تغییرات بهره‌های کنترلی در کنترلر تطبیقی بهبود یافته **(c)** نمودار تغییرات ورودی کنترلی در کنترلر تطبیقی مدل مرجع و **(d)** نمودار تغییرات بهره‌های کنترلی در کنترلر تطبیقی مدل مرجع



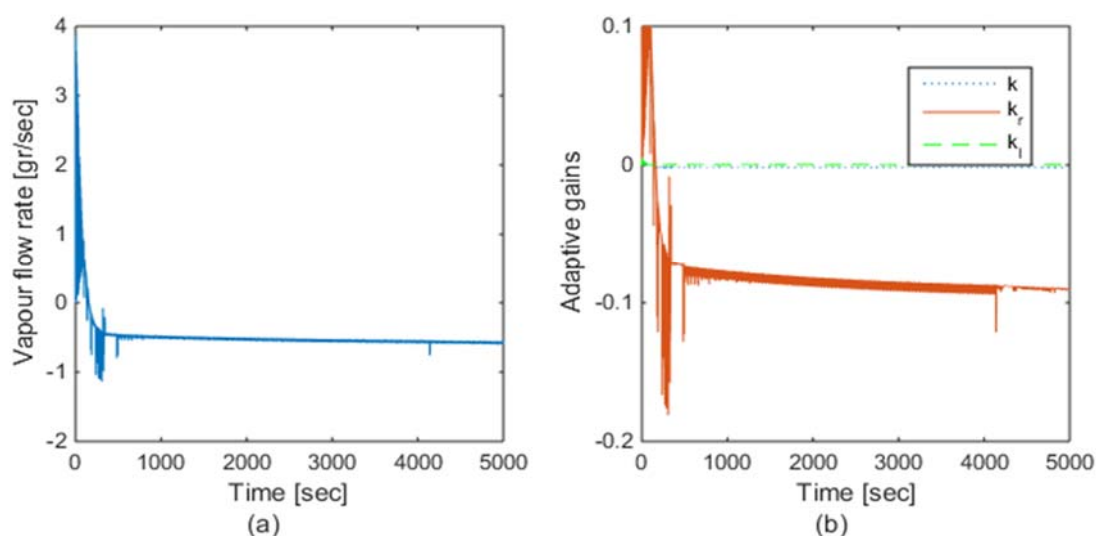
شکل ۷- (a) نمودار تغییرات نسبت رطوبت هوای داخل ناحیه و **(b)** نمودار خطا در کنترلر رطوبت

در رابطه (۴۶)، x رطوبت ویژه، φ رطوبت نسبی، ρ_{ws} چگالی بخار آب و ρ چگالی رطوبت هوای مرطوب می‌باشد. شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب منحنی تغییرات رطوبت نسبی، ورودی کنترلی و بهره‌های تطبیقی را نشان می‌دهد. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد علیرغم اینکه عمل تعقیب مشخصه مطلوب به خوبی انجام گرفته

است و خطا به سرعت به صفر نزدیک شده است، اما همانگونه که در نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود در ابتدای شبیه‌سازی پدیده نامطلوب چترینگ وجود دارد که نوسانات مربوط به این نمودار دارای فرکانس و دامنه کم می‌باشند و البته به مرور زمان از بین خواهند رفت. برای این روش در کنترل رطوبت بیشینه مقدار خطا در حدود ۰,۰۱۷ می‌باشد و در کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه خطا به صفر می‌رسد. در نهایت یکی از پارامترهای مورد سنجش برای شرایط آب و هوایی در یک موزه رطوبت نسبی می‌باشد که مقدار آن در حالت معمول و مطلوب باید حدوداً برابر ۶۵ درصد باشد. برای رطوبت نسبی که مطابق رابطه (۴۶) دارای رابطه خطی با رطوبت ویژه می‌باشد، به لحاظ همگرایی خطا و تعقیب مشخصه مطلوب وضعیت مشابهی برقرار است و رطوبت نسبی هوا طبق مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای پاسخ گذرا در مدل مرجع به مقدار مطلوب شرایط آب و هوایی همگرا خواهد شد.



شکل ۸- تعقیب مشخصه مطلوب رطوبت نسبی با کنترلر تطبیقی بهبود یافته



شکل ۹- (a) نمودار تغییرات ورودی کنترلی در روش تطبیقی بهبود یافته (b) تغییرات بهره های کنترلی در کنترلر تطبیقی بهبود یافته

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر ضمن مدلسازی ریاضی رفتار هایروترمال یک موزه، سیستم کنترل بر پایه طرح کنترل تطبیقی مدل مرجع و کنترل تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته پیاده‌سازی شد. برای مدلسازی از ابزار 2.3.1 DETECT استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی موفقیت هر دو روش در تعقیب مشخصه‌های مطلوب دما و رطوبت را نشان داد. کنترل کننده تطبیقی بهبود یافته به لحاظ تعقیب مشخصه مطلوب دارای کیفیت بسیار بالاتری می‌باشد به عنوان مثال در این روش تراکم بسیار کم نقاط در نمودار مشخصه مطلوب (شکل ۵) در یک بازه زمانی مشخص، حاکی از تعداد محاسبات بسیار کمتر برای تطبیق بهره‌ها و سرعت همگرایی بسیار بالا می‌باشد به طوریکه خطا در همان لحظات اول به سرعت به صفر همگرا می‌شود. این امر شاخصه مهمی برای سنجش عملکرد کنترل می‌باشد. در روش کنترل تطبیقی مدل مرجع پاسخ حالت گذرا دارای کیفیت مناسبی نمی‌باشد و حول مشخصه مرجع دارای نوسانات با دامنه حداکثر ۰,۵ درجه سانتی گراد می‌باشد که البته مقدار بالایی نیست و نوسانات به مرور زمان کاهش می‌یابند و خطای حالت ماندگار صفر می‌شود هرچند سیستم دارای زمان نشست بسیار بالایی است و سرعت همگرایی بسیار کم می‌باشد. همچنین از نمودارهای تغییرات ورودی کنترلی مشاهده می‌شود که در روش تطبیقی مدل مرجع سیستم به طور دائم در حال سویچینگ بین گرمادهی و سرمادهی است و این نمودار در این روش دارای نوسانات با دامنه حداکثر ۴۰۰۰ W است. البته فرکانس نوسانات در حدی است که برای سیستم انتقال حرارت امکان پذیر می‌باشد، اما از لحاظ مصرف انرژی و تاثیرگذاری بر روی زوال تجهیزات کنترلی مطلوب نمی‌باشد. در جمع بندی، می‌توان گفت که روند تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته از نظر کیفیت پاسخ و محاسبات و مصرف انرژی پایین تر بسیار مطلوب می‌باشد. در مورد علت برتری نتایج روش تطبیقی بهبود یافته می‌توان گفت که در این روش علاوه بر پیاده‌سازی روش تطبیقی مدل مرجع از طریق عبارت u_{MRAC} ، ورودی به وسیله دو عبارت جدید u_I و u_E که به آن اضافه شده‌اند، بهبود یافته است. این دو عبارت که بر حسب انتگرال خطا می‌باشند، در مقاوم بودن کنترلر و بهبود عملکرد آن نقش بسیار موثری دارند. در پژوهش‌های آتی می‌توان از این روش برای مدلسازی تمام نواحی محصوره که دارای چند ناحیه هستند و متاثر از رفتار دینامیکی یکدیگر می‌باشند نیز استفاده کرد. مقایسه با داده‌های واقعی موضوعی است که در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مراجع

- [1] Van Schijndel, A.W.M., Schellen, H.L., Wijffelaars, J.L., and Van Zundert, K., "Application of an Integrated Indoor Climate: HVAC and Showcase Model for the Indoor Climate Performance of a Museum", *Energy Build.* Vol. 40, pp. 647-653, (2008).
- [2] Kramer, R.P., Maas, M.P.E., Martens, M.H.J., Van Schijndel, A.W.M., and Schellen, H.L., "Energy Conservation in Museums using Different Set Point Strategies: A Case Study for a State-of-the-art Museum using Building Simulations", *Appl. Energ.* Vol. 158, pp. 446-458, (2015).
- [3] Brimblecombe, P., and Ramer, B., "Museum Display Cases and the Exchange of Water Vapour", *Stud. Conserv.* Vol. 28, pp. 179-188, (1983).

- [4] Buonomano, A., and Palombo, A., "Building Energy Performance Analysis by an In-house Developed Dynamic Simulation Code: An Investigation for Different Case Studies, Appl. Energ, Vol. 113, pp. 788-807, (2014).
- [5] Buonomano, A., Montanaro, U., Palombo, A., and Santini, S., "Temperature and Humidity Adaptive Control in Multi-enclosed Thermal Zones under Unexpected External Disturbances, Energy and Buildings, Vol. 135, pp. 263-285, (2017).
- [6] Buonomano, A., De Luca, G., Montanaro, U., and Palombo, A., "Innovative Technologies for Nzebs: An Energy and Economic Analysis Tool and a Case Study of a Non-residential Building for the Mediterranean Climate, Energy and Buildings, Vol. 121, pp. 318-343, (2015).
- [7] Pedro, A., and Sala, A., "Multivariable Control Systems: An Engineering Approach", Springer Verlag, London, (2004).
- [8] Brogliato, B., Lozano, R., Maschke, B., and Egeland, O., "Dissipative Systems Analysis and Control: Theory and Applications", Springer Verlag, London, (2007).
- [9] Buonomano, A., Montanaro, U., Palombo, A., and Santini, S., "Dynamic Building Energy Performance Analysis: A New Adaptive Control Strategy for Stringent Thermohygrometric Indoor Air Requirements", Appl. Energy. Vol. 163, pp. 361-386, (2016).
- [10] ISO International Organization for Standardization ISO 6946:2008, Building Components and Building Elements Thermal Resistance and Thermal Transmittance Calculation Method, (2008).
- [11] Buonomano, A., "Code-To-Code Validation and Application of a Building Dynamic Simulation Tool for the Building Energy Performance Analysis", Energies, Vol. 9, pp. 301, (2016).
- [12] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., and Dewitt, D.P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 7th Ed. John Wiley & Sons, NJ, (2011).
- [13] Anderson, B.D.O., and Moore, J.B., "Linear Optimal Control", Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, (1971).

فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت، m^2	A
ظرفیت گرمایی، J/K	C
ضریب جذب	E
ضریب دید	F
ضریب دید المان	F
ماتریس ضریب جبهات	G
شار تشعشع خورشیدی، W/m^2	I
بردار کلی شار تشعشع خورشیدی، W/m^2	I^{int}
بهره تطبیقی	K

المان ساختمان	M
نرخ جریان جرم، kg/s	\dot{m}
گره شبکه گرمایی	N
ماتریس ظریب بازتاب	P
بار گرمایی، W	\dot{Q}
مقاومت گرمایی، K/W	R
دما، K	T
زمان، s	T
میزان افقی سایه	X
حالت های سیستم	X
میزان عمودی سایه	Y
عرض سایبان افقی	z
تعداد نواحی	Z
ضریب پراکندگی	ε
ضریب بازتاب	ρ
گرمای نهان تبخیر آب در دمای صفر درجه سانتیگراد، J/kg	Δh_{vs}
ضریب جذب	α
ضریب جذب جسم سیاه	σ
زاویه آزیموث خورشید	φ
زاویه زنیث خورشید	ϑ
عرض جغرافیایی	λ
زاویه لغزشی ساعتی	δ
نسبت رطوبت، gr/kg	ω
جرم هوای خشک، kg	Ω
زمین	gr
شماره المان	M
شماره زیرلایه	N
طول موج بلند	Lw
خورشید	s
رسانایی	$Cond$
همرفتی	$Conv$
همرفتی	Cv
معادل	Eq
بیرونی	Ext
داخلی	int

Abstract

The effect of climatic and climatic changes in different geographical areas on the types of plants, animals and objects and the importance of protecting the items has led to the study of ideas related to control of air variables in desired conditions. In the present study, thermal modeling, dynamic modeling, and control of the variables of a museum which is considered an enclosed area have been investigated. For dynamic modeling, the one-dimensional heat transfer method is used for area elements (DETECT 2.3.1 method). After dynamic modeling, temperature and humidity control have been done using model-reference and modified adaptive methods. Numerical simulation results include the behavior of the system with and without using the controller, the variation of the dynamic variables, and changes in the control signal and the adaptive gains. The results show the success of control methods in the control of temperature and humidity of the studied area.