



## مدل‌سازی سیستم کنترل پارامترهای عملکردی هواساز

سینا فیض‌اله‌زاده اردبیلی<sup>۱\*</sup>، اصغر محمودی<sup>۱</sup> و ترحم مصری‌گندشمین<sup>۲</sup>

۱ و ۲ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های

کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳ - استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

ایمیل مکاتبه کننده: sina\_fa1990@yahoo.com

### چکیده

اساس کار گرمایش و سرمایش در سیستم‌های هواساز، تبادل حرارت بین دو سیال است. تبادل حرارت بین دو سیال با دماهای متفاوت انجام می‌گیرد. هدف از انجام این تحقیق مدل‌سازی یک سیستم هواساز و مقایسه آن با شرایط واقعی برای استفاده در فرایندهای مدل‌سازی بود. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی متلب و روابط ریاضی حاکم بر مبدل‌های حرارتی برای دو پارامتر دما و رطوبت نسبی، انجام گرفت. سیستم مدل، براساس کنترل فازی عمل می‌کند که کنترل فازی با به کارگیری داده‌های بدست آمده توسط حسگرهای دقیق طی بازه‌های زمانی مختلف، طراحی شد خروجی بدست آمده از مدل خروجی حاصل از هواساز واقعی، توسط پارامترهای مقایسه‌ای مثل میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین خطای نسبی (MAPE) مقایسه شدند. با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه میانگین‌ها و پارامترهای مقایسه‌ای از دو سیستم تحت کنترل، میتوان گفت میانگین مقادیر مربوط به سیستم مدل، نزدیک به نقطه تنظیم است و به خوبی می‌تواند شرایط را کنترل نماید.

واژه‌های کلیدی: کنترل فازی، مبدل‌های حرارتی، مدل کنترلی، هواساز.

### ۱- مقدمه

سیستم‌های HVAC (گرمایش، رطوبت‌زنی و تهویه مطبوع) یا هواسازها سیستم‌هایی هستند که به طور گسترده در ساختمان‌ها، کارخانجات، صنایع و کشاورزی کاربرد بسیاری دارند (ASHRAE, 1999). اجزای تشکیل دهنده سیستم‌های هواساز عبارتند از: مدارهای هوای داخل و هوای بیرون، مدارهای مربوط به آب سرد و آب گرم و سیستم رطوبت‌زنی (Lu et al, 2005). اساس کار گرمایش و سرمایش در این سیستم‌ها بر اساس تبادل حرارت بین دو سیال است. تبادل گرما بین دو سیال با دماهای متفاوت، که توسط یک دیواره جامد از هم جدا شده‌اند، فرایندی است که در اغلب کاربردهای مهندسی روی می‌دهد. وسیله‌ای که برای این فرایند به کار می‌رود، مبدل گرمایی نام دارد (Holman, 2010). روش‌های متعددی برای



کنترل سیستم‌های هواساز توسعه پیدا کردند. یکی از این روش‌ها، روش کنترل ON/OFF می‌باشد چون این سیستم‌های کنترلی به عنوان یک سیستم کنترلی ساده با برنامه‌ریزی منحصر به فرد می‌باشد. توسعه سیستم‌های ذخیره‌سازی داده، سیستم‌های محاسبه‌گر، سیستم‌های ارتباطی و سیستم‌های مجهز و پیشرفته کنترلی موجب تشخیص معایب موجود در سیستم‌های کنترلی برای سیستم‌های هواساز شده است (Afram and Janabi, 2014). علی‌رغم وجود سیستم‌های کنترلی کلاسیک، سیستم‌های مبتنی بر کنترل هوشمند نیازی به اطلاع از مدل ریاضی رفتار سیستم ندارند. سیستم‌های هوشمند و سیستم‌های مبتنی بر محاسبات نرم، امروزه در تمامی زمینه‌های علمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کنترل سیستم‌های هواساز یکی از زمینه‌های نیازمند به استفاده از سیستم‌های مبتنی بر هوشمند می‌باشد (ASHRAE, 1999). چن و تردو در سال ۲۰۱۳ یک طرحواره مدل‌سازی شده با نرم افزار مدل‌سازی متلب را معرفی کردند. این مدل بر اساس رفتار دینامیکی سیستم هواساز عمل می‌کرد (Chen and Treado, 2013)

در این مطالعه، سیستم هواساز بر اساس سیستم کنترل فازی، برای استفاده در سالن‌های پرورش قارچ و گلخانه‌ها برای دو پارامتر دما و رطوبت نسبی مدل‌سازی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- سیستم هواساز

یک سیستم هواساز استاندارد از سه بخش عمده شامل بخش انتقال حرارت، بخش دریچه‌های کنترل کننده هوا و بخش رطوبت زنی، تشکیل یافته است. انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی شامل جابجایی و رسانش می‌باشد. انتقال حرارت بین دو سیال با عمل جابجایی و انتقال حرارت رسانش بین دیواره لوله‌ها و سیال، عملی است که در سیستم‌های هواساز رخ می‌دهد (Holman, 2010). عمل کنترل دریچه‌های کنترلی در بخش کنترل هوای ورودی به هواساز یا هوای خروجی از آن بر پایه روابط ادغام دو ورودی هوا با دما و رطوبت متفاوت استوار است که این روابط عبارتند از روابط ساده ریاضی بر اساس تعادل وزنی دو سیال. در این مطالعه برای مدل‌سازی این بخش‌ها ما نیاز به اعمال یک سری فرضیات جهت ساده سازی روابط مورد استفاده بر اساس سیستم موجود داریم. برخی از این فرضیات عبارتند از:

- سیستم دارای یک کویل آن هم برای گرمایش می‌باشد.
- برای خنک کاری از دریچه هوای خنک استفاده می‌شود.
- نرخ هوای دمیده شده توسط فن بر روی کویل ثابت است.
- جریان سیال به صورت جریان عمودی دو سیال است.

حال با دانستن این فرضیات به استخراج روابط مورد نیاز از منابع انتقال حرارت می‌پردازیم.



جریان روی کویل‌ها از یک جریان خارجی، یک جریان رسانی و یک جریان داخلی تشکیل شده که برای ساده سازی و با توجه به مسی بودن و ضخامت کم لوله‌های کویل‌ها در اغلب سیستم‌های هواساز می‌توان از آن چشم پوشی کرد و به بررسی جریان داخلی و خارجی پرداخت.

برای پی بردن به ماهیت جریان داخلی و خارجی نیاز به دستیابی به عدد ناسلت مربوط به جریان داخلی و خارجی داریم. رابطه ۱ و ۲ به ترتیب اعداد ناسلت برای جریان داخلی و خارجی را نشان می‌دهند.

$$\overline{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{\frac{1}{4}}} \quad (1)$$

$$\bar{h} \equiv \frac{\overline{Nu}_D k}{D} \quad (2)$$

$$\overline{Nu}_{D(NL18)} = C^m C_z Re_{D,max} Pr^{0.38} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه ۳ می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h$ ) را هم برای جریان داخلی و هم برای جریان خارجی به دست آورد. با یافتن  $h$  و قرار دادن آن در رابطه ۴ ضریب انتقال حرارت کلی به دست می‌آید که با استفاده از این ضریب و به کارگیری آن در روابط ۵-۹ می‌توان نرخ انتقال حرارت کلی خروجی از سیستم هواساز را یافت.

$$h_o \equiv \frac{\overline{Nu}_{D(NL18)} k}{D} \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (5)$$

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} = \frac{1 - \exp\left[-NTU\left(1 + \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)\right]}{1 + \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)} \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{\dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{c,o} - T_{c,i})} \quad (8)$$

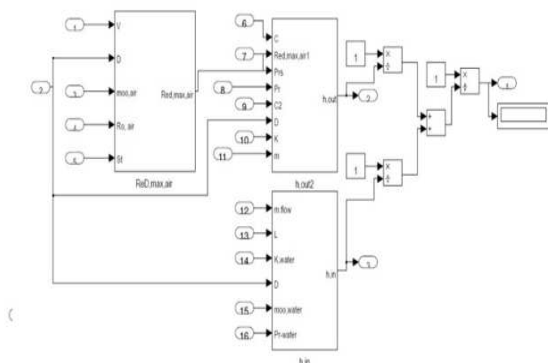
$$q = \epsilon q_{max} \quad (9)$$

رطوبت زدن هوا از طریق افزودن مستقیم بخار یا آب به هوا توسط افشانک صورت می‌گیرد. در طول این تحول آنتالپی هوا ممکن است کاهش یا افزایش یابد و یا تغییر نکند، مثلاً اگر بخار داغ به هوا اضافه شود آنتالپی هوا افزایش می‌یابد. رطوبت هوا نیز پس از رطوبت زنی می‌تواند افزایش یا کاهش یافته و یا اصلاً تغییر نکند (فیض‌اله‌زاده اردبیلی، ۱۳۹۳).



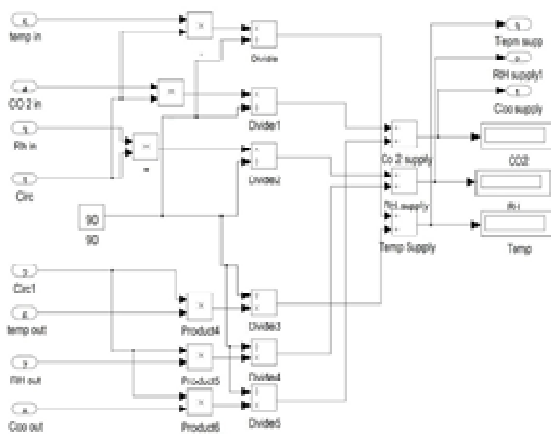
## ۲-۲- مدل‌سازی

مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی متلب، که یک واسطه گرافیکی مبتنی بر روابط ریاضی است، و با به کارگیری روابط مربوطه انجام گرفت. شکل ۱ نشان دهنده دیاگرام‌های حاصل از نرم‌افزار مدل‌سازی متلب برای سیستم هواسازی می‌باشد.



شکل ۱: دیاگرام حاصل از نرم‌افزار متلب برای سیستم هواسازی

شکل ۲ نشان دهنده عملکرد موقعیت دریچه‌های هواساز بوده که با توجه به شکل عملکرد دریچه‌ها به دمای محیط بیرون و رطوبت نسبی محیط بیرون وابسته بوده که در نهایت با استفاده از ادغام دو هوای محیط داخل و بیرون می‌تواند شرایط ایده‌آل را به وجود آورد.



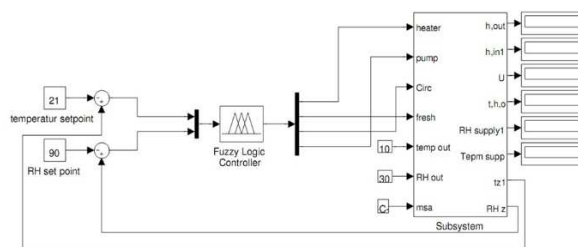
شکل ۲: دیاگرام مربوط به دریچه‌های هواساز

## ۲-۳- کنترل فازی

سادگی و انعطاف پذیری سیستم‌ها فازی آن را قادر ساخته تا با استفاده از قوانین برپایه دانش، پیشرفت‌های تئوریک در تمامی زمینه‌های علمی را به وجود آورد. سیستم فازی از سه بخش شامل بخش فازی ساز، بخش استنتاج کننده فازی و بخش غیرفازی ساز، تشکیل شده است. ورودی در بخش فازی ساز تبدیل به داده‌های فازی شده و در قسمت استنتاج کننده فازی



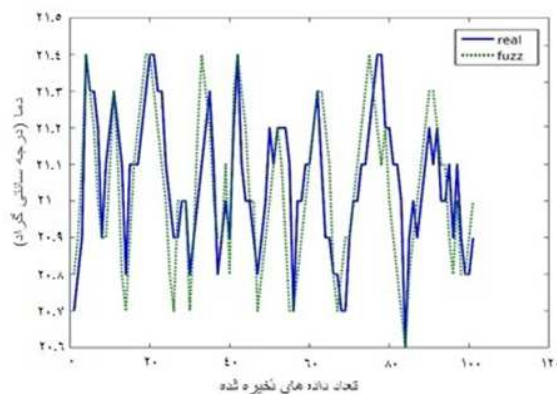
بر اساس قوانین IF-Then پردازش شده و بهترین تصمیم گرفته شده و در قسمت غیر فازی ساز، تبدیل به داده‌هایی می‌شوند که سیستم قادر به شناسایی آن باشد که این داده‌ها به عنوان خروجی فازی شناخته می‌شوند. هرکدام از این سه بخش یاد شده دارای روش‌های مختلفی می‌باشند که می‌توان از بین آن‌ها بهترین روش را بر اساس نیاز سیستم انتخاب کرد (فیض‌الزاده اردبیلی، ۱۳۹۳). مدل فازی ارائه شده دارای دو ورودی شامل: دما و رطوبت نسبی، چهار خروجی شامل: دبی آب داخل کویل‌ها، دبی پمپ تامین رطوبت، موقعیت دریچه هوای چرخشی در سالن و موقعیت دریچه هوای تازه ورودی به سالن. سیستم فازی بر اساس موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز مثلثی و غیرفازی‌ساز مرکز ثقل، طراحی شد. سیستم کلی مجموعه با به کارگیری کنترل فازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



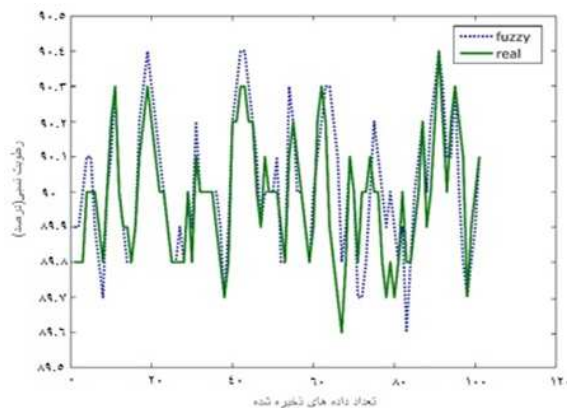
شکل ۳: سیستم کلی مدل

### ۳- بحث و نتایج

شکل‌های ۴ و ۵ نشان دهنده‌ی خروجی مربوط به پارامترهای مورد نظر در شرایط واقعی و سیستم مدل شده را برای دو پارامتر دما و رطوبت نسبی خروجی از سیستم هواساز را نشان می‌دهند.



شکل ۴: خروجی دما برای سیستم‌های واقعی و مدل



شکل ۵: خروجی دما برای سیستم‌های واقعی و مدل

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم، پارامترهای مقایسه‌ای شامل میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین خطای نسبی (MAPE) مطابق جدول ۱ محاسبه شدند.

جدول ۱: نتایج حاصل از پارامترهای مقایسه‌ای

دما	رطوبت نسبی	
۰/۱۱۲۸	۰/۰۸۹۱	MAE
۰/۱۴۴۸	۰/۱۲۶۶	RMSE
۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۱	MAPE

جدول ۲ نشان دهنده مقادیر میانگین مربوط به پارامترهای تحت کنترل در دو سیستم مدل و واقعی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: میانگین پارامترهای خروجی

مقدار میانگین	سیستم کنترلی
۲۱/۰۳-۲۱/۰۶	واقعی-مدل (دما)
۹۰/۰۱-۸۹/۹۰	واقعی-مدل (رطوبت)



#### ۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق مدل‌سازی یک سیستم هواساز و مقایسه عملکرد آن با شرایط واقعی برای استفاده در فرایندهای مدل‌سازی بود. این مدل با پیاده سازی شرایط سیستم واقعی طراحی شد و از کنترل کننده فازی جهت کنترل دو پارامتر خروجی از هواساز (دما و رطوبت نسبی)، استفاده گردید. با توجه به اینکه همیشه شرایط واقعی تحت تاثیر عوامل بیرونی و خطاهای موجود می‌باشد، بنابراین وجود اختلاف بین خروجی مدل و خروجی شرایط واقعی امری طبیعی به نظر می‌رسد؛ با این حال پارامترهای مقایسه‌ای نشان دهنده دقت سیستم مدل‌شده بوده که می‌تواند پارامترها را کنترل کرده و نقطه تنظیم را بهتر از سیستم واقعی دنبال کند. با توجه به میانگین مقادیر بدست آمده از دو سیستم کنترلی، می‌توان گفت میانگین مقادیر مربوط به سیستم کنترلی مدل‌شده، نزدیک به نقطه تنظیم است بنابراین می‌توان گفت این سیستم مدل‌شده توانایی پاسخ به فرایندهای مدل‌سازی در زمینه سیستم‌های تهویه مطبوع را دارا می‌باشد.

#### منابع و مأخذ

۱. فیض‌اله زاده اردبیلی، س. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی و مقایسه سامانه‌های کنترل محیط سالن‌های پرورش قارچ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مهندسی ماشین‌های کشاورزی. دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
2. ASHRAE. 1999. ASHRAE Handbook: Heating Ventilating and Air-conditioning Applications. A: American Society of Heating, refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta.
3. Lu.L, Cai.W , Chai.Y and Xie.I. 2005. Global optimization for overall HVAC systems—Part I problem formulation and analysis. Energy Conve. Management. Vol. 46, 999–1014.
4. Holman. J P. 2010. Heat transfer. 10th edition. Newyork. S4Carlisle Publishing Services. R. R. Donnelley. Jefferson City, MO.
5. Afram.A, Janabi-sharifi.F. 2014. Theory and applications of HVAC control systems e a review of model predictive control (MPC). Build, Env. Vol 72, 343-355.
6. Chen.Y, Treado. S. 2014. Development of a simulation platform based on dynamic models for HVAC control analysis. Energy Build. Vol 68, 376–386.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Modelling of controlling system for operational parameters of HVAC systems

### Abstract

HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems are widely used in buildings and industries agriculture. Basis of working in the heating and cooling systems are heat exchanging between fluids. Heat exchanging is doing between two fluids with different temperatures. The aim of this study is to model and compare it with the actual conditions of an air conditioning system for use in the modeling processes. Simulation of system is done for both temperature and relative humidity using Simulink part of MATLAB software with mathematical modeling of the heat exchangers. The model system operates based on fuzzy control system that designed with the obtained data by different precise sensors over timescales. The outputs from the model and the actual air conditioning system are compared using comparing parameters include Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage/Relative error (MAPE). The obtained results from mean comparison and the comparison parameters for two controlled systems indicate the average values of the model system is close to the set point value and it can control the situation well.

**Keywords:** Fuzzy control, Heat exchanging, HVAC systems, Model system.