

## طراحی سیستم کنترل هوشمند جدید جهت تهویه هوای ساختمان به منظور کاهش اتلاف انرژی

جعفر طاوسی<sup>۱\*</sup>

[j.tavoosi@ilam.ac.ir](mailto:j.tavoosi@ilam.ac.ir)

مجید ولی زاده<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۵

### چکیده

**زمینه و هدف:** امروزه به دلیل رشد جمعیت، نیاز روزافزون بشر و افزایش دمای سالیانه کره زمین، مصرف انرژی همواره روبه افزایش است. یکی از مصرف کنندگان عمده انرژی، ساختمان‌های با زیربنای بالای ۲۰۰۰ مترمربع هستند. بنابراین کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها بایستی بسیار مورد توجه قرار گیرد. به عبارت دیگر، هدف از این مقاله کنترل سیستم سرمایش در تابستان و کنترل سیستم گرمایش در زمستان است به نحوی که وضعیت دما و رطوبت کنونی اتاق در نظر گرفته شود و جهت اینکار از منطق فازی استفاده می‌شود.

**روش بررسی:** در این تحقیق، کنترل منطق فازی برای سیستم تهویه هوای ساختمان جهت افزایش بازده انرژی و تامین محیط راحت بررسی شده است. یک مدل تئوریک از واحد فن کویل<sup>۲</sup> و انتقال حرارت بین هوا و سیال خنک‌کننده استخراج می‌گردد. متغیرهای کنترلی، دمای اتاق و رطوبت نسبی و نتایج کنترلی، درصد نرخ جریان آب خنک و گرم شده در تابستان و درصد نرخ جریان آب داغ و بخار تزریقی در زمستان هستند.

**یافته‌ها:** در این پژوهش متوجه شدیم که با استفاده از کنترل کننده هوشمند و منطبق بر سیستم فازی، می‌توان تا بالای ۹۰٪ از اتلاف انرژی جلوگیری کرد.

**بحث و نتیجه‌گیری:** نتایج کنترل فازی با کنترل متداول تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر<sup>۳</sup> مقایسه می‌گردد. ثابت می‌شود که کنترل کننده فازی کارایی بیشتری داشته و موجب مصرف انرژی کمتری در مقایسه با کنترل PID است.

**واژه‌های کلیدی:** کاهش اتلاف انرژی، فن کویل آب-خنک، کنترل هوشمند.

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

2- Fan Coil Unit (FCU)

3- Proportional Integral Derivative (PID)

## **Designing a new intelligent control system for ventilation of buildings to reduce energy dissipation**

**Jafar Tavoosi**<sup>1\*</sup>

[j.tavoosi@ilam.ac.ir](mailto:j.tavoosi@ilam.ac.ir)

**Majid Valizadeh**<sup>1</sup>

Admission Date: July 26, 2020

Date Received: December 28, 2019

### **Abstract**

**Background and Objective:** Today, energy consumption is on the rise due to population growth, growing human needs, and rising global temperatures. One of the major consumers of energy is buildings with an infrastructure of more than 2,000 square meters. Therefore, reducing energy consumption in buildings should be given much attention. In other words, the purpose of this paper is to control the cooling system in summer and to control the heating system in winter so that the current temperature and humidity of the room are taken into account.

**Material and Methodology:** In this study, fuzzy logic control for building air conditioning system to increase energy efficiency and provide a comfortable environment has been investigated. A theoretical model is extracted from the fan coil unit and the heat transfer between the air and the cooling fluid. The control variables are room temperature and relative humidity and control results, the percentage of cooled and heated water flow rate in summer and the percentage of hot water flow rate and injection steam in winter.

**Findings:** In this study, we found that by using an intelligent controller and compatible with the fuzzy system, up to 90% of energy loss can be prevented.

**Discussion and Conclusion:** Fuzzy control results are compared with conventional proportional-integral-derivative control. Fuzzy controllers are proven to be more efficient and consume less energy than PID controls.

**Keywords:** Reducing energy dissipation, Fan coil water-cooled, Intelligent control.

## مقدمه

خنک کننده از نوسانات قابل توجهی در عملکرد خود رنج می برد که منجر به کاهش بسیار در کارایی آن می شود. همچنین از شبکه عصبی فازی جهت کنترل دما به وفور استفاده شده که می تواند نشانه توانایی این ابزارها در کنترل سیستم های حرارتی باشد (۳۲-۳۰).

هدف از این تحقیق، توسعه یک کنترل کننده ی منطق فازی برای سیستم تهویه هوا در ساختمان های مسکونی است، تا هم دمای اتاق و هم نسبت رطوبت کنترل گردد. طی فعالیت های بار کامل و بخشی در تابستان و زمستان، عملکرد کنترل پیشنهادی با کنترل PID مقایسه شده است. در جدول ۱ علائم استفاده شده در روابط ریاضی بیان شده اند.

## جدول ۱- علائم

Table 1. Symptoms

$B_h$	نسبت قسمت باز شیر آب داغ، %
$B_s$	نسبت قسمت باز شیر بخار، %
$B_w$	نسبت قسمت باز شیر آب خنک شده، %
$C_v$ و $C_p$	حرارت ویژه، kJ/kg K
$E_H$	خطای رطوبت مطلق، g <sub>w</sub> /kg <sub>a</sub>
$E_T$	خطای دمای اتاق، °C
$h_{fg}$	گرمای نهان آب، kJ/kg <sub>w</sub>
$h_a$	آنتالپی ویژه هوا، kJ/kg
$K_d$	ضریب کنترل مشتق گیر
$K_i$	ضریب کنترل انتگرال گیر
$K_p$	ضریب کنترل تناسبی
$m^\circ$	نرخ جریان جرم، kg/s
$m_{WR}$	نسبت نرخ جریان جرم آب، kg/s
$M_{ar}$	نسبت نرخ جریان جرم هوا، kg/s
QS	نسبت هوای بیرون
Q	ظرفیت خنک کاری کویل، kW
$Q_R$	بار خنک کاری اتاق، kW
RLH	گرمای نهان اتاق، kW
RSH	گرمای محسوس اتاق، kW

اهمیت تحلیل استراتژی های عملکردی و عملیاتی سیستم های HVAC<sup>۱</sup> جهت استفاده بهینه از انرژی، در حال افزایش است (۱). مطالعه درباره پارامترهای سیستم های HVAC نظیر دما و حجم و استراتژی های کنترلی در ۵۰ سال اخیر نشان داده که با کمینه ساختن مصرف انرژی، عملکرد سیستم های HVAC بهبود می یابد. رویکردهای مختلف برای کنترل سیستم های داخل ساختمان را می توان در حالت کلی به دو دسته ی روش های متداول و روش های محاسباتی هوشمند طبقه بندی کرد (۵-۲). مطالعه درباره کنترل PID کلاسیک سیستم HVAC که دارای دو ناحیه با خواص متفاوت است، پرداخته شده است (۶). در این تحقیق، پارامترهای PID برای کمینه ساختن خطای سیستم محاسبه شده، اما خطای حالت پایدار به طور کامل حذف نگردیده است. اگرچه این کنترل باعث بهبود وضعیت شد، اما انتخاب نامناسب بهره های کنترل PID می تواند باعث ناپایداری کل سیستم گردد. بنابراین، طراحان به سراغ روش های کنترلی بهینه (۹-۷)، پیشبین، یا تطبیقی (۱۲-۱۰) رفتند. در سیستم های کنترل هوشمند، به مدل ریاضی سیستم نیاز نیست (۱۶-۱۳). اخیراً کاربردهای عملی کنترل هوشمند برای سیستم های گرمایش و تهویه هوا (HVAC) با هدف بهبود عملکرد نسبت به کنترل های کلاسیک، مورد بررسی قرار گرفته است (۱۹-۱۷). از جمله این روش ها می توان به سیستم های خبره، شبکه های عصبی (۲۰)، منطق فازی (۲۶-۲۱) و الگوریتم ژنتیک اشاره کرد.

یک کویل خنک کننده و مرطوب کننده، بخش اصلی هر سیستم تهویه هوا به شمار می رود. در سیستم های تهویه هوا، کنارگذر هوای کویل و کنترل جریان آب خنک، دو ابزار برای کنترل دمای محیط به هنگام فعالیت بار بخشی هستند. در ادبیات فن، گزارش های بسیاری درباره مدل سازی کویل خنک کننده وجود دارد (۲۹-۲۷). با وجود این، فعالیت بسیار اندکی در ارتباط با عملکرد کویل های خنک کننده ی خنک شونده با آب طی فعالیت های بار-بخشی منتشر شده است. در این حالت، کویل

۱. دو چیلر که هر یک دارای ظرفیت خنک‌کنندگی ۱۰۰ تن با برج خنک‌کننده هستند تا آب خنک شده را برای کویل‌های خنک‌کننده فراهم کنند.
۲. یک بویلر برای تامین آب داغ جهت گرم کردن کویل‌ها و تامین بخار مورد نیاز برای مرطوب کننده بخار.
۳. در هر طبقه، ۱۸ واحد فن‌کویل (FCU) وجود دارد که هر کدام برای یک اتاق است.

واحد فشرده‌ی فن‌کویل، یک فن‌کویل چهار-لوله‌ای با کویل گرمایشی آب-داغ، کویل خنک‌کننده‌ی آب-خنک، و یک مخلوط‌کننده‌ی هوای-بیرون را شبیه‌سازی می‌کند. واحدهای فن‌کویل، واحدهای تجهیزات ناحیه‌ای هستند که به سایر قطعات متصل می‌گردند. فن‌کویل‌ها دارای یک مخلوط‌کننده‌ی هوای-بیرون، یک فن، یک کویل-گرمایشی ساده و یک کویل-خنک‌کننده هستند. واحد فن-کویل از طریق کویل آب-داغ خود به چرخه آب-داغ (سمت تقاضا) و از طریق کویل -خنک‌کننده‌ی خود به چرخه آب-خنک شده (سمت تقاضا) وصل می‌شود. این واحد کنترل می‌شود تا تقاضای گرمایشی یا خنک‌کاری ناحیه مربوطه را تامین کند (شکل (۲)).

۴. علاوه بر FCU، یک مرطوب‌کننده‌ی بخار در هر اتاق وجود دارد تا نسبت رطوبت آن در زمستان کنترل گردد.

T	دما، K
t	دما، °C
$t_{db}$	دمای حباب-خشک هوا، °C
$t_{wb}$	دمای حباب-مرطوب هوا، °C
$W_a$	نسبت رطوبت
$\rho_a$	چگالی هوا، $kg/m^3$
$\rho_w$	چگالی آب، $kg/m^3$
$\tau$	زمان، s

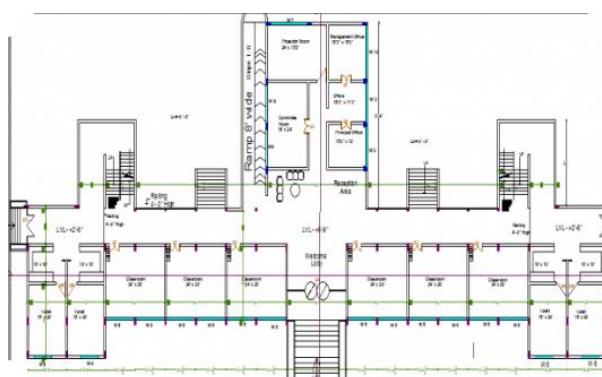
## ۲. روش پیشنهادی

در این بخش سیستم مورد مطالعه و معادلات حاکم بر آن کاملاً تشریح داده شده و عوامل موثر بر رفتار آن بیان می‌شوند.

### ۱.۲. مدل سیستم مورد مطالعه

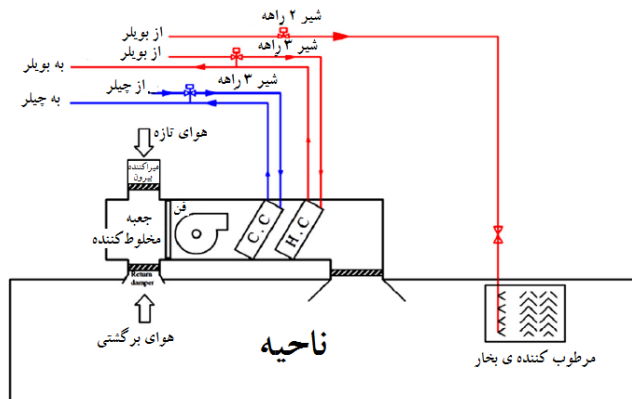
برای سیستم مدیریت ساختمان، ساختمان کتابخانه مرکزی شهر ایلام (سال ۱۳۹۸) به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب گردید. این ساختمان در داخل شهر ایلام قرار دارد. این ساختمان دارای ۵ طبقه (ناحیه) است که در هر طبقه، هجده اتاق، سه راهرو و یک پذیرایی وجود دارد (شکل (۱)). این ساختمان مشابه هتل‌ها، استراحتگاه‌ها و بانک‌ها می‌باشد. این نوع ساختمان‌ها دارای نواحی با نقاط تنظیم متفاوت و بارهای محسوس و گرمایشی هستند. سیستم تهویه مرکزی عبارتست

از:



شکل ۱- پنج طبقه همسان ساختمان نمونه

Figure 1. Five floors of the same building



شکل ۲- شکل شماتیک کنترل FCU با سیگنال کنترلی بالانس گرمای اتاق

Figure 2. Schematic diagram of FCU control with room heat balance control signal

که لوله‌های هر چرخه به یکدیگر وصل می‌شوند. برای این نوع آرایش کویل، دمای هوای داغ و آب خنک شده، در هر دریف و بالای ردیف‌های چرخه تغییر خواهد کرد. هوای مرطوب کنترل می‌شود تا در یک آرایش با جریان عرضی یا جریان موازی، با آب خنک‌کاری جریان یابد. در شرایط حالت پایدار، با بالانس گرما و جرم حجمی می‌توان معادلات حاکم بر کویل خنک‌کننده را استخراج کرد (۲۸).

### تحلیل کویل-گرمایش

تحلیل کویل-گرمایش مشابه کویل-خنک‌کننده است، به جز این‌که از کویل-خنک‌کننده برای حذف هر دو گرمای محسوس و نهان استفاده می‌شود (دما و رطوبت مطلق را بطور همزمان کاهش می‌دهد) در حالیکه کویل-گرمایش صرفاً برای تنظیم گرمای محسوس استفاده می‌شود (صرفاً دما افزایش می‌یابد و رطوبت مطلق ثابت باقی می‌ماند). فرایند مرطوب‌سازی را می‌توان با افزودن مستقیم بخار به هوا انجام داد. این روش یک فرایند ایزوترمال است، چراکه دمای هوا با افزودن رطوبت، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. برای این نوع سیستم مرطوب‌سازی، منبع بخار معمولاً یک بویلر بخار مرکزی با فشار پایین است.

هنگامی که بخار از یک منبع با فشار ثابت تامین می‌شود، مرطوب‌سازی به سرعت به تقاضای سیستم پاسخ می‌دهد. در پاسخ به سنسور/کنترل‌کننده‌ی رطوبت، یک شیر کنترل می‌تواند تنظیم‌کننده یا دو-موقعیتی باشد. در زمستان بخار به هوای گرم شده تزریق می‌شود تا رطوبت نسبی فضا در حد مقادیر مطلوب باقی بماند (۲۹).

نرخ تغییر دمای اتاق، برابر تغییر گرمای ناشی از گرمای خارج شده از فضا و نرخ تغییر دمای ناشی از گرمای محسوس در اتاق است.

$$M.Cv.dT_r/dt = RSH - m_a.C_p.(T_r - T_s) \quad (1)$$

بطور مشابه، نرخ تغییر رطوبت اتاق برابر رطوبت خارج شده از اتاق و بار رطوبت اتاق است.

$$M.hfg.dwr/dt = RLH - m_a.hfg.(wr - ws) \quad (2)$$

که  $M = p.V$  و  $T_s$  و  $w_s$  به ترتیب دمای هوای تامین و نسبت رطوبت هستند.

معادلات دیفرانسیلی (۱) و (۲) حل می‌شوند تا شرایط اتاق به عنوان تابعی از زمان بدست آید. از رابطه زیر برای ارتباط دادن نسبت رطوبت،  $w$ ، به دمای  $T$  و آنتالپی  $h_a$  استفاده می‌شود:

$$h_a = 1.006T + w(2501 + 1.805T) \quad (3)$$

با فرض این‌که نسبت هوای بیرون،  $OS$ ، نسبت رطوبت هوای مخلوط شده،  $w_m$ ، آنتالپی،  $h_m$ ، و دما،  $T_m$ ، باشند، لذا معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$Wm = w(I - OS) + Wos.OS \quad (4)$$

$$hm = ha(I - OS) + hos.OS \quad (5)$$

### تحلیل کویل - خنک‌کننده

تحلیل مبدل گرمای لوله پره‌دار به شرطی انجام می‌شود که تغییر ضریب انتقال گرمای لایه نازک در سمت هوای کویل به عنوان تابعی از عدد رینولدز بیان شود. کویل باید به چند چرخه تقسیم شود. هر چرخه می‌تواند یک ستونی یا چند ستونی باشد

۲.۲. کنترل منطق فازی

از واحد فن-کویل برای نگه داشتن خطای دمای اتاق ( $E_T$ ) و خطای رطوبت اتاق ( $E_H$ ) برابر مقدار صفر استفاده می‌شود. که در این صورت:

$$E_T = T - T_r$$

$$E_H = H - H_r$$

و

$T_r$ : دمای اتاق (سنسور دما)

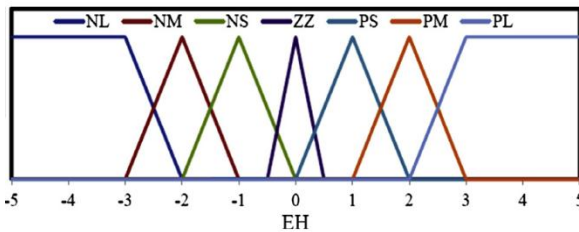
$H_r$ : رطوبت اتاق (سنسور رطوبت نسبی)

$T$ : دمای نقطه تنظیم

$H$ : رطوبت نسبی نقطه تنظیم

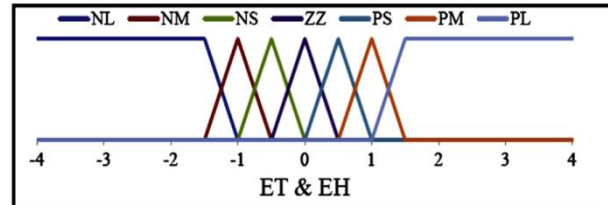
در فصل تابستان، ورودی‌های کنترلی ( $ET$ ) و ( $EH$ ) هستند درحالی‌که خروجی‌ها، درصد بازشدگی شیر تنظیم‌کننده‌ی آب-خنک‌کاری ( $Bw$ ) جهت حذف خطای رطوبت نسبی ( $EH$ ) و درصد بازشدگی شیر تنظیم‌کننده‌ی آب-داغ ( $Bh$ ) جهت حذف خطای دما ( $ET$ ) هستند. در فصل زمستان، ورودی‌های کنترلی ( $ET$ ) و ( $EH$ ) هستند درحالی‌که خروجی‌ها، درصد بازشدگی شیر تنظیم‌کننده‌ی آب-داغ ( $Bh$ ) جهت حذف خطای دما ( $ET$ ) و درصد بازشدگی شیر تزریق بخار ( $BS$ ) جهت حذف

خطای رطوبت ( $EH$ ) هستند. در این تحقیق از مدل Mamdani برای مدل‌سازی تطابق فازی، استنباط، ترکیب و غیرفازی‌سازی استفاده شده است. به علت درجه بالای غیرخطی بودن سیستم، تنظیم توابع عضویت-فازی خروجی در مدل Mamdani نتایج بهتری نسبت به تنظیم توابع عضویت عددی ( $crisp$ ) خروجی در مدل Sugeno ارائه می‌دهد (۳۵-۳۳). با آزمون انواع مختلفی از توابع عضویت، مشخص گردید که تابع عضویت مثلثی ( $trimf$ ) بهترین انتخاب است چراکه باعث خطای حداقلی شده و بهترین پاسخ را ارائه می‌دهد. توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. برای خطای دما ( $ET$ ) و خطای رطوبت ( $EH$ )، حروف  $N, Z, P$  به ترتیب به معنی منفی، صفر و مثبت هستند و حروف  $S, M, L$  نیز به ترتیب به معنی کوچک، متوسط و بزرگ می‌باشند. فضاهای گفتاری  $Bw, Bh, BS$  تقسیم شدند تا نشان‌دهنده‌ی درصد بازشدگی شیر باشند. اسم توابع عضویت صرفاً جهت شناسایی انتخاب شده است. برای سیستم فازی فصل تابستان، ۵۵ قانون و برای سیستم فازی زمستان، ۲۰ قانون توسعه داده شد.



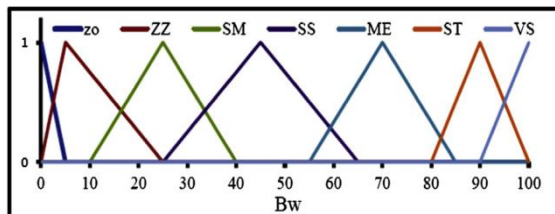
شکل ۳- (ب): تابع عضویت زمستان برای EH

Figure 3. (B): Winter membership function for EH



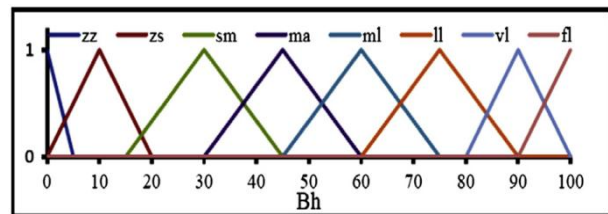
شکل ۳- (الف): تابع عضویت تابستان برای هر دو خطای دما و رطوبت

Figure 3. (A): Summer membership function for both temperature and humidity lines



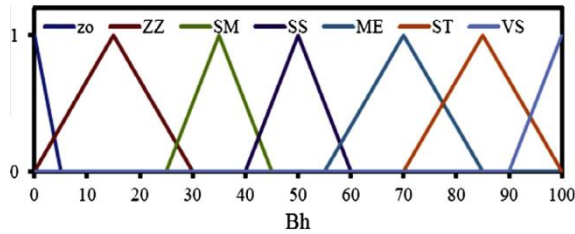
شکل ۳- (ج): تابع عضویت تابستان برای Bw

Figure 3. (D): Summer membership function for Bw



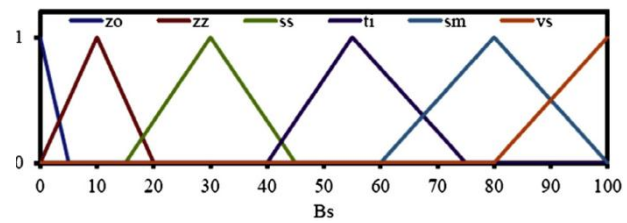
شکل ۳- (پ): تابع عضویت تابستان برای Bh

Figure 3. (C): Summer membership function for Bh



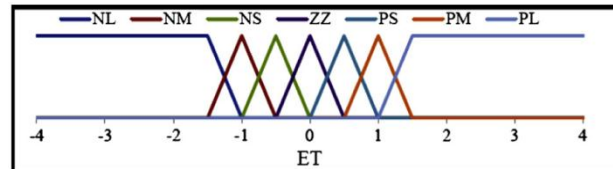
شکل ۳- (ذ): تابع عضویت زمستان برای Bh

Figure 3.(F): Winter membership function for Bh



شکل ۳- (د): تابع عضویت زمستان برای Bs

Figure 3.(E): Win membership function for Bs



شکل ۳- (ر): تابع عضویت زمستان برای ET

Figure 3.(G): Win membership function for ET

### نتایج

#### ۱. نتایج تابستان

تنظیم شده خواهد شد. در نهایت به یک افزایش در نرخ جریان آب داغ نیاز است تا دمای فضا نیز تنظیم شود.

#### نتایج تابستان در بار کامل

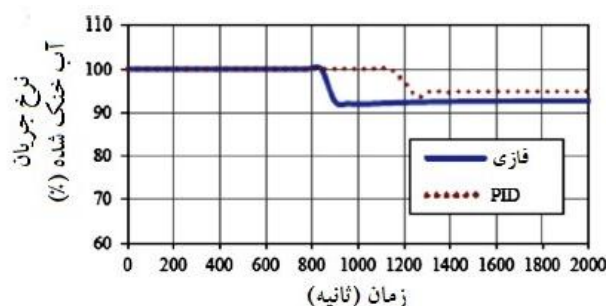
هر دو کنترل فازی و PID می‌توانند دما و رطوبت نسبی اتاق را پس از زمان گذرای ۸۰۰ ثانیه برای دما و ۱۶۰۰ ثانیه برای رطوبت نسبی (برای هر دو کنترل فازی و PID)، در مقادیر مطلوب نگه دارند. در کنترل فازی، خطاهای حالت پایدار برای دما و رطوبت، به ترتیب برابر  $0.091^{\circ}\text{C}$  و  $-0.097\text{g/kg}$  بود. اما برای کنترل PID این خطاها به ترتیب برابر  $0.102^{\circ}\text{C}$  و  $-0.119\text{g/kg}$  بودند. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب پاسخ‌های دو کنش کنترلی را نشان می‌دهند؛ به ترتیب، درصد نرخ جریان آب-خنک‌شده و درصد نرخ جریان آب-داغ عبوری از کویل‌های خنک‌کننده و گرمایشی. نرخ جریان آب-خنک‌شده برای PID برابر ۱۰۰٪ برای ۱۲۰۰ ثانیه است که بعداً به ۹۴/۶۶٪ افت می‌کند و در این مقدار ثابت باقی می‌ماند. کنترل فازی با شیر کاملاً باز برای ۸۵۰ ثانیه شروع می‌کند و سپس این مقدار در ۹۱/۵۳٪ کنترل می‌شود. این حالت باعث می‌شود خطای رطوبت در کنترل فازی اندکی بیشتر از کنترل PID باشد. برای رسیدن به مقادیر مطلوب دما، به فرایند پیش‌گرمایش نیاز خواهد بود. بنابراین در کنترل PID، درصد نرخ جریان آب-داغ برابر ۱۰/۳۵٪ است که بیشتر از مقدار مربوط به کنترل فازی

شبه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار MATLAB برای هر دو کنترل فازی و PID انجام شده است، که در آنها، شرایط مطلوب عبارت بود از دمای  $24^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۵۰٪ (رطوبت مطلق برابر  $9/3 \text{ gw/kg}_a$  است). ضرایب کنترل PID با استفاده از روش Ziegler Nichols بدست آمد. ضرایب کنترل PID ( $K_p$ ،  $K_i$  و  $K_d$ ) برای فصل تابستان به ترتیب برابر ۰/۳۵، ۰/۰۳۸، ۱۵ و برای کنترل Bw و ۱۷ و ۰/۰۳، ۴/۷ برای کنترل Bh به دست آمدند. برای کنترل PID مربوط به فصل تابستان، هر دو کویل خنک‌کننده و رطوبت‌گیر، دما و رطوبت هوا را کاهش دادند. به علت این که معمولاً کاهش در دما بیشتر از کاهش در رطوبت است، بنابراین لازم است از فرایند پیش‌گرمایش استفاده شود. ورودی‌های کنترل‌کننده، (ET) و (EH) و خروجی‌های آن، Bw و Bh هستند. اولین کنش Bw در PID کویل-خنک‌کننده، برآورده ساختن تقاضای رطوبت است درحالی که کنش Bh در PID زمانی فعال خواهد شد که دمای اتاق کمتر از دمای تقاضا (خطای دمای مثبت) شود. طی فصل تابستان، هم دما و هم رطوبت محیط بیرون بیشتر از مقادیر مطلوب است. ابتدا جریان آب-خنک شده افزایش می‌یابد تا رطوبت نسبی فضا تنظیم گردد که همواره منجر به کاهش در دمای فضا، به میزانی کمتر از مقدار

بزرگتر از مقادیر مربوط به کنترل فازی است.

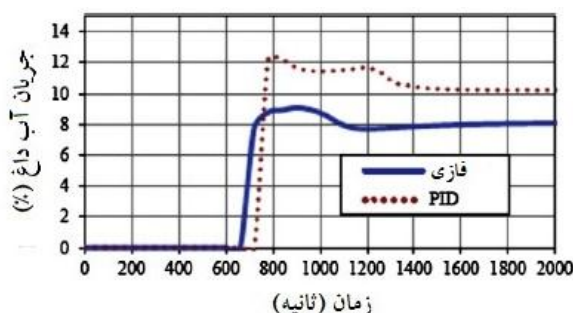
۸/۴۷٪ می‌باشد. لازم به ذکر است که خروجی‌های کنترلی

کنترل‌کننده‌ی PID برای هر دوی آب-خنک‌شده و آب-داغ



شکل ۴-الف): تغییرات درصد جریان آب - خنک شده در شرایط طراحی در تابستان

Figure 4. (A): Changes in the percentage of water flow - cooled in design conditions in summer



شکل ۴-ب): تغییرات درصد جریان آب - داغ در شرایط طراحی در تابستان

Figure 4. (B): Changes in the percentage of hot-water flow in design conditions in summer

سیستم فازی، دمای اتاق را بهتر از کنترل PID در مقدار مطلوب ( $24^{\circ}\text{C}$ ) کنترل می‌کند. با افزایش بار محسوس و کاهش بار نهان، خطای دما کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰، خطای نهایی رطوبت اتاق نشان داده شده است. سیستم کنترل PID باعث می‌شود رطوبت مطلق نزدیک به مقدار مطلوب ( $\text{g/kg}$ ) باشد. اما کنترل فازی، خطای بزرگتری نسبت به کنترل PID نشان می‌دهد. با افزایش بار محسوس و کاهش بار نهان، خطا کاهش می‌یابد. شکل ۸ افزایش ظرفیت خنک‌کاری با افزایش هر دو بار محسوس و نهان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش بار نهان و کاهش بار محسوس، ظرفیت گرمایشی افزایش می‌یابد. ظرفیت گرمایشی تقاضا شده توسط کنترل فازی بیشتر از مقدار مربوط

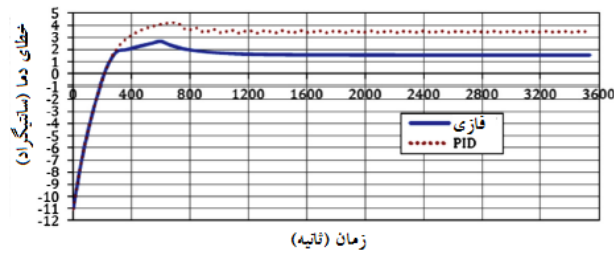
تاثیر کاهش دمای محسوس و نهان اتاق در عملکرد سیستم

شکل‌های ۵-الف) تا ۵-د)، عملکرد سیستم را برای ۵۰ درصد از گرمای محسوس مطلوب و گرمای نهان مطلوب نشان می‌دهند. سیستم کنترل فازی، کنش‌های خود را تنظیم می‌کند تا به حداقل خطا هم در دما و هم در رطوبت دست یابد. مقدار نهایی دما،  $1/53^{\circ}\text{C}$  کمتر از مقدار مطلوب است درحالی‌که مقدار نهایی رطوبت،  $0/23 \text{ g/kg}$  بیشتر از مقدار مطلوب می‌باشد. در سیستم کنترل PID، مقادیر نهایی دما،  $3/23^{\circ}\text{C}$  زیر مقدار مطلوب و مقدار خطا برابر  $3/55 \text{ g/kg}$  است.

شکل‌های ۶ تا ۹ خلاصه مقادیر حالت پایدار دما و رطوبت اتاق را همراه با ظرفیت خنک‌کاری و گرمایشی در تابستان با بارهای محسوس و نهان مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که

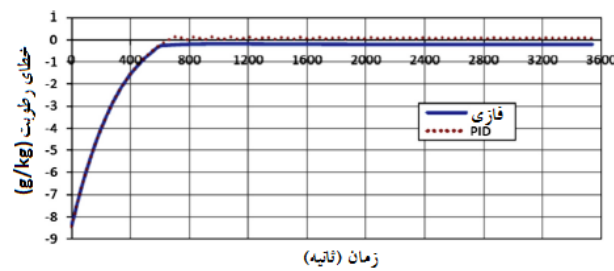


به کنترل PID است که نشان‌دهنده‌ی خطای کمتر دما در سیستم فازی می‌باشد.



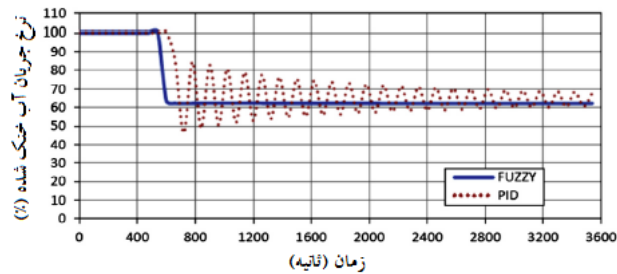
شکل ۵- (الف): تغییرات رطوبت اتاق در تابستان

Figure 5. (A): Changes in room humidity in summer



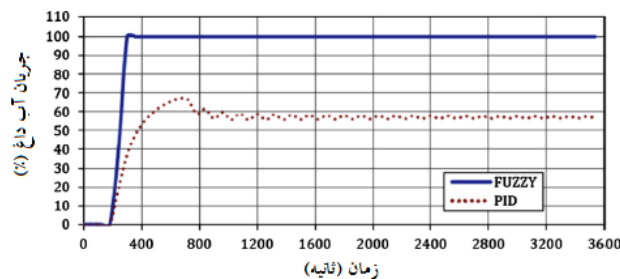
شکل ۵- (ب): تغییرات دما اتاق در تابستان

Figure 5. (B): Changes in room temperature in summer



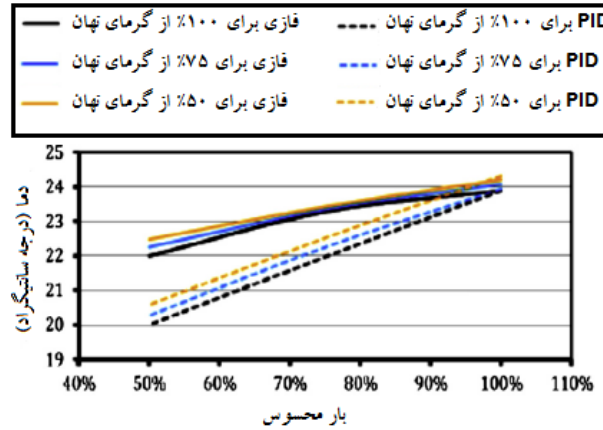
شکل ۵- (ج): تغییرات درصد جریان آب خنک شده تابستان

Figure 5. (C): Changes in the percentage of cooled water flow in summer



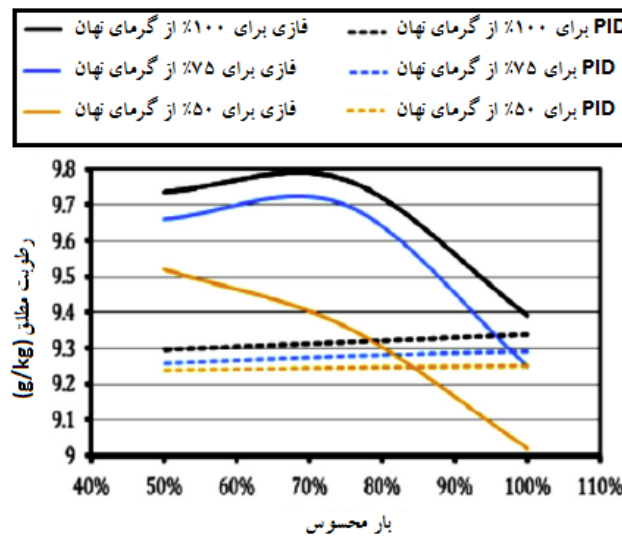
شکل ۵- (د): تغییرات درصد جریان آب داغ شده تابستان

Figure 5. (D): Changes in the percentage of hot water flow in summer



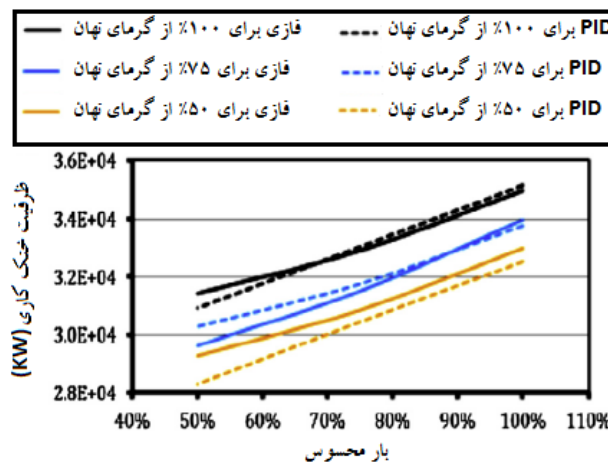
شکل ۶- تغییرات دمای اتاق در بارهای مختلف در تابستان

Figure 6. Changes in room temperature at different times in the summer



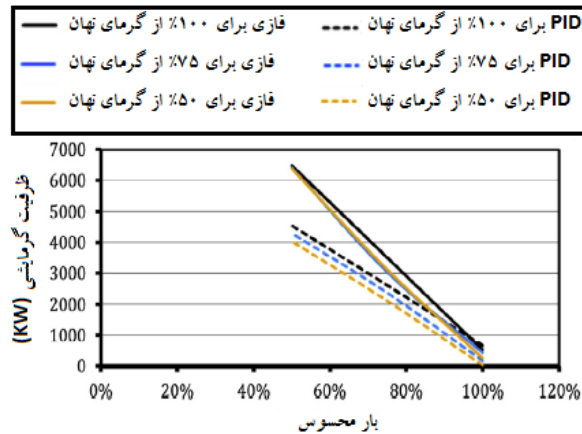
شکل ۷- تغییرات رطوبت اتاق در بارهای مختلف در تابستان

Figure 7. Changes in room humidity at different times in the summer



شکل ۸- تغییرات ظرفیت خنک کاری در بارهای مختلف در تابستان

Figure 8. Changes in cooling capacity at different loads in summer



شکل ۹- تغییرات ظرفیت گرمایشی در بارهای مختلف در تابستان

Figure 9. Changes in heating capacity at different loads in summer

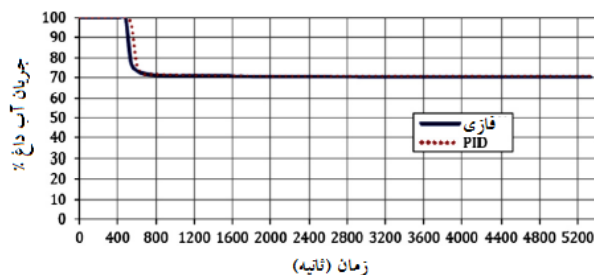
## ۲. کنترل PID زمستان

تنظیم شده خواهد شد. در نهایت به یک افزایش در نرخ جریان آب داغ نیاز است تا دمای فضا نیز تنظیم شود.

### نتایج زمستان در بار کامل

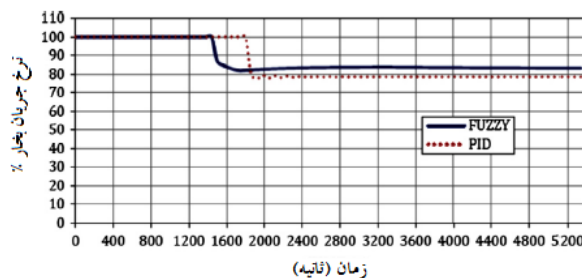
هر دو کنترل فازی و PID می‌توانند دما و رطوبت نسبی اتاق را در مقادیر مطلوب نگه دارند. در کنترل فازی، خطاهای حالت پایدار برای دما و رطوبت، به ترتیب برابر  $1/23^{\circ}\text{C}$  و  $0/92\text{ g/kg}$  بود. در سیستمی که از کنترل PID استفاده می‌کند، مقدار نهایی دما،  $0/3^{\circ}\text{C}$  بالاتر از مقدار مطلوب است، در حالی که مقدار نهایی رطوبت،  $0/92\text{ g/kg}$  کمتر از مقدار مطلوب می‌باشد. زمان نشست پاسخ دما برای هر دو کنترل کننده برابر ۱۰۰۰ ثانیه است. شکل ۱۰-الف) و ۱۰-ب) به ترتیب درصد آب-داغ و بخار عبوری از کویل-گرمایشی و مرطوب‌کننده بخار را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هیچ تفاوتی در درصد نرخ جریان آب-داغ برای دو کنترل کننده فازی و PID وجود ندارد. در مورد نرخ جریان بخار، درصد فازی به اندازه ۴٪ بیشتر از کنترل PID است. درصد حالت پایدار کنترل PID برابر ۷۴٪ می‌باشد.

در زمستان، شرایط مطلوب اتاق عبارت است از دمای  $24^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۵۰٪ (رطوبت مطلق  $8/7\text{ g}_w/\text{kg}_a$ ). ضرایب کنترل PID با استفاده از روش Ziegler Nichols به دست آمدند. ضرایب کنترل PID ( $K_p$ ,  $K_i$  و  $K_d$ ) برای فصل زمستان به ترتیب برابر  $13/6$ ،  $0/00029$  و  $0/27$  برای کنترل Bh و  $6/7$ ،  $0/0009$  و  $12$  برای کنترل Bs به دست آمدند. کویل-گرمایشی، فقط دمای هوا را کاهش می‌دهد در حالی که مرطوب‌کننده بخار، رطوبت هوا را کاهش می‌دهد. ورودی‌های کنترل کننده، (ET) و (EH) و خروجی‌های آن، Bh و Bs هستند. اولین کنش Bh در PID کویل-گرمایشی، برآورده ساختن تقاضای دما است، در حالی که کنش Bs در PID مرطوب‌کننده بخار، برای برآورده ساختن تقاضای رطوبت خواهد بود. طی فصل تابستان، هم دما و هم رطوبت محیط بیرون بیشتر از مقادیر مطلوب است. ابتدا جریان آب-خنک شده افزایش می‌یابد تا رطوبت نسبی فضا تنظیم گردد که همواره منجر به کاهش در دمای فضا، به میزانی کمتر از مقدار



شکل ۱۰-الف): تغییرات درصد جریان آب-داغ در بار کامل زمستان

Figure 10. (A): Changes in the percentage of hot-water flow at full winter load



شکل ۱۰-ب): تغییرات درصد جریان بخار در بار کامل زمستان

Figure 10. (B): Changes in the percentage of steam flow at full winter load

## References

1. He, X., Chen, S., Lv, X., Kim, E.J. 2015. Simplified Model of HVAC Load Prediction for Urban Building Districts, *Procedia Engineering*, Vol. 121, pp. 167-174.
2. Majidzadeh M. 2019. Development of a Modified Energy Saving Glass for Energy Management of Air Conditioning System and Transmission Improvement of In-Service Frequency Bands. *JEM*. 9 (1), pp. 48-55. (In Persian)
3. Khodakarami J, Ghobadi P. 2016. Optimizing of Energy Consumption in an Office Building Equipped with Intelligent Management System. *JEM*. 6 (2), pp.12-23. (In Persian)
4. J. Tavoosi, F. Mohammadi, 2019. Design a new intelligent control for a class of nonlinear systems, 6th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), pp. 1-5.

## نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل کننده منطق فازی برای کنترل دما و درصد رطوبت هر اتاق طراحی شد. متغیرهای کنترل شده، دما و رطوبت نسبی اتاق و پیامدهای کنترلی، درصد نرخ جریان آب خنک شده و آب داغ در تابستان و درصد نرخ جریان آب داغ و بخار تزریقی در زمستان بودند. یک شبیه سازی کامپیوتری برای ساختمان کتابخانه مرکزی ایلام انجام شد و نتایج کنترل فازی با نتایج حاصل از یک کنترل تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر مقایسه گردید. مشخص گردید که کنترل کننده فازی قادر است دما و رطوبت نسبی اتاق را بدون توجه به تغییرات در بارهای محسوس و نهان، در مقدار مطلوب نگه دارد. اما کنترل PID نتوانست دمای اتاق را در شرایط بار تنظیم کند. همچنین مشاهده شد که در شرایط بار و کنترل PID، نرخ جریان آب-خنک شدهی مربوط به کویل خنک کننده دارای پاسخهای نوسانی نامطلوب است. ثابت شد که کارایی کنترل کننده فازی به مراتب بهتر از PID است.

12. Sharifi, A.H., Maghouli, P. 2019. Energy Management of Smart Homes Equipped With Energy Storage Systems Considering the PAR Index Based on Real-Time Pricing, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 45, pp. 579-587.
13. Y. Pour Asad, A. Shamsi, H. Ivani, and J. Tavoosi. 2016. Adaptive Intelligent Inverse Control of Nonlinear Systems with Regard to Sensor Noise and Parameter Uncertainty (Magnetic Ball Levitation System Case Study), *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 9(1), pp. 148-169.
14. Y. Pour Asad, A. Shamsi, and J. Tavoosi. 2017. Backstepping-Based Recurrent Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control for MIMO Systems (MEMS Triaxial Gyroscope Case Study), *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, Vol. 25(2), pp. 213-233.
15. J Tavoosi, M Alaei, B Jahani. 2011. Neuro-Fuzzy Controller for Position Control of Robot Arm", 5th Symposium on Advance in Science & Technology.
16. J Tavoosi, R Azami. 2019. A New Method for Controlling the Speed of a Surface Permanent Magnet Synchronous Motor using Fuzzy Comparative Controller with Hybrid Learning, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 10(3), pp. 57-68.
17. Shahnazari, H., Mhaskar, P., House, J.M., Salsbury, T.I. 2019. Modeling and Fault Diagnosis Design for HVAC Systems Using Recurrent Neural
5. Ahmadzadeh talatapeh, M. 2017. Application of Solar Thermal Collectors to Improve the Energy Performance of the Fresh Air HVAC Systems, *JEM*. Vol. 6, No. 4, pp.:44-53.
6. Zaheer-uddin, A. M., Zheng, G.R., 2000. Optimal Control of Time Scheduled Heating, Ventilating and Air Conditioning Processes in Buildings, *Energy Convers. Manage*, Vol. 41, pp. 49-60.
7. Srivastava, C., Yang, Z., Jain, R. K. 2019. Understanding the Adoption and Usage of Data Analytics and Simulation among Building Energy Management Professionals: A Nationwide Survey, *Building and Environment*, Vol. 157, pp. 139-164.
8. Latif, M., Nasir, A. 2019. Decentralized Stochastic Control for Building Energy and Comfort Management, *Journal of Building Engineering*, Vol. 24.
9. Yoon, S.H., Kim, S.Y., Park, G.H., Kim, Y.K., Cho, C.H., Park, B.H. 2018. Multiple Power-Based Building Energy Management System for Efficient Management of Building Energy, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 42, pp. 462-470.
10. Liu, H., Chen, C., Lv, X., Wu, X., Liu, M. 2019. Deterministic Wind Energy Forecasting: A Review of Intelligent Predictors and Auxiliary Methods, *Energy Conversion and Management*, Vol. 195, pp. 328-345.
11. Khalid, R., Javid, N., Rahim, M.H., Aslam, S., Sher, A. 2019. Fuzzy Energy Management Controller and Scheduler for Smart Homes, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Vol. 21, pp. 103-118.

25. J. Tavoosi, and M. A. Badamchizadeh. 2013. A Class of Type-2 Fuzzy Neural Networks for Nonlinear Dynamical System Identification, *Neural Computing and Applications*, Vol. 23(3-4), pp. 707-717.
26. MS Hesarian, J Tavoosi. 2019. Green Technology used in Finishing Process Study of the Wrinkled Cotton Fabric by Radial Basis Function neurons (Experimental and Modeling analysis), *Advances in Environmental Technology*, Vol. 5 (1), pp. 35-45.
27. Sekhar, C., Anand, P., Schiavon, S., Tham, K.W., Cheong, D., Saber, E.M. 2018. Adaptable Cooling Coil Performance during Part Loads in the Tropics—A Computational Evaluation, *Energy and Buildings*, Vol. 159, pp. 148-163.
28. Wu, Y., Chen, A., Luhung, I., Gall, E.T., Cao, Q., Chang, V.W.C., Nazaroff, W.W. 2016. Bioaerosol Deposition on an Air-Conditioning Cooling Coil, *Atmospheric Environment*, Vol. 144, pp. 257-265.
29. Cui, X., Yang, X., Qin, S., Meng, X., Jin, L., Chua, K.J. 2019. Performance Investigation of an Evaporative Pre-Cooled Air-Conditioning System in Tropics, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 5673-5678.
30. J Tavoosi, M Alaei, B Jahani. "Temperature Control of Water Bath by using Neuro-Fuzzy Controller", 5th Symposium on Advance in Science & Technology 2011.
31. J Tavoosi, M Alaei, B Jahani, MA Daneshwar. 2011. A novel intelligent control system design for water bath temperature control, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5 (12), 1879-1885.
18. Ruano, A.E., Ferreira, P.M. 2014. Neural Network Based HVAC Predictive Control, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 47, No. 3, pp. 3617-3622.
19. Attaran, S.M., Yusof, R., Selamat, H. 2016. A Novel Optimization Algorithm Based on Epsilon Constraint-RBF Neural Network for Tuning PID Controller in Decoupled HVAC System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 99, pp. 613-624.
20. MBB Sharifian, A Mirlo, J Tavoosi, M Sabahi, Self-adaptive RBF neural network PID controller in linear elevator, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011.
21. J. Tavoosi, A. A. Suratgar, and M. B. Menhaj. 2016. Nonlinear System Identification Based on a Self-Organizing Type-2 Fuzzy RBFN, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 54, pp. 26-38.
22. J. Tavoosi, A. A. Suratgar, and M. B. Menhaj. 2016. Stable ANFIS2 for Nonlinear System Identification, *Neurocomputing*, Vol. 182, pp. 235-246.
23. J. Tavoosi, A. A. Suratgar, and M. B. Menhaj. 2017. Stability Analysis of Recurrent Type-2 TSK Fuzzy Systems with Nonlinear Consequent Part, *Neural Computing and Applications*, Vol. 28(1), pp. 47-56.
24. J. Tavoosi, A. A. Suratgar, and M. B. Menhaj. 2017. Stability Analysis of a Class of MIMO Recurrent Type-2 Fuzzy Systems, *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 19(3), pp. 895-908.

34. J Tavoosi. 2020. Hybrid intelligent adaptive controller for tiltrotor UAV, International Journal of Intelligent Unmanned Systems, Vol. 9 (4), pp. 256-273.
35. J Tavoosi. 2020. PMSM speed control based on intelligent sliding mode technique, PMSM speed control based on intelligent sliding mode technique, Vol. 39 (6), pp. 1315-1328.
32. J Tavoosi, MA Badamchizadeh, S Ghaemi. 2011. Adaptive Inverse Control of Nonlinear Dynamical System Using Type-2 Fuzzy Neural Networks, Journal of Control 5 (2), 52-60.
33. J Tavoosi. 2020. An experimental study on inverse adaptive neural fuzzy control for nonlinear systems, International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems, Vol. 24 (2), pp. 135-143.