



## A New Approach to Design and Implementation of Multi-Layer Control in the IoT

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Taebi K.<sup>1</sup> MSc,  
Khanmirza E.\*<sup>2</sup> PhD,  
Emamjomeh M.<sup>2</sup> MSc

#### How to cite this article

Taebi K, Khanmirza E, Emamjomeh M. A New Approach to Design and Implementation of Multi-Layer Control in the IoT. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1255-1269.

### ABSTRACT

In this research, the development of technical knowledge and the implementation of modern control strategies on the IoT platform has been investigated. In this regard, using multi-layer hierarchical control over the IoT platform enables the communication and transfer of information from lower layers to upper layers, and the ability to process data and provide of control solutions considering new conditions from upper layers to lower layers. One of the main applications of this approach is the control of high-inertia systems, by optimizing the local layer by the main layer. For this purpose, a two-layer controller has been considered, that controls the soil temperature and humidity time-delay systems in the bottom layer in the form of PID and IFTTT control, respectively. Meanwhile, the upper layer uses the obtained information and the differential evolution algorithm (DE) and ANFIS controller, adjust the PID controller coefficients applied to the subsystem and IFTTT workstations, respectively. This reduces the size and complexity of the hardware used in the lower layers and consequently reduces the costs involved. It allows the implementation of sophisticated controllers, especially on large-scale plants. On the other hand, it is also possible to control high-inertia systems. The simulation results and practical tests indicated that this control strategy was very effective in IoT platforms.

**Keywords** Multi-Layer Hierarchy Control; Internet of Thing (IoT); High-Inertia System

### CITATION LINKS

[1] Hierarchical network identification of large-scale systems-an approach based on dissipation equalities [2] Design of large-scale time-delayed systems with dead-zone input via variable structure control [3] Orion: A hybrid hierarchical control plane of software-defined networking for large-scale networks [4] Hierarchical optimal force-position control of complex manufacturing processes [5] Multi-modal control of systems with constraints [6] Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination [7] The Research of Multi-modal Control Strategy [8] Research on the smooth transition of multi-mode control strategy and its application [9] Multi-modal control scheme for rehabilitation robotic exoskeletons [10] Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition [11] Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice [12] A hierarchical urban network control with integration of demand balance and traffic signal coordination [13] Control methodologies in networked control systems [14] The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data [15] A survey of recent results in networked control systems [16] Trends in automotive communication systems [17] Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture [18] Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges [19] Context-aware control and monitoring system with IoT and cloud support [20] Do-it-Yourself Digital Agriculture applications with semantically enhanced IoT platform [21] Internet of Things application for implementation of smart agriculture system [22] Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules [23] Optimized fuzzy control of a greenhouse

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (AUT) Polytechnic, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology (IUST), Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology (IUST), Tehran, Iran.  
Postal Code: 1684613114  
Phone: +98 (21) 77240540  
Fax: +98 (21) 77240488  
khanmirza@iust.ac.ir

#### Article History

Received: September 18, 2019  
Accepted: November 12, 2019  
ePublished: May 09, 2020

## رهیافتی نوین در طراحی و پیاده‌سازی کنترل چندلایه در بستر اینترنت اشیا

کامران تائبی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

اسماعیل خان‌میرزا\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد امام‌جمعه MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش روی توسعه دانش فنی و پیاده‌سازی راهبردهای کنترل نوین در بستر اینترنت اشیا تمرکز شده است. در این راستا معماری کنترلی طراحی شد که با استفاده از کنترل چندلایه سلسه مراتبی در بستر اینترنت اشیا امکان ارتباط‌گیری و انتقال اطلاعات از لایه‌های پایین‌تر به بالاتر در مقیاس جهانی و امکان پردازش داده‌ها و آرایه راهکار کنترلی متناسب با شرایط جدید از لایه‌های بالاتر به پایین‌تر فراهم آمده است. از کاربردهای اصلی این رویکرد می‌توان به کنترل سیستم‌های دارای لختی زیاد و هوشمندسازی زیر سیستم‌ها با هزینه کم برای کنترل سیستم‌ها با مقیاس بزرگ اشاره کرد. با دو لایه‌شدن سیستم‌هایی با لختی زیاد، امکان بهینه‌شدن کنترل‌کننده محلی توسط کنترل اصلی فراهم می‌شود. بدین منظور کنترل‌کننده دو لایه‌ای که در لایه پایینی کنترل سیستم‌های با لختی زیاد دما و رطوبت خاک را به ترتیب در قالب کنترل PID و IFTTT بر عهده داشته و در لایه بالایی با استفاده از اطلاعات دریافتی از لایه پایینی و به کارگیری الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و کنترل‌کننده ANFIS، به ترتیب ضرایب کنترل‌کننده PID اعمال شده در زیر سیستم و نقاط کاری IFTTT کنترل را به طور پویا بهینه می‌نماید، در نظر گرفته شده است. با این عمل حجم و پیچیدگی سخت‌افزارهای به کار گرفته شده در لایه‌های پایین‌تر و به تبع هزینه‌های ناشی از آنها کاهش پیدا کرده و در عین حال زیر سیستم مربوطه هوشمند شده است. از طرفی امکان پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های پیچیده در لایه‌های سطح پایینی در سیستم‌های مقیاس بزرگ فراهم شده و امکان کنترل سیستم‌های با لختی زیاد نیز فراهم می‌آید. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی نیز حاکی از آن است که این استراتژی کنترلی در بسترهای اینترنت اشیا بسیار موثر واقع شده است.

**کلیدواژه‌ها:** کنترل‌کننده چندلایه سلسه مراتبی، اینترنت اشیا، سیستم‌هایی با لختی زیاد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱

\*نویسنده مسئول: khammirza@iust.ac.ir

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر در سیستم‌های علمی و مهندسی مشکلات به طور فزاینده‌ای بزرگ و پیچیده شده است. اخیراً کنترل سیستم‌های با مقیاس بزرگ به علت متنوع‌بودن نیازهای زیست‌محیطی و اجتماعی مورد توجه قرار گرفته است. با گذر زمان مقیاس سیستم‌ها رو به افزایش بوده و این امر باعث بروز معضلاتی در کنترل آنها شده است<sup>[1]</sup>. هوشمندسازی و اتوماسیون زیرسیستم‌ها در کنترل سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ معمولاً هزینه‌بر بوده و حجم سخت‌افزار کنترلی در این حالت افزایش

می‌یابد. از طرفی استفاده از سخت‌افزارهایی با سطح پردازش پایین به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌ها، قابلیت پیاده‌سازی فرآیندهای کنترلی با سطح پیچیدگی بالا را دارا نبوده و این موضوع در عموم تاسیسات بزرگ از قبیل کنترل و بازرسی کیفی زمین‌های زراعی، کنترل هوشمند ترافیک و حمل نقل شهری، شبکه هوشمند برق به یک معضل اساسی مبدل شده است.

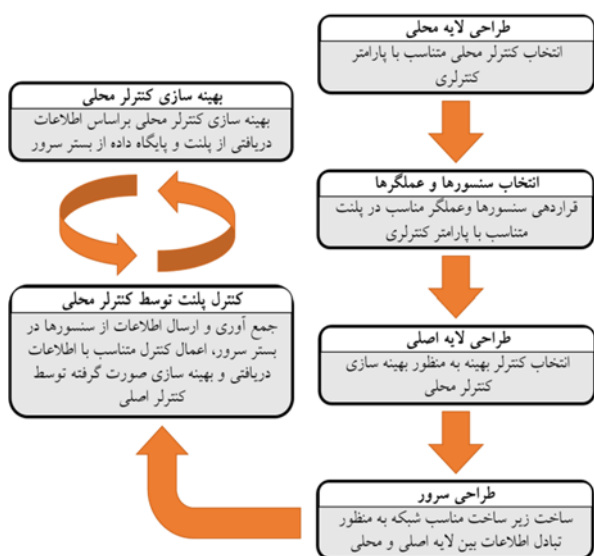
یکی از راهکارهای کنترلی غلبه بر این مشکل، استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز یا به عبارت دیگر استفاده از چند کنترل‌کننده در چند سطح مختلف برای انجام وظایف است<sup>[2]</sup>. این روش با تقسیم سیستم به لایه‌های سلسله مراتبی متناسب با مقیاس فیزیکی تاسیسات صورت می‌پذیرد. بنابراین ساختارهای شبکه‌ای و سلسله مراتبی به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد برای حل این معضل در نظر گرفته می‌شوند<sup>[1]</sup>.

سیستم‌های کنترلی هیبرید سلسله مراتبی، باعث افزایش مقیاس‌پذیری سیستم‌ها شده و رشد محاسبات پیچیده را در سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ کاهش می‌دهد<sup>[3]</sup>. از این سیستم‌ها برای کنترل مجموعه‌هایی که تعداد زیادی اهداف با الویت بالاتر را درخواست می‌کنند، استفاده می‌شود<sup>[4]</sup>. از سیستم کنترلی چند وضعیتی برای کنترل سیستم‌های چند هدفی یا چند وظیفه‌ای که وظایف‌ها به‌صورت همزمان و با الگوی نامشخص درخواست می‌شوند، استفاده می‌شود<sup>[5]</sup>. این رویکرد کنترلی، نقش موثری در کاهش تاخیرها و کنترل سیگنال‌های زیرسیستم‌ها در مقیاس بزرگ<sup>[6]</sup>، افزایش دقت عملکرد و کاهش اغتشاشات ورودی<sup>[7, 8]</sup>، افزایش سرعت عمل و پایداری دینامیکی زیرسیستم‌ها<sup>[9]</sup> و همچنین کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کند<sup>[10]</sup>.

استفاده از ساختار سلسله مراتبی در کنترل سیستم‌های تحت شبکه حسگرهای بی‌سیم، باعث شتاب‌گرفتن در سرعت شبکه و طراحی چنین سیستم‌هایی شده است و در واقع میزان محاسبات پردازش در یک محیط وسیع و عملیاتی را کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از عوامل هوشمند به‌صورت سلسله مراتبی و لایه‌ای باعث افزایش کارایی سیستم شده است<sup>[11]</sup>. همچنین معضل کنترل ترافیک و سیگنال‌های ترافیکی در شهرهای بزرگ و با جمعیت زیاد که نمونه از یک سیستم با مقیاس بزرگ است از طریق تبدیل‌شدن کنترل‌کننده اصلی به تعداد زیادی زیرسیستم هوشمند که در یک قالب سلسله مراتبی پیاده‌سازی شده است، تا حد زیادی مرتفع شده است<sup>[12]</sup>. کنترل سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ به‌صورت شبکه و بی‌سیم باعث افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش سیم‌کشی و کاهش هزینه‌ها می‌شود<sup>[13-16]</sup>.

یکی از موضوع‌هایی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است کاربردهای اینترنت به‌منظور کنترل و نظارت داده‌ها است. با گذشت زمان واژه اینترنت به اشیا گره خورده و اکنون به‌عنوان اینترنت اشیا (Internet of Things; IoT) شناخته می‌شود. اشیا از بستر اینترنت در قالب روش‌های مختلفی با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. از این جهت واژه اینترنت اشیا مبین ارتباط اشیا

مستقیم با تاسیسات بوده و دو کنترل‌کننده (If This Then That) و PID به‌ترتیب به‌منظور کنترل رطوبت خاک و دما در آن استفاده شده است. به‌علاوه این لایه، وظیفه جمع‌آوری اطلاعات محلی تاسیسات و ارسال آنها به سرور در بستر اینترنت اشیا را دارا است. لایه بالایی کنترل‌کننده سلسه مراتبی نیز، با استفاده از اطلاعات دریافتی از لایه محلی و پایگاه داده از بستر اینترنت و کنترل‌کننده مستقر در آن شامل الگوریتم استنتاجی عصبی- فازی تطبیقی (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System; ANFIS) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) به‌ترتیب به بهینه‌سازی نقاط تنظیمی کنترل IFTTT و ضرایب کنترل‌کننده PID لایه محلی، مبادرت به‌عمل می‌آورد. فلوچارت طراحی کنترل‌کننده دو لایه سلسله مراتبی ارایه شده مطابق شکل ۱ است.



شکل ۱) فلوچارت طراحی کنترل‌کننده سیستم‌های با لختی زیاد

در بخش دوم این پژوهش به تبیین کنترل‌کننده و معادلات حاکم پرداخته می‌شود. در ادامه در بخش سوم، تاسیسات آزمایشی و داده‌های تجربی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. به دنبال آن تحلیل نتایج در بخش چهارم و نتیجه‌گیری در بخش پنچ آمده است.

## ۲- معماری کنترل‌کننده چندلایه

معماری کنترل‌کننده چندلایه باید به گونه‌ای باشد تا بتوان توزیعی مناسب از کنترل‌کننده‌ها با سطوح پیچیدگی متنوع را برای کنترل یک زیرسیستم در لایه‌های مختلف کنترلی، پاسخگو باشد. از طرفی به‌منظور کاهش حجم سخت‌افزار کنترلی برای زیرسیستم، بایستی فرآیندهای پیچیده کنترلی به سخت‌افزارهای لایه بالاتر منتقل شوند؛ سخت‌افزاری که تعداد زیادی زیرسیستم به آن متصل بوده و قابلیت پشتیبانی محاسبات کنترلی با سطح پیچیدگی بالا را در مدت زمان کوتاه دارا باشد. سخت‌افزاری که

از بستر اینترنت است. ارتباط از این بستر کمک شایانی را در انتقال، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها به انجام می‌رساند<sup>[17]</sup>. به‌عنوان مثال در زمینه کشاورزی کارهای زیادی به‌منظور افزایش کمی و کیفی محصولات با استفاده از اینترنت اشیا صورت گرفته است<sup>[18]</sup>. همچنین در پژوهش‌هایی، داده‌های مربوط به آبیاری در زمینه کشاورزی از طریق اینترنت اشیا برای کاربر مانیتور و تحلیل شده است تا کاربر بتواند در مواقع ضروری تصمیمات درستی را اتخاذ کند<sup>[19, 20]</sup>. در پژوهشی که کریشنا و همکاران انجام دادند، رباتی طراحی شده است که توسط کاربر از طریق اینترنت جابجا شده و داده‌های کشاورزی را برای کاربر ارسال می‌کند. همچنین چند فرمان دو وضعیتی را می‌تواند توسط کاربر از طریق اینترنت انجام دهد<sup>[21]</sup>.

با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی و گسترش یافتن تعداد سیستم‌های که توسط یک مجموعه کنترل می‌گردند و بررسی آنچه گذشت دریافت می‌شود که عمده پژوهش‌های صورت گرفته معطوف کنترل سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ و درصدد کاهش هزینه‌های این زیرسیستم‌ها بوده است. از آنجایی که با افزایش تعداد زیرسیستم‌ها کنترل آنها پیچیده و سخت‌تر می‌گردد، ارایه راهکار کنترلی که مقیاس‌پذیر بوده و با افزایش زیرسیستم‌ها دچار دخل و تصرف نگردد، از جایگاه خاصی برخوردار است. هدف از این پژوهش ارایه و پیاده‌سازی یک معماری کنترلی چندلایه در بستر اینترنت اشیا به‌صورت سلسله مراتبی به‌منظور کنترل سیستم‌های با لختی زیاد، پیاده‌سازی فرآیندهای کنترلی زیرسیستم‌ها با سطح پیچیدگی بالاتر در مقیاس بزرگ فارغ از مقیاس و بزرگی ابعاد زیرسیستم‌ها، هوشمندسازی آنها، کاهش هزینه‌های ناشی از آنها و همچنین کاهش حجم سخت‌افزارهای مورد استفاده است. بدین منظور جهت جلوگیری از بزرگ‌شدن حجم پردازش اطلاعات و سخت‌افزار به‌کارگرفته شده در لایه بالاتر بخشی از حجم محاسبات و کنترل‌کننده که نیازمند سخت‌افزار پیچیده‌ای نباشد در لایه‌های پایین‌تر صورت پذیرفته و به عبارتی با هوشمندتر کردن لایه پایینی از میزان پیچیدگی سخت‌افزار و کنترل‌کننده به‌کار گرفته شده در لایه بالاتر کاسته می‌شود. همچنین ارتباط لایه‌ها در بستر اینترنت اشیا سبب جهانی‌شدن معماری ارایه شده گردیده و این عامل قابلیت کنترل لایه پایینی‌تر از هر نقطه از جهان را امکان‌پذیر می‌نماید. از طرفی اطلاعات دریافتی از زیرسیستم‌ها در قالب اینترنت بسترسازی مناسب جهت ایجاد بانک اطلاعاتی مرتبط با آن زیرسیستم Big Data را فراهم آورده و امکان پژوهش و کنترل هر چه بهتر زیرسیستم مورد نظر را به ارمغان می‌آورد.

در این راستا، از یک معماری کنترلی سلسله مراتبی دو لایه برای کنترل سیستم‌های با لختی زیاد استفاده شده است. همچنین به‌منظور صحت‌گذاری و بررسی نتایج به‌صورت عملی، از تاسیسات آزمایشی موسوم به گلدان هوشمند به‌منظور کنترل دو پارامتر دما و رطوبت خاک که از لختی زیادی برخوردار هستند، استفاده شده است. لایه پایینی کنترل‌کننده (کنترل‌کننده محلی) در ارتباط

در این معماری لایه اول کنترلی تحت عنوان لایه اصلی کنترلی و لایه دوم کنترلی تحت عنوان لایه محلی کنترلی معرفی شده و این دو لایه از طریق اینترنت اشیا به یکدیگر متصل شده‌اند. در این معماری هر زیرسیستم تحت نظارت یک کنترل‌کننده محلی کنترلی می‌شود. هر زیر سیستم از تعدادی عملگر و حسگر تشکیل یافته است. هر زیرسیستم داده‌های خود را در اختیار کنترل‌کننده محلی گذاشته و این اطلاعات در ابر داده بارگذاری می‌شوند. کنترل‌کننده اصلی این اطلاعات را تحلیل و نتایج تصمیم‌گیری‌ها به صورت فرامین کنترلی به عملگرها در سرور قرار می‌دهد. در ادامه کنترل‌کننده محلی توسط اطلاعات دریافتی وضعیت عملگرها را مشخص می‌کند. در صورت وجود سطح فرآیند کنترلی با حجم پردازش پایین این فرآیند در داخل همان لایه کنترل‌کننده محلی انجام می‌گیرد اما تحت هر شرایطی داده‌های حسگرها در اختیار لایه اصلی قرار می‌گیرد تا در صورت لزوم نوع کنترل‌کننده که در لایه محلی در حال پیاده‌سازی است، بهینه یا با روش کنترلی دیگری جایگزین شود.

هم‌اکنون برای اینترنت اشیا سرورهای زیادی وجود دارد. یکی از اهداف این سرورها ذخیره‌شدن داده در ابر داده‌ای است که سرور تشکیل داده است تا بتوان با تحلیل آنها تصمیم‌گیری‌ها را بهینه کرد. همچنین این سرورها واسطه‌ای میان اشیا و انسان‌ها از طریق ابزارهایی مانند تلفن همراه و رایانه شخصی هستند. سرور به‌کارگرفته شده در این پژوهش، سرور ThingSpeak است. داده‌ها توسط لایه کنترل‌کننده محلی بر روی سرور قرار گرفته و لایه کنترل‌کننده اصلی از این اطلاعات برای کنترل عملگرهای مستقر در هر زیرسیستم استفاده می‌کند. همچنین فرامین پردازش شده لایه کنترل‌کننده اصلی بر روی سرور قرار داده و کنترل‌کننده محلی به‌وسیله آن داده‌ها، عملگرها را کنترل می‌نماید.

### ۳- دستگاه و تاسیسات آزمایشی

به‌منظور راستی‌آزمایی کارایی معماری کنترلی پیشنهاد شده، تاسیساتی با سطوح پیچیدگی کنترلی متفاوت طراحی و ساخته شده است. دستگاه تحت آزمایش در این پژوهش یک گلدان هوشمند است. این دستگاه در معماری پیشنهادی همان زیرسیستم است. در گلدان هوشمند دو پارامتر رطوبت خاک و دمای محیط هوا کنترل می‌شود. برای کنترل رطوبت خاک از یک پمپ آب استفاده شده است که از طریق قطره چکان‌ها، گلدان را آبیاری می‌نماید. همچنین از یک حسگر رطوبت خاک برای اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک استفاده شده است. از طرفی برای کنترل دمای محیط از یک گرمکن هوای محیط که با جریان مستقیم کار می‌کند، استفاده شده است. این گرمکن از یک فن، گرماگیر (Heat-Sink) و یک ترموالکتریک تشکیل یافته و بدین ترتیب عمل می‌کند که ترموالکتریک گرماگیر را گرم کرده و فن گرمای گرماگیر را به داخل محیط گلدان منتقل می‌کند. محیط گلدان به‌منظور تثبیت دما و عدم انتقال حرارت به محیط اطراف،

توانایی انجام محاسبات پیچیده را دارد لایه اول کنترل‌کننده را تشکیل داده و حلقه کنترلی کنترل‌کننده‌هایی با سطح پیچیدگی بالا در همین لایه تشکیل می‌شود.

برای توزیع مناسبی از کنترل‌کننده‌ها و جلوگیری از افزایش بار محاسباتی بر روی لایه اول، هر زیرسیستم از یک سخت‌افزار با حجم کوچک بهره می‌برد. وظیفه سخت‌افزار مستقر در این لایه، ارتباط زیرسیستم با لایه اول کنترلی به‌منظور ارسال اطلاعات حسگرهای موجود در زیرسیستم برای تصمیم‌گیری و محاسبه و در ادامه دریافت فرامین مربوط به عملگرها از لایه اول کنترلی است. همچنین توسط سخت‌افزارهای این لایه بخشی از پردازش و محاسبات، که از سطح پیچیدگی بالایی برخوردار نیستند، صورت می‌پذیرد. این سخت‌افزار لایه دوم کنترلی را تشکیل داده و حلقه کنترل‌کننده‌هایی با سطح پیچیدگی پایین در این لایه تشکیل می‌شود.

از نکات اصلی طراحی این معماری، نحوه اتصال لایه اول به لایه دوم کنترلی است. در این معماری به‌دلیل متفاوت بودن موقعیت جغرافیایی لایه اول و دوم نمی‌توان از روش‌های ارتباطی سیمی استفاده نمود. از جهتی به‌علت دور بودن فواصل لایه‌ها ارتباط‌های بی‌سیم مرسوم در صنعت نیز کارآمد نخواهد بود. همچنین با افزایش تعداد زیرسیستم‌ها پیچیدگی ارتباط لایه‌های کنترلی افزایش یافته و باید از یک پروتکل ارتباطی که قابلیت پشتیبانی این عناصر را داشته باشد، استفاده نمود. شبکه اینترنت جهانی در این میان بهترین گزینه به‌عنوان بستر ارتباطی بوده و به‌دلیل تنوع و گستردگی زیرسیستم‌ها از پروتکل ارتباطی MQTT که پروتکل معروف اینترنت اشیا است، استفاده شده است. شکل ۲ معماری کنترل‌کننده دو لایه در بستر اینترنت اشیا را نشان می‌دهد.

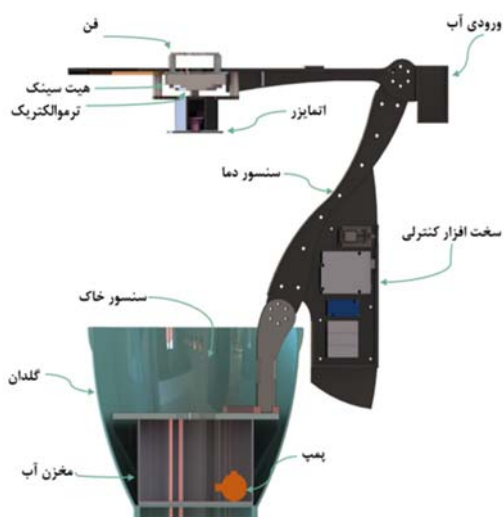


شکل ۲) معماری کنترل‌کننده دو لایه در بستر اینترنت اشیا و اجزای تشکیل دهنده آن شامل کنترل‌کننده اصلی، سرور اینترنت، کنترل‌کننده محلی و زیرسیستم

اطلاعات آب و هوایی که از سایت هواشناسی اخذ می‌گردد، به‌ترتیب نقاط تنظیمی IFTTT کنترل توسط کنترل‌کننده انفیس و ضرایب کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی (Differential Evolution; DE) در لایه اصلی محاسبه، تنظیم و به سرور به‌منظور اعمال در لایه محلی ارجاع داده می‌شوند. شکل ۵، شماتیک کنترلی دو لایه سلسله مراتبی گلدان هوشمند را نشان می‌دهد.

جدول ۲) سخت‌افزارهای کنترلی لایه محلی به‌کارگرفته شده در دستگاه

| نوع کنترل‌کننده            | مدل      | نحوه کنترل         |
|----------------------------|----------|--------------------|
| کنترل با سطح پیچیدگی بالا  | رایانه   | لایه اصلی          |
| کنترل با سطح پیچیدگی پایین | NODEMCU  | لایه محلی          |
| آنالوگ                     | BTS-7960 | درایور ترموالکتریک |
| دو وضعیتی                  | رله      | درایور پمپ         |



شکل ۳) شماتیک گلدان هوشمند شامل جانمایی عملگرها، حسگرها و سخت‌افزارهای کنترلی



شکل ۴) نمایی از گلدان هوشمند ساخته شده

از محیط اطراف توسط پوشش پلاستیکی مجزا شده است. مشخصات عملگرها و حسگرهای به‌کار گرفته شده در دستگاه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱) مشخصات عملگر و حسگرهای به‌کار گرفته شده در دستگاه

| نوع کنترل یا اندازه‌گیری | مدل        | کمیت      | عملگر/حسگر |
|--------------------------|------------|-----------|------------|
| آنالوگ                   | TEC1-12715 | گرما      | عملگر      |
| آنالوگ                   | DHT-21     | دما       | حسگر       |
| دیجیتال                  | پمپ براشلس | آبیاری    | عملگر      |
| آنالوگ                   | YL-69      | رطوبت خاک | حسگر       |

معماری پیشنهادی در این پژوهش از دو نوع سخت‌افزار کنترلی شامل کامپیوتر به‌عنوان کنترل‌کننده لایه اصلی و میکروکنترل‌کننده NODEMCU به‌عنوان کنترل‌کننده لایه محلی و همچنین عامل ارتباط با اینترنت استفاده شده است. به‌منظور کنترل آنالوگ ترموالکتریک از یک درایور از نوع (Pulse Width Modulation) استفاده می‌شود. با تغییر سطح ولتاژ ترموالکتریک، انرژی گرمایی تولیدی توسط ترموالکتریک تغییر می‌یابد. برای قطع و وصل کردن پمپ از یک رله استفاده شده است و رله واسطی میان پمپ و سخت‌افزار کنترلی لایه محلی است. مشخصات سخت‌افزارهای کنترلی مستقر در لایه محلی در جدول ۲ آمده است.

شماتیک گلدان هوشمند طراحی شده شامل جانمایی عملگرها، حسگرها و سخت‌افزارهای کنترلی در شکل ۳ آمده است.

در این زیرسیستم پمپ، آب را از مخزن آب به سمت محل قطره چکان‌ها (اتمایزر) در بالای گیاه رسانده و آبیاری به‌صورت پاششی صورت می‌پذیرد. شکل ۴، نمایی از گلدان هوشمند را نشان می‌دهد.

#### ۴- کنترل‌کننده‌های اصلی و محلی تاسیسات

از آنجایی که هدف از این پژوهش و ارایه تاسیسات آزمایشی گلدان هوشمند به تبع آن، شبیه‌سازی از کنترل زیرسیستم‌هایی در مقیاس بزرگ با حجم پردازشی بالا و صحنه‌گذاری کارکرد معماری کنترلی ارایه شده متناسب با این شرایط بوده است، از کنترل‌کننده‌های به نسبت پیچیده‌ای جهت پیاده‌سازی استفاده شده است. در این پژوهش کنترل میزان رطوبت خاک و دمای هوای گلدان که از لختی زیادی برخوردار هستند، دو هدف کنترلی است که به‌صورت دو لایه سلسله مراتبی، لایه محلی و لایه اصلی پیاده‌سازی شده است. از آنجایی که کنترل دمای محیط و رطوبت خاک متاثر از تغییرات شرایط محیطی بوده و رفتار غیرخطی دارند، باید از کنترل‌کننده برخطی (on-line) به‌منظور کنترل شرایط استفاده گردد. از همین جهت به‌منظور کنترل میزان رطوبت خاک از IFTTT کنترل و برای کنترل دمای هوای گلدان از PID کنترل در لایه محلی استفاده شده است. در ادامه براساس بازخورد رطوبت خاک و دمای هوای اندازه‌گیری شده توسط حسگرها و همچنین

- مدلسازی لحاظ شده است:
- در این مدلسازی از ظرفیت گرمایی هوا در برابر پلاستیک صرف نظر شده است.
  - در این مدلسازی از انتقال حرارت همرفت درون و بیرون صرف نظر شده است.
  - به علت ضخامت ناچیز کاور از انتقال حرارت هدایت در آن صرف نظر شده است.
- با توجه به فرضیات بالا رابطه حرارتی محیط داخل گلدان متناظر با رابطه (۱) است.

$$T^{(n+1)} = \frac{(m.c - U.A.\Delta t).T^{(n)} + U.A.T_a^{(n)}.\Delta t + \dot{q}_{gen}^{(n)}.\Delta t}{(m.c)} \quad (1)$$

در این رابطه  $T$  درجه حرارت هوای گلدان،  $m$  جرم هوای در گلدان،  $c$  ظرفیت حرارتی ویژه پوشش پلاستیکی گلدان،  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت پوشش گلدان،  $A$  سطح مقطع گلدان،  $T_a$  دمای محیط بیرون در هر لحظه،  $\dot{q}_{gen}$  حرارت تولیدی ترموالکتریک و  $\Delta t$  گام زمانی حل معادله است.

در ادامه با فرض ثابت بودن خواص و مستقل بودن آنها از درجه حرارت به مدلسازی ترموالکتریک پرداخته می شود. معادله انتقال حرارت جذب شده در سمت سرد ( $Q_c$ ) گرم ( $Q_h$ ) و توان تولیدی ( $W$ ) ترموالکتریک مطابق با روابط (۲) الی (۴) است [22].

$$Q_c = \alpha.i.T_c - \frac{1}{2}i^2.\beta - \gamma.\Delta T \quad (2)$$

$$Q_h = \dot{q}_{gen} = \alpha.i.T_h + \frac{1}{2}i^2.\beta - \gamma.\Delta T \quad (3)$$

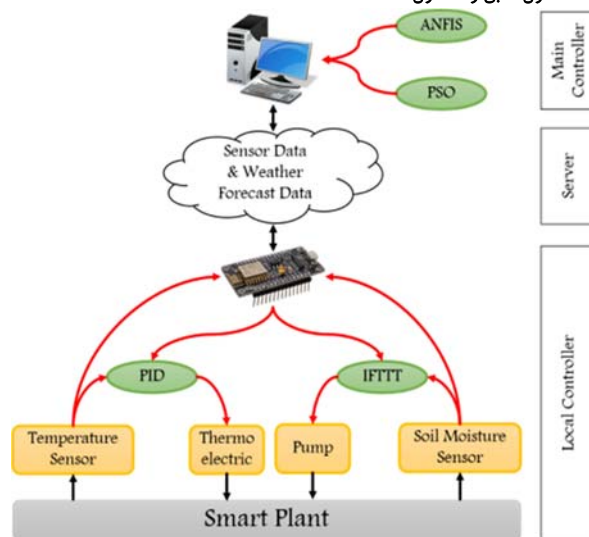
$$W = Q_h - Q_c = v.i \quad (4)$$

در معادلات فوق نیز  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  ضرایب ثابت محاسباتی روابط ترموالکتریک،  $i$  و  $v$  به ترتیب جریان و ولتاژ گذرنده از مدار ترموالکتریک و  $T_c$ ،  $T_h$  و  $\Delta T$  به ترتیب دمای سطح سرد و گرم و اختلاف دمای دو طرف ترموالکتریک است. با ساده سازی روابط (۲) الی (۴)، رابطه (۵) به دست می آید.

$$v = \alpha.\Delta T + \beta.i \quad (5)$$

مطابق رابطه (۵) توان الکتریکی ترموالکتریکی مانند سایر لوازم الکتریکی ثابت نیست چون برای هر جریان الکتریکی، ولتاژ وابسته به اختلاف دمای دو سطح است و مقاومت الکتریکی  $\beta$  با تغییر دما تغییر می کند. با در دسترس بودن نمودارهای ( $Q_c - v$ ) و ( $Q_h - v$ ) در  $\Delta T$  مختلف که شرکت سازنده در اختیار قرار داده است و با توجه به کاربرد گرمایشی ترموالکتریک،  $\Delta T = 0$  در نظر گرفته شده و به راحتی می توان مقادیر هر از متغیرهای  $Q_c$  و  $i$  و به تبع  $\dot{q}_{gen}$  را محاسبه نموده و در ادامه با استفاده رابطه (۱) دمای هوای کنونی را به دست آورد. براساس مفروضات ذکر شده و نمودارها، مقادیر  $Q_c$  و  $i$  و  $\dot{q}_{gen}$  مطابق روابط (۶) الی (۸) خواهد بود.

$$i^{(n)} = \frac{1}{\beta}v^{(n)} = 1.2366.v^{(n)} \quad (6)$$



شکل ۵) شماتیک کنترلی دو لایه به صورت سلسله مراتبی از زیرسیستم گلدان هوشمند

#### ۲-۴- کنترل دمای هوا

بعد از تعیین دمای زیست گیاه که براساس اطلاعات جوی و محلی در لایه اصلی کنترل کننده به دست آمده است، دمای مطلوب و ضرایب PID متناسب با شرایط که از الگوریتم بهینه سازی تکامل تفاضلی (DE) محاسبه شده اند به سرور به منظور اعمال در کنترل کننده محلی ارجاع داده می شوند. در ادامه کنترل کننده محلی اطلاعات را از سرور دریافت نموده و بعد از تنظیم ضرایب و دمای مطلوب، توسط درایور مستقر در گلدان سطح ولتاژ ترموالکتریک را به صورت PWM کنترل می نماید. با توجه به اثرگذاری مستقیم ولتاژ تغذیه ترموالکتریک در انتقال حرارت صورت گرفته از ترموالکتریک به محیط اطراف، دمای محیط تغییر می یابد. همچنین از بازخورد دمایی حسگری که در گلدان جادهی شده در محاسبات کنترل کننده PID استفاده می شود. شکل ۶، شماتیکی از نحوه کنترل دمای گلدان هوشمند توسط کنترل کننده سلسله مراتبی در بستر اینترنت اشیا را نشان می دهد.

#### ۲-۴- شبیه سازی حرارتی گلدان و ترموالکتریک به منظور محاسبه ضرایب بهینه کنترل کننده PID

هدف از شبیه سازی حرارتی، بررسی کارکرد الگوریتم توسعه داده شده و همچنین به دست آوردن مقادیر اولیه بهینه ضرایب کنترل کننده PID به منظور پیاده سازی عملی در گلدان هوشمند است. از طرفی با توجه به اینکه مقادیر این ضرایب توسط الگوریتم بهینه گر با گذشت زمان و جمع آوری اطلاعات تجربی به مقادیر صحیح خود نزدیک می گردند، از مدلسازی پیچیده پرهیز به عمل آمده و در واقع یکی از مزیت های معماری پیشنهادی را می توان در مدلسازی ساده سیستم و پرهیز از هرگونه پرداخت به جزئیات دانست. در این بخش گلدان با یک پوشش پلاستیکی پوشیده شده و برای مدلسازی در نظر گرفته می شود. فرضیات زیر در

$$Z = \omega_1 \cdot M_p + \omega_2 \cdot T_s + \omega_3 \cdot RMSE \quad (۱۱)$$

که در آن  $M_p$  میزان فراجهش کنترل‌کننده PID،  $T_s$  زمان نشست سیستم و  $RMSE$  مجذور میانگین مربعات خطای خروجی کنترل‌کننده PID و به ترتیب  $\omega_1$ ،  $\omega_2$  و  $\omega_3$  ضرایب وزنی متغیرها هستند.

حال با در دسترس بودن معادلات حاکم و ثوابت مورد نظر به شبیه‌سازی سیستم پرداخته و توسط الگوریتم هوشمند تکامل تفاضلی، ضرایب کنترل‌کننده PID، بهینه‌سازی می‌شود. نمودار ۱، مقادیر اولیه تنظیمی ضرایب کنترل‌کننده PID برای گلدان هوشمند و به تبع سطح ولتاژ ورودی، گرمای انتقال یافته از ترموالکتریک و دمای گلدان را در هر لحظه نشان می‌دهد.

نمودار ۲ نیز مقادیر ولتاژ ورودی، گرما انتقال یافته و دمای گلدان را به‌ازای مقادیر بهینه شده از ضرایب کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم تکامل تفاضلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این مشهود است، به‌ازای مقادیر بهینه شده از ضرایب کنترل‌کننده PID میزان فراجهش، زمان نشست و مجذور میانگین مربعات خطا به حداقل مقدار خود رسید و همچنین سیگنال ورودی نیز اغتشاشات کمتری را در بر دارد. مقادیر  $M_p$ ،  $T_s$ ،  $RMSE$  و تابع هزینه  $Z$  در جدول ۳ برای مقادیر اولیه و بهینه شده توسط الگوریتم تکامل تفاضلی نشان داده شده است.

$$Q_c^{(n)} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot v^{(n)} \cdot T_h - \frac{1}{2\beta} v^{(n)2} = \quad (۷)$$

$$-0.5751 \cdot v^{(n)2} + 18.546 \cdot v^{(n)}$$

$$\dot{q}_{gen}^{(n)} = Q_c^{(n)} + v^{(n)} \cdot i^{(n)} \quad (۸)$$

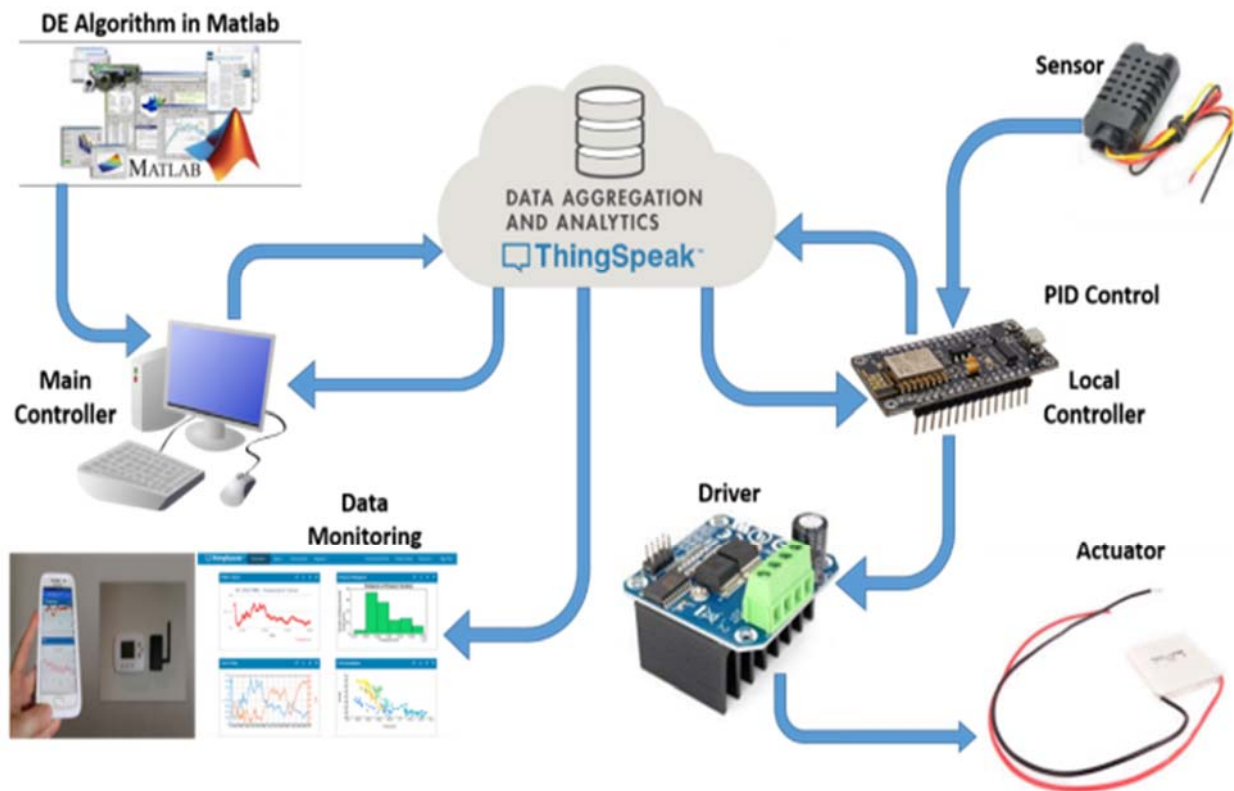
تنها مجهول روابط (۶) الی (۸)،  $v^{(n)}$  است که توسط کنترل‌کننده PID محلی و با استفاده از بازخورد حسگر دمایی مطابق با روابط (۹) و (۱۰) قابل محاسبه است.

$$e(n) = T^{(n)} - T^{(n-1)} \quad (۹)$$

$$v^{(n)} = k_p \cdot e(n) + k_i \cdot \Delta t \cdot \sum_{m=0}^n e(m) + k_d / \Delta t \cdot (e(n) - e^{(n-1)}) \quad (۱۰)$$

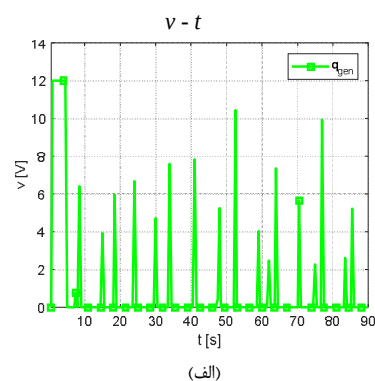
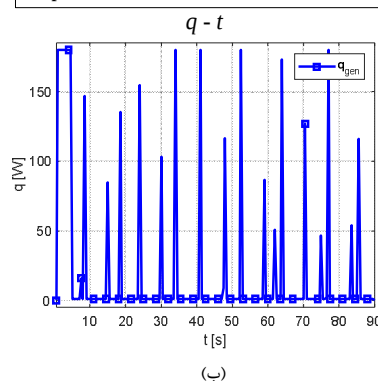
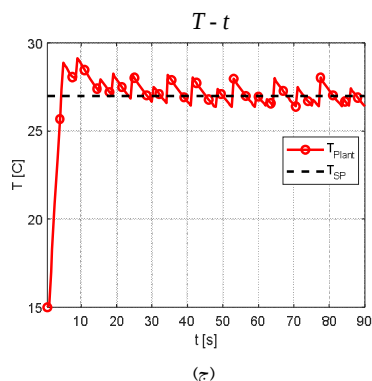
$e$  در روابط فوق خطای محاسباتی و  $k_p$ ،  $k_i$  و  $k_d$  به ترتیب ضریب تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر کنترل‌کننده PID هستند.

در کنترل‌کننده جهت به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه ضرایب کنترل‌کننده PID از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی استفاده شده است. این الگوریتم در کنترل‌کننده اصلی و توسط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. از طریق این الگوریتم می‌توان در صورت تغییر در دینامیک حرارتی گلدان و رفتار غیرخطی محیط، ضرایب را به‌صورت هوشمند بهینه کرد. در این الگوریتم تابع هزینه  $Z$  برای بهینه‌سازی مطابق رابطه (۱۱) است.



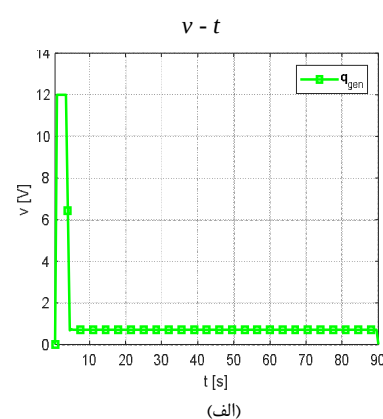
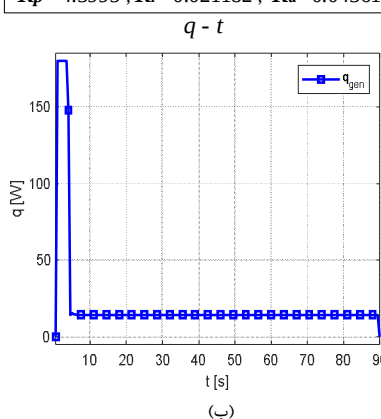
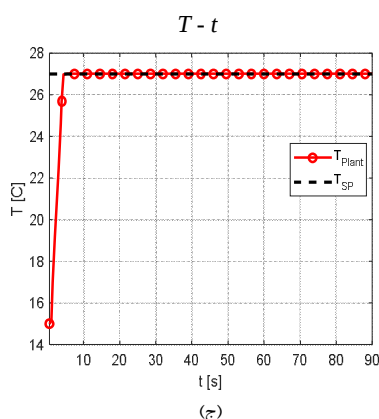
شکل ۶) شماتیک کنترل دمای گلدان هوشمند توسط کنترل‌کننده سلسه مراتبی در بستر اینترنت اشیاء

$$K_p = 72.8753, K_i = 3.2153, K_d = 0.78155$$



**نمودار ۱)** شبیه‌سازی گلدان هوشمند به‌ازای مقادیر تصادفی اولیه ضرایب کنترل‌کننده PID ( $k_p=72.8753, k_i=3.2153, k_d=0.78155$ ): الف: نمودار ولتاژ اعمالی به ترموالکتریک برحسب زمان، ب: نمودار حرارت انتقالی از ترموالکتریک به گلدان برحسب زمان، ج: نمودار دمای گلدان برحسب زمان

$$K_p = 4.3995, K_i = 0.021182, K_d = 0.043611$$



**نمودار ۲)** شبیه‌سازی گلدان هوشمند به‌ازای مقادیر بهینه شده ضرایب کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم تکامل تفاضلی ( $k_p=4.3995, k_i=0.021182, k_d=0.043611$ ): الف: نمودار ولتاژ اعمالی به ترموالکتریک برحسب زمان، ب: نمودار حرارت انتقالی از ترموالکتریک به گلدان برحسب زمان، ج: نمودار دمای گلدان برحسب زمان

**جدول ۳)** مقایسه مقادیر کنترلی به‌ازای ضرایب کنترلی اولیه و بهینه شده توسط الگوریتم تکامل تفاضلی

| پارامتر | واحد | مقادیر به‌ازای ضرایب اولیه کنترلی | مقادیر به‌ازای ضرایب بهینه شده توسط الگوریتم | میزان درصد بهبود یافته |
|---------|------|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| $M_p$   | —    | ۰/۱۰۳۵                            | ۱/۹۴۸۹e-۰۵                                   | ۹۹/۹۸۱۲                |
| $T_s$   | s    | ۱۱/۵                              | ۴                                            | ۶۵/۲۲                  |
| RMSE    | °C   | ۲۴/۵۰۴۰                           | ۲۲/۹۱۳۷                                      | ۶/۴۹                   |
| Z       | —    | ۳۶/۱۰۷۵                           | ۲۶/۹۱۳۷                                      | ۲۵/۴۶                  |

زیادی مانند دما، رطوبت و نور است و با توجه به عدم قطعیت‌های محیط که ناشی از عواملی مانند انرژی تابشی خورشید، تغییرات آب و هوایی، تنفس، فوتوسنتز و سایر فرآیندهای اصلی گیاه مانند واکنش‌های شیمیایی و همچنین نويز موجود در فرآیند سیستم و حسگرها است و رفتار پیچیده و غیرخطی سیستم تحت کنترل، استفاده از سیستم‌های کنترل فازی می‌تواند به نحو موثری راه‌گشا باشد [23]. در این مقاله، کنترل رطوبت مورد نیاز گیاه می‌توان به معضلاتی از قبیل متفاوت بودن بازخورد حسگر رطوبت خاک متناسب با جاگیری حسگر در گلدان، متفاوت بودن نفوذ آب در خاک (لختی متغیر خاک) و به تبع اسراف بی‌رویه آب و نهایتاً خراب شدن گیاه به واسطه پاسخ دیر هنگام خاک اشاره کرد. بنابراین با توجه به رفتار غیرخطی، پویایی زیاد، عدم قطعیت‌های

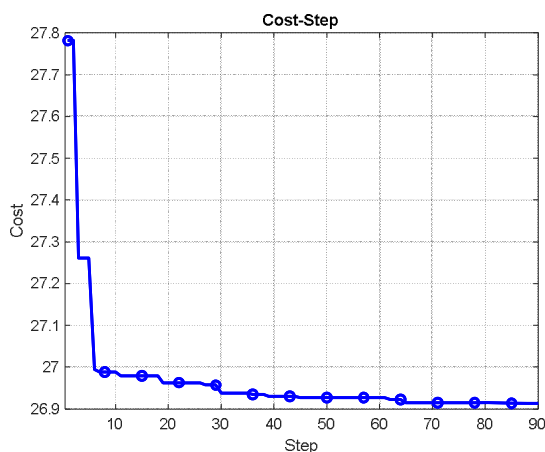
مطابق جدول میزان درصد بهبود یافته به‌ازای تمامی پارامترهای کنترلی بهبود یافته است و این موضوع بهبود پارامترهای کنترلی به‌ازای ضرایب کنترلی بهینه شده توسط الگوریتم تکامل تفاضلی به‌صورت سلسله مراتبی را تایید می‌نماید. نمودار ۳ نیز مقادیر تابع هزینه الگوریتم تکامل تفاضلی را به‌ازای ۱۰۰ مرتبه تکرار نشان می‌دهد.

### ۳-۴- کنترل رطوبت خاک

از آنجایی که میزان آب مورد نیاز هر گیاه در مقایسه با سایر گیاهان متفاوت است، کنترل میزان آبیاری هر گیاه یا به عبارت دیگر کنترل رطوبت خاک از اهمیت خاصی برخوردار بوده و در رشد و نمو گیاه نقش مهمی را ایفا می‌کند. از آنجایی که در سیستم‌های کنترل شده کشاورزی، احتیاج به کنترل پارامترهای

Sugeno خطی و تعداد توابع عضویت سیستم فازی ۵ عدد و از نوع گوسی در نظر گرفته شده است. به‌منظور بهینه‌سازی سیستم فازی اولیه از الگوریتم ANFIS استفاده شده است که قوانین و ساختار مدل ANFIS مطابق شکل ۸ است. نهایتاً مشخصات سیستم فازی بهینه شده ثانویه در نمودار ۴ نشان داده شده است. بعد از آموزش و بهینه‌سازی سیستم فازی لازم است که سیستم توسط اطلاعات باقیمانده صحت‌سنجی شود. نمودار ۵ به صحت‌گذاری خروجی سیستم فازی با اطلاعاتی که برای آموزش (Train Data) سیستم استفاده شده و نمودار ۶ نیز منحنی رگرسیون این اطلاعات را نشان می‌دهد. مطابق اشکال،  $RMSE$  برابر  $1.122e - 05$  محاسبه شده و ضریب همبستگی نمونه آموزش ( $R$ ) برابر ۱/۰ است.

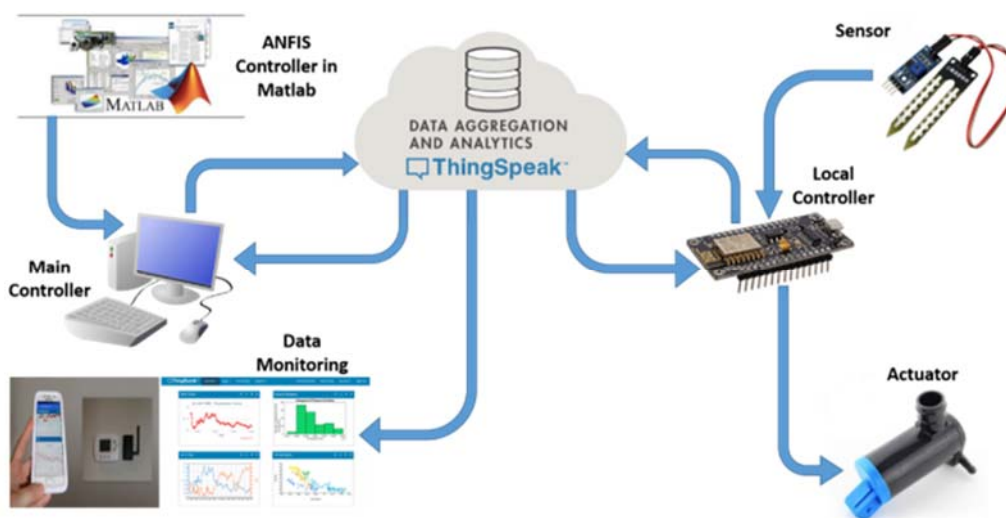
همچنین نمودار ۷ نیز صحت‌گذاری خروجی سیستم فازی با اطلاعات آزمایشی و نمودار ۸ منحنی رگرسیون این اطلاعات را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشهود است نیز  $RMSE$  برابر  $۰/۳۵۴۸۴$  و ضریب همبستگی نمونه آموزش ( $R$ ) برابر  $۰/۹۹۹۵۲$  محاسبه شده است.



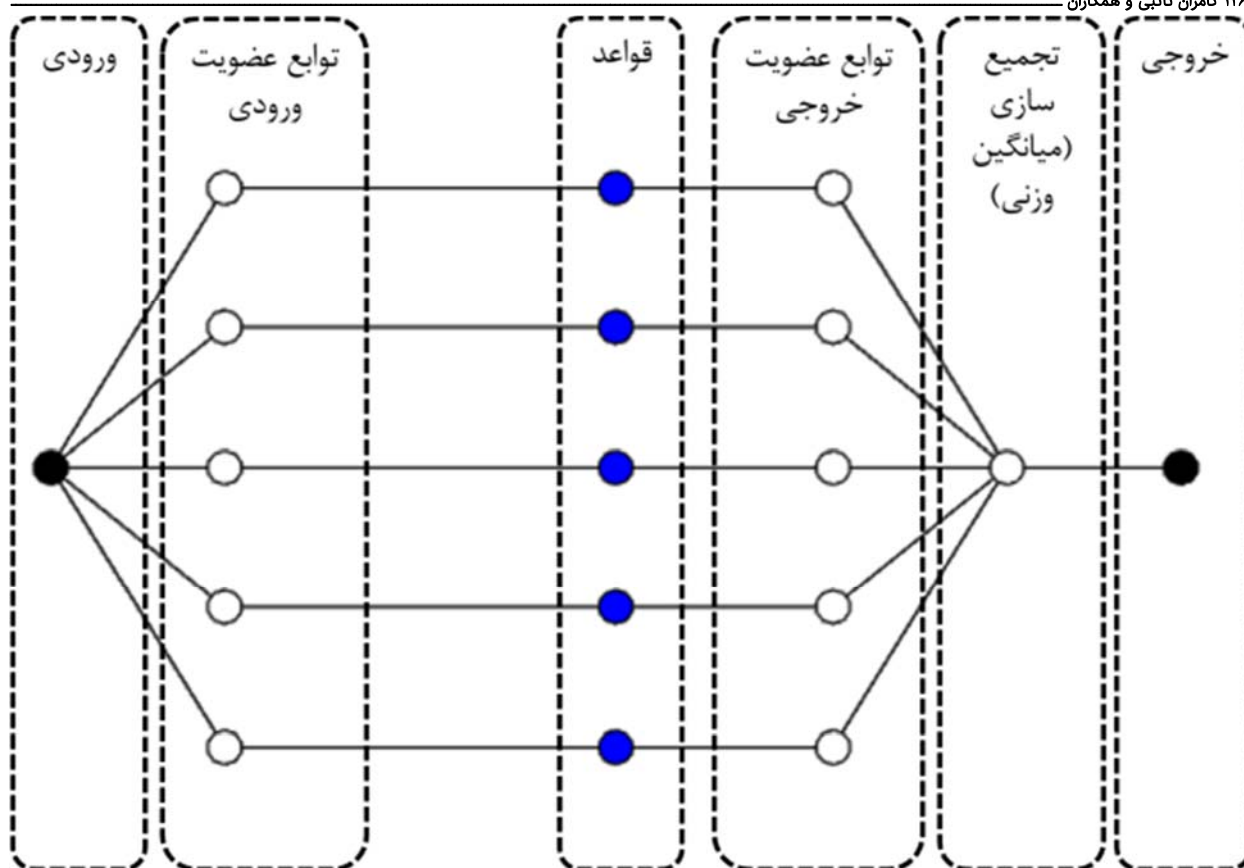
نمودار ۳) کمینه‌شدن تابع هزینه به‌ازای پیمایش هر محله از الگوریتم تکامل تفاضلی

محیطی که از خاک و حسگر که به واسطه متفاوت‌بودن جاگیری حسگر در خاک سر می‌زند، کنترل‌کننده‌ای نیاز است که به‌صورت بر خط، مشخصه‌های خاک را اندازه‌گیری و متناسب با آن رویکرد کنترل‌کننده خود را تغییر دهد. بدین منظور از IFTTT کنترل به‌عنوان کنترل‌کننده محلی و از سیستم استنتاج شبکه‌ای عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) به‌منظور بهینه‌سازی و تنظیم نقاط تنظیمی کنترل‌کننده محلی استفاده شده است. کنترل‌کننده ANFIS براساس اطلاعات جمع‌آوری شده به مرور نقاط تنظیمی را بهینه گردانیده تا از زیان‌دیدن گیاه به خاطر مصرف آب بیشتر یا کمتر از حد مورد نیاز، هدر رفت آب و انرژی ناشی از کارکرد پمپ جلوگیری به عمل آید. همچنین به‌کارگیری کنترل‌کننده ANFIS به‌عنوان یک کنترل‌کننده با سطح پیچیدگی پیاده‌سازی به نسبت زیاد، این ادعا مبنی برای این که سیستم کنترلی سلسله مراتبی دو لایه در بستر اینترنت اشیاء امکان پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های پیچیده را فراهم می‌آورد را به اثبات می‌رساند. شکل ۷، نمایی کنترلی از کنترل سلسله مراتبی دو لایه رطوبت خاک گلدان هوشمند در بستر اینترنت اشیاء است.

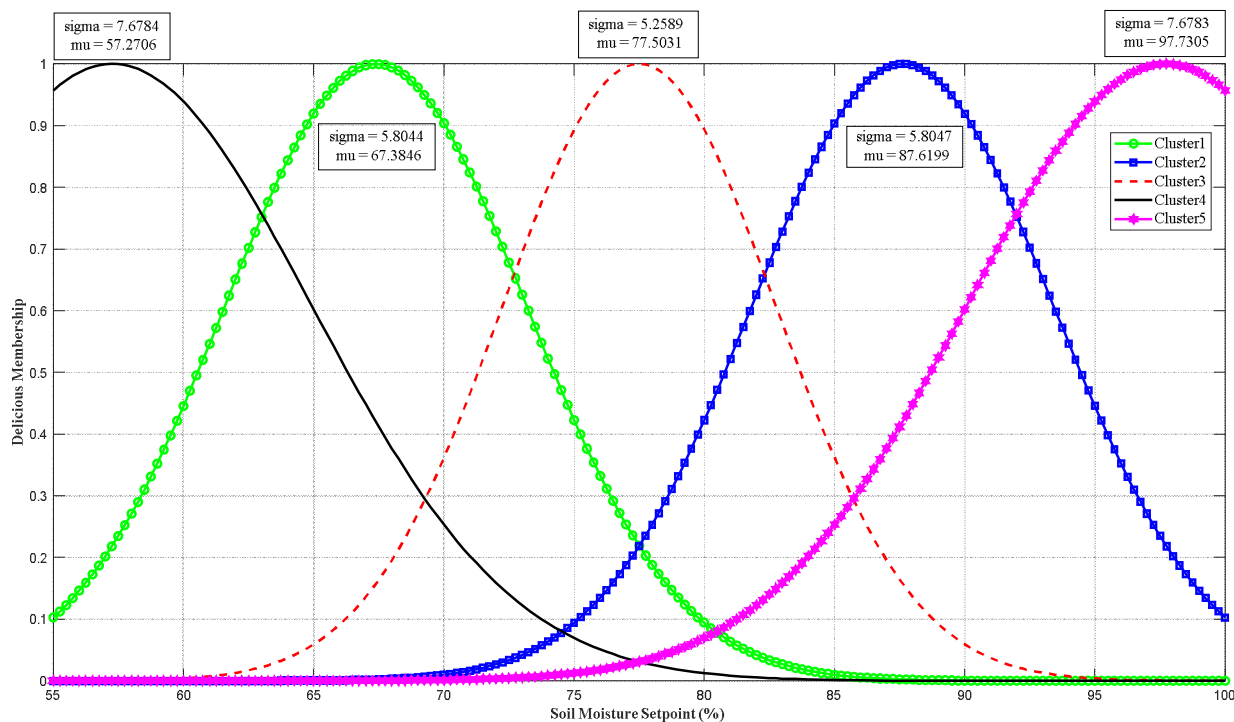
نحوه پیاده‌سازی سیستم انفیس برای تنظیم رطوبت خاک بدین صورت است که جامعه آماری براساس آزمایش‌های مکرری که از خاک صورت پذیرفته، تشکیل می‌شود. این آزمایش‌ها بدین صورت است که نقطه کاری برای حسگر رطوبت در نظر گرفته می‌شود در ادامه پمپ تعبیه شده در گلدان شروع به آبیاری کرده و به محض رویت نقطه کاری از حرکت باز می‌ایستد. با توجه به لختی بالای خاک در پاسخ به حسگر رطوبت خاک نهایتاً میزان رطوبت خاک به بیش از میزان نقطه تنظیمی منتج می‌گردد. در ادامه با استفاده از بخشی از اطلاعات جمع‌آوری شده به‌عنوان داده آموزش الگوریتم، سیستم فازی یک ورودی- یک خروجی اولیه‌ای براساس رطوبت تنظیمی به‌عنوان ورودی و رطوبتی که نهایتاً سیستم با توجه به لختی زیادش به آن رسیده به‌عنوان خروجی توسط روش FCM (Fuzzy C-Means) تشکیل می‌شود. سیستم فازی از نوع



شکل ۷) شماتیک کنترل رطوبت خاک گلدان هوشمند توسط کنترل‌کننده سلسله مراتبی در بستر اینترنت اشیاء

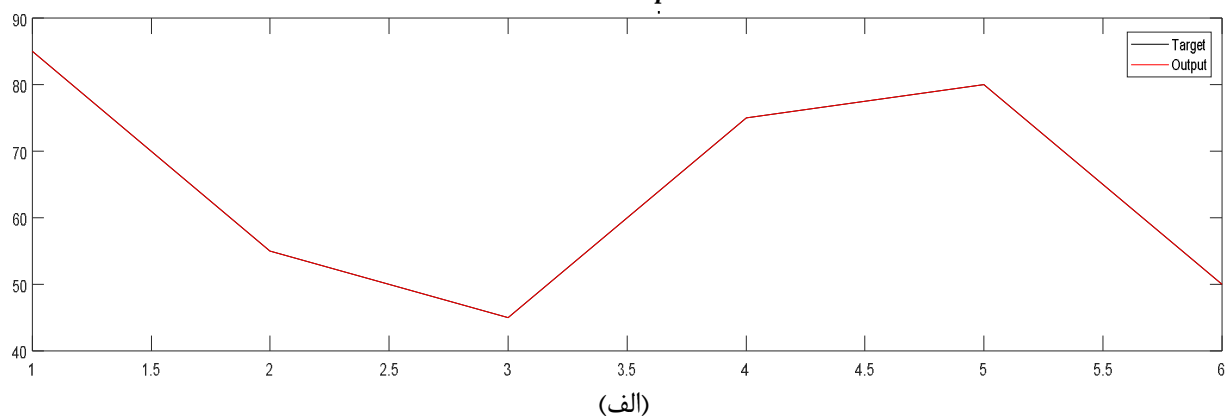


شکل ۸) ساختار مدل استنتاج فازی- عصبی تطبیقی به منظور بهینه سازی سیستم فازی تشکیل شده اولیه

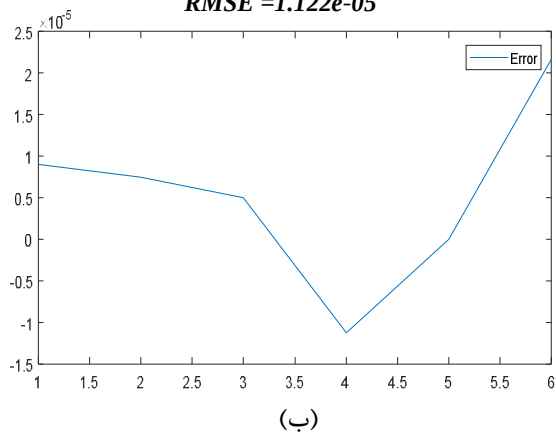


نمودار ۴) توابع عضویت ورودی سیستم فازی نهایی (بهینه شده)، عضو ۱ ( $\mu=52/2706$ ،  $\sigma=7/6784$ )، عضو ۲ ( $\mu=67/3846$ ،  $\sigma=5/8044$ )، عضو ۳ ( $\mu=77/5031$ ،  $\sigma=7/6783$ )، عضو ۴ ( $\mu=87/6199$ ،  $\sigma=5/8047$ )، عضو ۵ ( $\mu=97/7305$ ،  $\sigma=5/2589$ )

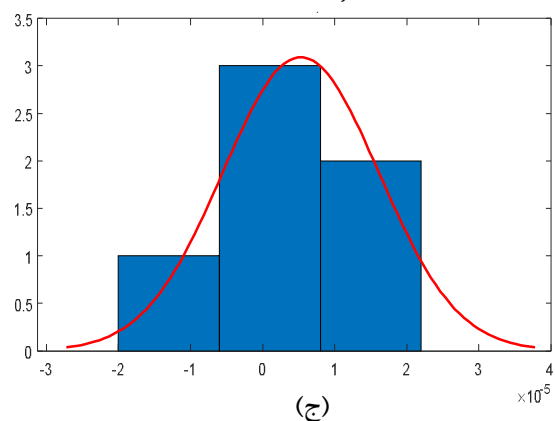
Train Data – Output #1



RMSE = 1.122e-05

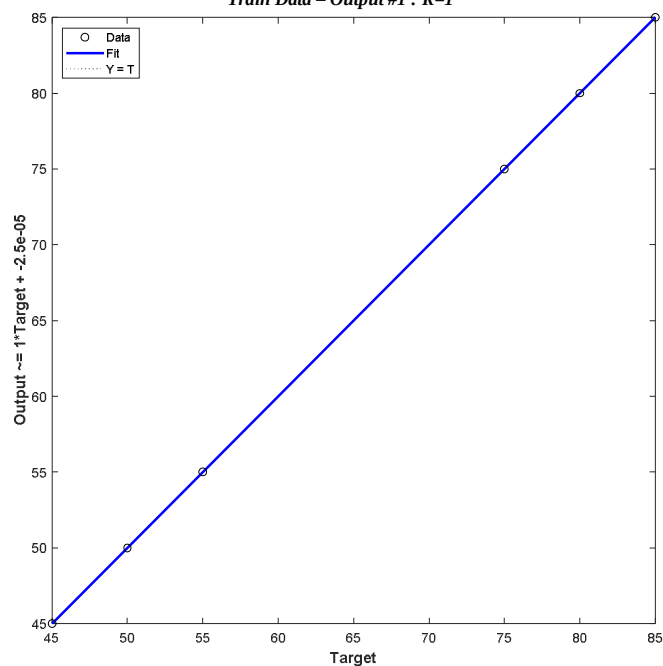


Error: mean=5.2841e-06, std=1.0837e-05

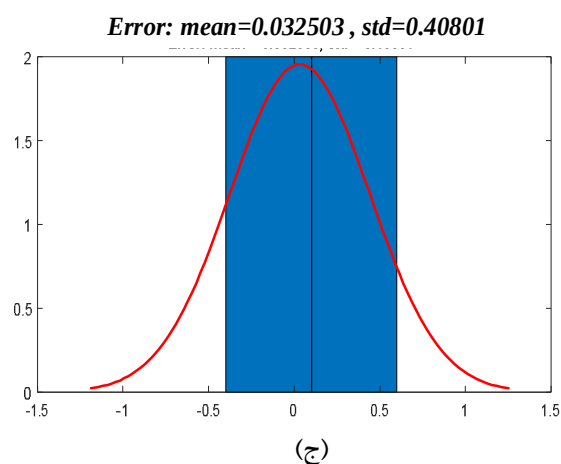
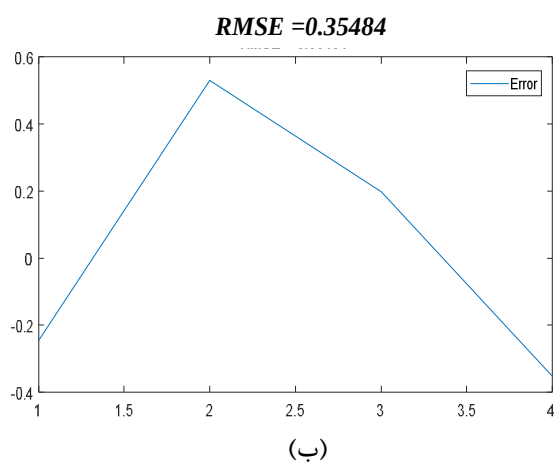
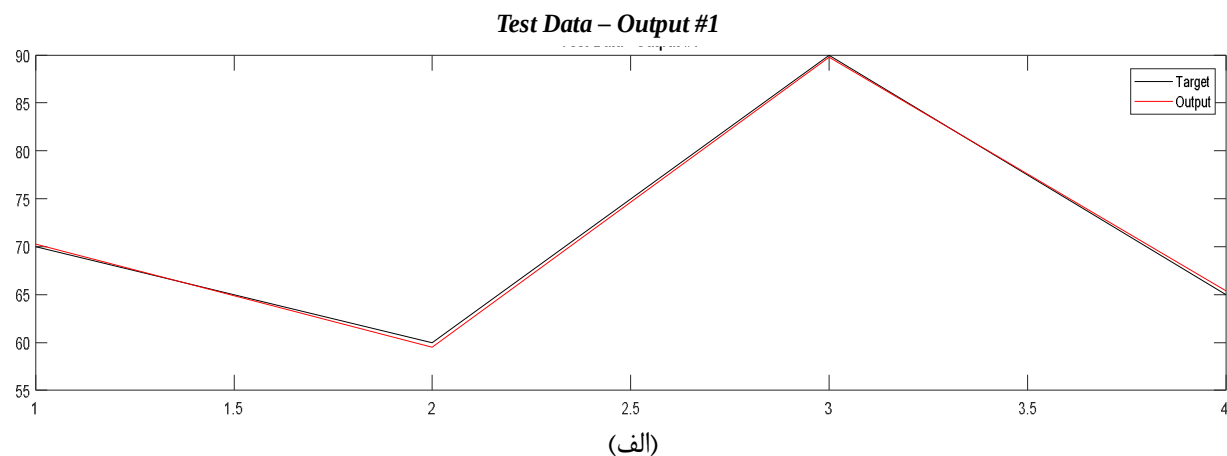


**نمودار ۵)** صحت‌گذاری خروجی سیستم فازی با اطلاعات آموزش سیستم فازی؛ الف: مقایسه خروجی سیستم فازی با خروجی‌های واقعی، ب: میزان خطای تخمینی سیستم فازی ( $RMSE=1/122e-5$ )، ج: فراوانی توزیع خطا ( $\mu=5/2941e-6$ ,  $\sigma=1/0837e-5$ )

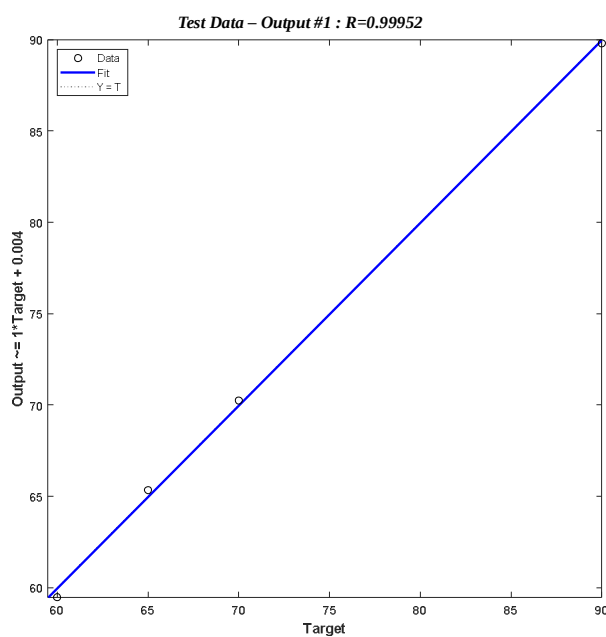
Train Data – Output #1 : R=1



**نمودار ۶)** منحنی رگرسیون خطی بین خروجی سیستم فازی و خروجی واقعی براساس اطلاعات آموزش ( $R = 1$ )



**نمودار ۷)** صحت‌گذاری خروجی سیستم فازی با اطلاعات آزمایش سیستم فازی: الف: مقایسه خروجی سیستم فازی با خروجی‌های واقعی، ب: میزان خطای تخمینی سیستم فازی ( $RMSE=0.35484$ )، ج: فراوانی توزیع خطا ( $\mu=0.032503$ ،  $\sigma=0.40801$ )

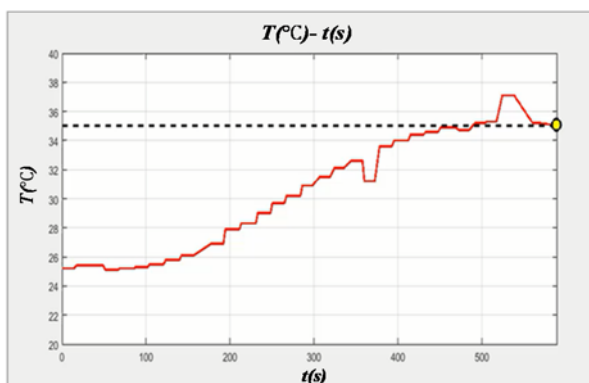


**نمودار ۸)** منحنی رگرسیون خطی بین خروجی سیستم فازی و خروجی واقعی براساس اطلاعات آزمایش ( $R=0.99952$ )

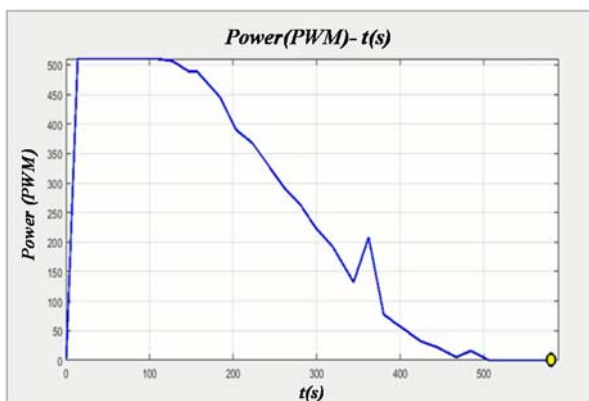
حداکثری زیرسیستم‌ها، کاهش قیمت تمام شده آنها و کاهش حجم سخت‌افزار کنترلی مورد استفاده در هر یک از آنها کارآمد است، به اثبات می‌رسد. از طرفی جهانی‌کردن ارتباطات بین هر یک از زیرسیستم‌ها در قالب ارتباط بی‌سیم و در بستر اینترنت اشیا به گونه‌ای که بتوان فرامین کنترلی پیچیده را از راه دور پیاده‌سازی کرد از مزیت‌های دیگر این معماری می‌توان برشمرد. این موضوع سبب پیاده‌سازی و اعمال کنترل‌کننده با سطح پیچیده بالا در هر مکانی و در هر سیستمی در جهان می‌شود. بر این اساس بسترسازی مناسب برای ایجاد بانک اطلاعاتی "بسیار بزرگ" برای یک زیرسیستم مشخص از مزیت‌های دیگر این معماری است. این امر سبب می‌شود تا براساس اطلاعات موجود و بدون سعی و خطای زیاد تا حد زیادی مقادیر اولیه بهینه‌تری را به‌عنوان نقطه شروع به کنترل‌کننده اعمال نمود.

از مزیت‌های مهم معماری کنترلی پیشنهادی، مدلسازی ساده اولیه به سبب اصلاح مقادیر در طول اجرای معماری و دریافت اطلاعات کنترلی توسط کنترلر اصلی است.

در نهایت فراهم‌آوردن امکان پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های پیچیده و سطح بالای سیستم‌های با مقیاس بزرگ، با توجه به نوع معماری و دو لایه‌کردن آنها و نوع ارتباطی که در این معماری پیشنهاد شده این امکان را مهیا کرده که بدون استفاده از سخت‌افزارهای پیچیده و گران‌قیمت، کنترل‌کننده‌های پیچیده پیاده‌سازی گردند.



نمودار ۹) نرخ تغییرات دمای گلدان از دمای محیط به دمای تنظیمی گلدان برحسب زمان



نمودار ۱۰) نرخ تغییرات سطح ولتاژ اعمالی به ترموالکتریک برحسب زمان

با توجه به اشکال، نتایج حاکی از تطابق میان داده‌های خروجی واقعی با داده‌های سیستم فازی طراحی شده است و بنابراین می‌توان صحت‌گذاری سیستم فازی را نتیجه گرفت. لازم به ذکر است که تشکیل سیستم فازی اولیه و بهینه‌سازی آن بعد از هر مرتبه آبیاری صورت گرفته و نتایج بروزرسانی می‌شود که با توجه به افزایش جامعه آماری، به مرور به دقت سیستم فازی تشکیل شده افزوده می‌شود.

## ۵- تفسیر و تحلیل نتایج

### ۵-۱- پیاده‌سازی عملی کنترل دمای هوای گلدان هوشمند

مطابق آنچه که گفته شد، کنترل دمای هوای گلدان از طریق اندازه‌گیری دما توسط حسگر دما، دریافت ضرایب بهینه PID از کنترل‌کننده اصلی و نهایتاً محاسبه سطح PWM اعمالی به درایور بر این اساس و به تبع تغییر انتقال حرارت تبادل شده از ترموالکتریک به هوای گلدان صورت می‌پذیرد. با استفاده از بازخورد دمایی و سطح PWM اعمالی به درایور ترموالکتریک که کنترل‌کننده محلی از گلدان از طریق سرور در اختیار قرار می‌دهد، نمودار نرخ تغییرات دمای گلدان از دمای محیط به‌عنوان دمای اولیه به دمای تنظیمی گلدان مطابق نمودار ۹ و نمودار تغییرات سطح PWM محاسبه شده با توجه به فاصله دمای گلدان به دمای تنظیمی مطابق نمودار ۱۰ به‌دست آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از گذشت ۴۰۰ ثانیه دما گلدان به دمای تنظیمی که به‌عنوان ورودی به کنترل‌کننده داده شده بود، رسیده است. از طرف دیگر سطح ولتاژ اعمالی از درایور به ترموالکتریک در ابتدا در بیشترین حالت خود بوده که در ادامه با افزایش دمای داخل گلدان، کاهش پیدا کرده و در ثانیه ۵۰۰ به صفر رسیده است. لازم به ذکر است که نوسانات مشاهده شده در اشکال فوق ناشی از نویزهایی است که توسط حسگر اندازه‌گیری شده است.

### ۵-۲- پیاده‌سازی عملی کنترل رطوبت خاک گلدان هوشمند

به‌منظور کنترل رطوبت خاک نیز از IFTTT کنترل و به‌منظور بهینه‌کردن نقاط تنظیمی از سیستم عصبی- فازی تطبیقی استفاده شد. با استفاده از بازخورد حسگر رطوبت خاک که کنترل‌کننده محلی از طریق سرور در اختیار می‌گذارد، نمودار نرخ تغییرات رطوبت خاک مطابق نمودار ۱۱ به‌دست آمده است. میزان رطوبت خاک در حالت شرایط محیطی ۶۰٪ و عدد تنظیمی ۹۰٪ بوده است. همان‌طور که از نمودار ۱۱ مشهود است با اعمال کنترل‌کننده انفیس این میزان با تقریب خوبی به ورودی هدف رسیده است.

## ۳-۵ نتایج تکمیلی

با توجه به نتایج حاصل از دو بخش پیاده‌سازی عملی کنترل رطوبت خاک و هوای گلدان هوشمند این ادعا مبنی بر اینکه معماری کنترلی ارائه شده به‌منظور کنترل زیرسیستم‌هایی با رفتار غیرخطی و لختی زیاد در بستر اینترنت اشیا، برای هوشمندسازی

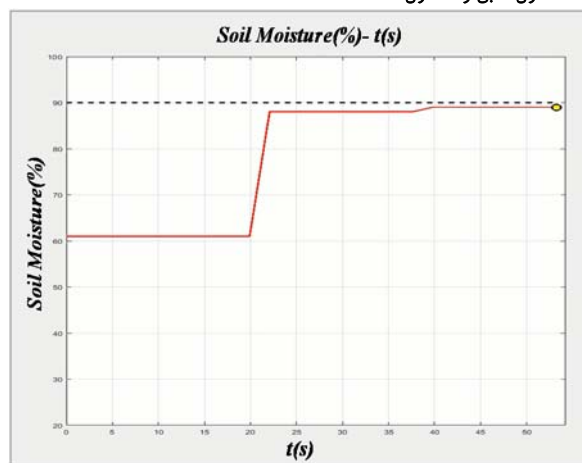
**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** این پژوهش تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی پژوهش حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبارسنجی آن بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** پژوهش حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** کامران تائبی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ اسماعیل خان‌میرزا (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۵٪)؛ محمد امام‌جمعه (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪).

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌های انجام آزمایشات به صورت شخصی توسط پژوهشگران پرداخت شده است.



نمودار (۱۱) نرخ تغییرات رطوبت خاک برحسب زمان

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به معماری کنترلی نوینی به صورت سلسله مراتبی که در بستر اینترنت اشیا میان لایه‌های مختلف آن تبادل اطلاعات و بهینه‌سازی کنترلی صورت می‌پذیرفت، پرداخته شد. در سطح پایین معماری، کنترل‌کننده‌ای با سطح پیچیدگی پایین در نظر گرفته شده و از طریق شبکه بی‌سیم و در بستر اینترنت اشیا اطلاعات دریافتی توسط سنسورهای مستقر در این بخش را در اختیار سرور متصل به شبکه قرار می‌دهد. در ادامه در سطح بالایی معماری توسط اطلاعات دریافتی از سرور رویکرد کنترلی جدید شامل بهینه‌سازی ضرایب و نقاط تنظیمی کنترلر توسط کنترل‌کننده‌ای با سطح پیچیدگی بالاتر صورت پذیرفته و اطلاعات مجدداً از طریق سرور و در بستر اینترنت به سطح پایینی منتقل می‌گردد.

با توجه به اینکه این رویکرد قابل پیاده‌سازی برای تعداد زیادی از لایه‌های پایین است، در سیستم‌های مقیاس بزرگ متشکل از تعداد زیادی زیرسیستم، اتخاذ این رویکرد کنترلی سبب هوشمندسازی زیرسیستم در عین سادگی سخت‌افزارهای به کار رفته و به تبع ارزان قیمت‌شدن هزینه نهایی شده به خصوص در سیستم‌های با لختی زیاد شده است.

در این میان دسترسی جهانی و پیاده‌سازی سطح بالای کنترل‌کننده در هر نقطه از جهان سبب سهولت و افزایش قابلیت کنترلی شده است. در عین حال سطح دسترسی جهانی بستری مناسب برای تبادل اطلاعات و ایجاد بانک اطلاعاتی بزرگی را مهیا نموده است. همچنین امکان‌پذیری مدلسازی ساده به واسطه اصلاح مقادیر در طی اجرای معماری به واسطه دریافت اطلاعات تجربی از مهمترین مزیت‌های این پژوهش است.

در راستای اثبات ادعاهای مذکور، شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی در قالب دستگاه و تاسیسات گلدان هوشمند صورت پذیرفت که نتایج حاکی از سازگاری و عملکرد مطلوب کنترل‌کننده‌ها در هر لایه با توجه به رسیدن متغیرهای کنترلی به مقایسه تنظیمی‌شان بوده است.

## ۷- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

|                       |                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| $A$                   | سطح مقطع گلدان                                      |
| $c$                   | ظرفیت حرارتی ویژه پوشش پلاستیکی گلدان               |
| $e^{(n)}$             | خطای محاسباتی در کنترل‌کننده PID                    |
| $i$                   | جریان گذرنده از مدار ترموالکتریک                    |
| $k_p$                 | ضریب تناسبی کنترل‌کننده PID                         |
| $k_i$                 | ضریب انتگرال‌گیر کنترل‌کننده PID                    |
| $k_d$                 | ضریب مشتق‌گیر کنترل‌کننده PID                       |
| $m$                   | جرم هوا                                             |
| $M_p$                 | فراچش دما از میزان تنظیمی کاربر                     |
| $\dot{q}_{gen}^{(n)}$ | حرارت تولیدی ترموالکتریک در لحظه (n)ام              |
| $Q_c$                 | انتقال حرارت جذب شده در سمت سرد ترمو الکتریک        |
| $Q_h$                 | انتقال حرارت دفع شده در سمت گرم ترمو الکتریک        |
| $R$                   | ضریب همبستگی نمونه آماری                            |
| $RMSE$                | مجذور میانگین مربعات خطای دما                       |
| $T^{(n+1)}$           | دمای محیط گلدان در لحظه (n+1)ام                     |
| $T_a^{(n)}$           | دمای محیط بیرون در لحظه (n)ام                       |
| $T_c$                 | دمای سطح سرد ترموالکتریک                            |
| $T_h$                 | دمای سطح گرم ترموالکتریک                            |
| $T_s$                 | زمان نشست دما                                       |
| $U$                   | ضریب کلی انتقال حرارت                               |
| $v$                   | سطح ولتاژ اعمال به مدار ترموالکتریک                 |
| $W$                   | توان الکتریکی ترموالکتریک                           |
| $Z$                   | تابع هزینه به کارگرفته شده در الگوریتم تکامل تفاضلی |

### علائم یونانی

|                                |                                            |
|--------------------------------|--------------------------------------------|
| $\alpha$                       | ضریب ثابت در محاسبه روابط ترموالکتریک      |
| $\beta$                        | ضریب ثابت در محاسبه روابط ترموالکتریک      |
| $\gamma$                       | ضریب ثابت در محاسبه روابط ترموالکتریک      |
| $\Delta t$                     | اختلاف زمان - گام زمانی (تحلیل)            |
| $\Delta T$                     | اختلاف دمای دو طرف ترموالکتریک             |
| $\mu$                          | متوسط خطا                                  |
| $\sigma$                       | انحراف از معیار (پراکندگی) خطا             |
| $\omega_3, \omega_2, \omega_1$ | ضرایب وزنی بی بعد ساز در محاسبه تابع هزینه |

## منابع

1- Kojima C. Hierarchical network identification of large-scale systems-an approach based on dissipation equalities. IFAC Proceedings Volumes. 2014;47(3):5538-5543.

- 13- Tipsuwan Y, Chow M-Y. Control methodologies in networked control systems. *Control engineering practice*. 2003;11(10):1099-1111.
- 14- Moyne JR, Tilbury DM. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. *Proceedings of the IEEE*. 2007;95(1):29-47.
- 15- Hespanha JP, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems. *Proceedings of the IEEE*. 2007;95(1):138-162.
- 16- Navet N, Song Y, Simonot-Lion F, Wilwert C. Trends in automotive communication systems. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(6):1204-1223.
- 17- Khanna A, Kaur S. Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;157:218-231.
- 18- Tzounis A, Katsoulas N, Bartzanas T, Kittas C. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*. 2017;164:31-48.
- 19- Dobrescu R, Merezeanu D, Mocanu S. Context-aware control and monitoring system with IoT and cloud support. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;160:91-9.
- 20- Jayaraman PP, Palmer D, Zaslavsky A, Georgakopoulos D, editors. Do-it-Yourself Digital Agriculture applications with semantically enhanced IoT platform. 2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). Singapore: IEEE; 2015.
- 21- Krishna KL, Silver O, Malende WF, Anuradha K. Internet of Things application for implementation of smart agriculture system. 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud). Canada: IEEE; 2017.
- 22- Palacios R, Arenas A, Pecharroman R, Pagola F. Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(17-18):3501-355.
- 23- Lafont F, Balmat J-F. Optimized fuzzy control of a greenhouse. *Fuzzy Sets and Systems*. 2002;128(1):47-59.
- 2- Shyu KK, Liu WJ, Hsu KC. Design of large-scale time-delayed systems with dead-zone input via variable structure control. *Automatica*. 2005;41(7):1239-1246.
- 3- Fu Y, Bi J, Gao K, Chen Z, Wu J, Hao B, editors. Orion: A hybrid hierarchical control plane of software-defined networking for large-scale networks. 2014 IEEE 22<sup>nd</sup> International Conference on Network Protocols. Raleigh, NC: IEEE; 2014.
- 4- Moghadam HZ, Landers RG, Balakrishnan S. Hierarchical optimal force-position control of complex manufacturing processes. *Control Engineering Practice*. 2014;25:75-84.
- 5- Koo TJ, Pappas GJ, Sastry S. Multi-modal control of systems with constraints. *Proceedings of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (Cat No 01CH37228)*. Orlando, FL: IEEE; 2001.
- 6- He Q, Head KL, Ding J. Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2014;46:65-82.
- 7- Zhang T, Hou Y, Gao Q, Hou R, Min H, Jia L, editors. The Research of Multi-modal Control Strategy. 8<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou: IEEE; 2016.
- 8- Hu X. Research on the smooth transition of multi-mode control strategy and its application. *China Mechanical Engineering*. 2005;16(16):1423-1426.
- 9- Li X, Pan Y, Chen G, Yu H. Multi-modal control scheme for rehabilitation robotic exoskeletons. *The International Journal of Robotics Research*. 2017;36(5-7):759-777.
- 10- Jeon S-i, Jo S-t, Park Y-i, Lee J-m. Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2002;124(1):141-149.
- 11- Dargie W, Poellabauer C. Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice. New Jersey: John Wiley & Sons; 2010.
- 12- Zhou Z, Lin S, Xi Y, Li D, Zhang J. A hierarchical urban network control with integration of demand balance and traffic signal coordination. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(3):31-36.