

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Design and Experimental Implementation of an Internal Model Controller for Tank Level Regulation

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sadra Rafatnia*

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* Correspondence

sa_rafatnia@sut.ac.ir

Article History

Received: 02 Jul, 2026

Accepted: 07 Jul, 2026

ePublished: 02 Aug, 2026

ABSTRACT

Tank level control is a critical task in industrial and chemical processes, where the main objectives are to maintain the liquid level at a desired setpoint and to prevent fluid overflow. This paper presents the design and experimental implementation of a PID controller based on the internal model control approach for tank level regulation. In the proposed scheme, the process model is first identified using classical system identification methods. Then, disturbances affecting the control process are compensated by subtracting the output of the identified model from the measured process output through a feedforward path. Next, a two-tank experimental setup is designed and constructed, equipped with the required sensors, and the proposed controller is implemented on the system in the form of a PID control structure. The performance of the proposed controller is assessed under different reference level profiles and various outlet valve conditions. Laboratory results confirm the effectiveness of the proposed controller in the presence of external disturbances and measurement noise.

Keywords: Tank Level Control; Internal Model Control; PID Controller; Two-Tank System; Experimental Implementation.

طراحی و پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده مدل داخلی برای تنظیم سطح مخازن

صدرا رفعت نیا*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

کنترل سطح مخازن یکی از فرآیندهای حیاتی در واکنش‌های صنعتی و شیمیایی است، که هدف از آن حفظ سطح مخزن در مقدار مناسب و یا جلوگیری از سرریزی سیالات می‌باشد. در این مقاله با استفاده از رویکرد کنترل مدل داخلی به طراحی و پیاده‌سازی یک کنترل‌کننده PID در جهت تنظیم سطح مخازن پرداخته می‌شود. در روش پیشنهادی، پس از شناسایی مدل فرآیند با استفاده از روش‌های شناسایی کلاسیک، با کم کردن مدل شناسایی شده در یک حلقه پیش‌خور از خروجی فرآیند، اغتشاشات موجود در فرآیند کنترل می‌شود. در ادامه، پس از طراحی و ساخت یک مجموعه دو تانکه، به حسگربندی آن پرداخته شده و در نهایت کنترل‌کننده پیشنهادی در ساختار یک کنترل‌کننده PID بر روی این سیستم پیاده‌سازی می‌شود. کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای پروفیل‌های مختلف ورودی ارتفاع مرجع و شرایط مختلف شیر خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور اغتشاشات خارجی و نویزهای اندازه‌گیری می‌باشد.

کلید واژه‌ها

کنترل سطح مخازن، کنترل مدل داخلی، کنترل‌کننده PID، مجموعه دو تانکه، پیاده‌سازی عملی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

* نویسنده مسئول: sa_rafatnia@sut.ac.ir

۱ مقدمه

کنترل سطح مایع به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند فرآوری مواد غذایی، تصفیه آب و پساب، تولید برق، فرآوری شیمیایی و دارویی، و دیگ‌های بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. سیستم مخازن معمولاً متشکل از مایعی قابل تراکم برای پمپ شدن، مخزن ذخیره اولیه و سیستم مخزن دوم جهت تعدیل فشار و دما می‌باشد. همچنین از پمپ برای انتقال مایع به مخزن اولیه و از شیرها جهت ایجاد ارتباط بین مخازن و خروج مایع استفاده می‌شود. در این ساختارها با توجه به خواص سیال، شرایط محیطی و نیز نرخ مصرفی، باید سطح مایع مخزن به گونه‌ای به مقدار مطلوب برسد که از یک‌سو مخزن دچار سرریز نگردد و از سوی دیگر موجب کم شدن مایع نسبت به سطح مورد نظر نگردد تا همیشه فشار معینی از مایع را در اختیار داشته باشند [۳]. به همین منظور کنترل سطح این مخازن از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، کنترل کارآمد و مؤثر این فرآیندها دارای مزیت اقتصادی بسیار زیادی بوده و موفقیت آن به نوع روش کنترل بستگی دارد [۴].

در کنترل مخازن، از انواع مختلفی از روش‌های کنترلی مانند کنترل PID [۵]، سیستم‌های کنترل با استفاده از هوش مصنوعی [۶]، و روش کنترل با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی [۷] استفاده می‌شود. کنترل‌کننده‌های خانواده PID به دلیل سادگی در طراحی و اجرا، مقرون به صرفه بودن، بیش از ۸۰ درصد از کنترل‌کننده‌های سطح صنعتی در این زمینه را تشکیل می‌دهند. اهداف کنترلی در این فرآیندها یا حفظ سطوح مخازن در یک سطح ثابت (مانند تصفیه‌خانه فاضلاب) بوده و یا در برخی دیگر از فرآیندها ممکن است نیاز به پیروی از نمایه سطوح متغیر زمانی (سیستم تحویل خودکار دارو) داشته باشند. کنترل‌کننده‌ها باید هر دو هدف ثلثت نگه داشتن یک متغیر فرآیند و وادار نمودن فرآیند برای دنبال کردن سیگنال مرجع متغیر با زمان را به طور همزمان برآورده نمایند. حسین و همکاران [۸] به منظور کنترل

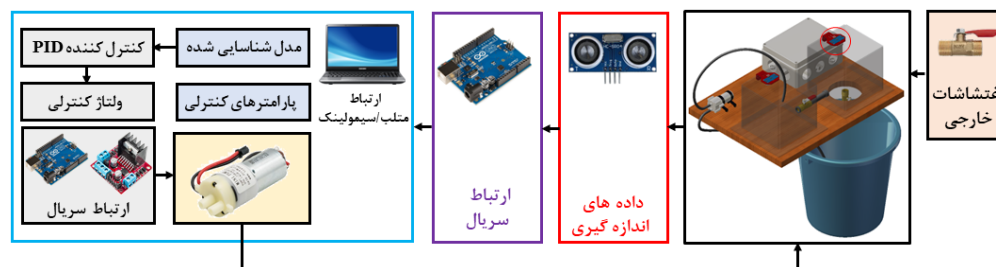
اگرچه این روش‌ها در مواجهه با اغتشاشات کارایی مناسبی دارند، اما اغلب نیازمند محاسبات پیچیده و سنگین هستند که پیاده‌سازی بلادرنگ آن‌ها را بر روی سخت‌افزارهای صنعتی محدود با چالش مواجه می‌کند. علاوه بر بار محاسباتی بالا، طراحی این کنترل‌کننده‌ها اغلب به مدل‌سازی دقیق و فرآیندهای تطبیقی پیچیده وابسته است که در شرایط تغییرات شدید پارامتری، کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. بنابراین، نیاز به توسعه روش‌هایی با ساختار ساده‌تر، پایداری تضمین‌شده و قابلیت دفع اغتشاشات بالا، همچنان به عنوان یک ضرورت در طراحی کنترل‌کننده‌ها باقی مانده است.

در این مقاله برای مقابله با تأثیرات اغتشاشات خارجی، استفاده از روش کنترل مدل داخلی پیشنهاد می‌شود. روش کنترل مدل داخلی یک رویکرد پیشرفته در حوزه طراحی کنترل‌کننده‌ها برای مدیریت سیستم‌ها با اغتشاش خارجی است. در این روش، از یک مدل شناسایی شده در یک حلقه پس‌خور به منظور کاهش اثرات اغتشاش خارجی سیستم استفاده می‌شود. سپس، کنترل‌کننده پیشنهادی تبدیل به ساختار یک کنترل‌کننده PID شده و در یک حلقه بازخورد به سیستم واقعی اعمال می‌شود. با استفاده از این رویکرد، کنترل‌کننده PID قادر است بهبودهای چشم‌گیری در پایداری و عملکرد سیستم‌های کنترلی در حضور اغتشاشات خارجی و نویزهای اندازه‌گیری ایجاد نماید. در ادامه به منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، به طراحی، ساخت و حسگربندی یک سیستم دو تانکه پرداخته می‌شود. پس از ساخت دستگاه و استخراج مدل فرآیند توسط الگوریتم‌های شناسایی کلاسیک به پیاده‌سازی کنترل‌کننده PID به کمک روش کنترل مدل داخلی در حضور اغتشاشات خارجی پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده به صورت برخط ولتاژ مورد نیاز پمپ را محاسبه نموده سپس ولتاژ کنترلی به صورت سخت‌افزار در حلقه با استفاده از نرم‌افزار متلب بر روی شبیه‌ساز فرآیند دو تانکه پیاده‌سازی می‌شود.

سطوح مخازن به طراحی کنترل‌کننده PID پرداختند. در این کار از روش کوهن-کن برای تنظیم ضرایب وزنی کنترل‌کننده استفاده شد. در کاری دیگر با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات به تنظیم ضرایب وزنی کنترل‌کننده پرداخته شد [۹]. استفاده از ایده تنظیم ضرایب وزنی به کمک روش فازی توسط ژائو و همکاران [۱۰] ارائه شد. مانا و همکاران [۱۱] از روش مدل مبنا در کنار کنترل‌کننده PID برای تنظیم سطح مخازن استفاده کردند. در خانواده دیگری از کنترل‌کننده‌های PID، استفاده از ایده مرتبه‌کسری در کارهای مختلفی توسط کومار و همکاران [۱۲] و روی و همکاران [۱۳] ارائه شدند.

در تمامی کارهای ارائه‌شده در بالا، اثر اغتشاشات موجود در فرایند بر طراحی کنترل‌کننده لحاظ نشده است. این در حالی است که اغتشاشات خارجی یکی از چالش‌های اساسی در طراحی کنترل‌کننده‌ها به شمار می‌روند و تأثیر بسزایی بر عملکرد و پایداری سیستم‌های کنترلی دارند. در صورت شدت یافتن این اغتشاشات، امکان ناپایداری سیستم وجود دارد و حتی در صورت پایداری، رسیدن به وضعیت مطلوب با تأخیر قابل توجهی همراه خواهد بود [۱۴]. از سوی دیگر، اغتشاشات خارجی عملکرد کنترلی را تضعیف می‌کنند، چراکه کنترل‌کننده قادر نیست به سرعت و با دقت کافی به تغییرات وضعیت سیستم واکنش نشان دهد [۱۵].

بر همین اساس، استفاده از روش‌های کنترل تطبیقی یکی از رویکردهای رایج در مراجع است [۱۶، ۱۷]. در این دسته از روش‌ها، با به‌کارگیری الگوریتم‌های تخمین‌گر، اثر اغتشاشات شناسایی شده و در اختیار کنترل‌کننده قرار می‌گیرد تا سیستم بتواند واکنشی پویا و مناسب در برابر آن‌ها نشان دهد. به‌طور مشخص، خو و همکاران [۱۸] با بهره‌گیری از روش تخمین و کاهش اغتشاشات L_2 ، یک کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم دو تانکه طراحی کردند. افزون بر این، به‌منظور تنظیم سطح مایع در سیستم دو تانکه، به‌کارگیری روش‌های پسگام مبتنی بر مدل [۱۹] و پسگام انتگرالی [۲۰] نیز مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱: ساختار کلی سیستم سخت‌افزار در حلقه و الگوریتم پیشنهادی.

۳ طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی

در این مقاله به طراحی و ساخت یک سیستم دو تانکه با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ جهت پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده پیشنهادی، پرداخته شده است. به همین منظور پس از طراحی این مجموعه در نرم‌افزار کتیا^۲ که شماتیک آن در شکل ۲ ارائه شده است، به ساخت و حسگربندی مجموعه مبادرت شد. سیستم ساخته شده براساس این طرح در شکل ۳ ارائه شده است. در این سیستم از دو حسگر اولتراسونیک^۳ جهت اندازه‌گیری ارتفاع مخازن با فرکانس ۵۰ هرتز استفاده شده است. یک پمپ ۱۲ ولت با بیشینه دبی ۲/۵ لیتر بر دقیقه ورودی آب به مخزن اولیه را اعمال می‌نماید. دو شیر با قطر ۵ سانتی‌متر به عنوان رابط ارتباطی بین دو مخزن و خروجی مخزن شماره دو مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دو آردوینو UNO به عنوان فرستنده و گیرنده سیگنال حسگرها و ورودی کنترلی استفاده شده و پردازش‌ها در یک لپ‌تاپ با مشخصات Intel(R) Core(TM) i7 و پردازنده 6500U در فرکانس 2.50 GHz و 4 MB کش انجام شده است. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که از سیمولینک نسخه R2022a جهت این پردازش‌ها بهره برده شده است.

برای این منظور ابتدا در بخش بعدی ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. پس از آن معادلات دینامیکی سیستم دو تانکه استخراج شده و پارامترهای آن شناسایی می‌شود. در بخش طراحی کنترل‌کننده، کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی شده و در نهایت نحوه پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت سخت‌افزار در حلقه در بخش پیاده‌سازی عملی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌گردد.

۲ ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

شکل ۱ نمای کلی سیستم سخت‌افزار در حلقه و روش کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد. این سیستم متشکل از دو مخزن است که توسط یک شیر به یکدیگر متصل شده‌اند. از یک پمپ برای تزریق آب به مخزن اولیه استفاده می‌شود. حسگرهای ارتفاع‌سنج به مجموعه متصل شده تا ارتفاع آب موجود در مخازن را اندازه بگیرند. در این مجموعه از ارتباط سریالی بین سیستم و رایانه برای دریافت داده‌ی حسگرها و ارسال ورودی کنترلی استفاده می‌شود. شایان ذکر است از نرم‌افزار سیمولینک^۱ جهت پردازش اطلاعات و پیاده‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده است.

³ Ultrasonic

¹ Simulink

² Catia

می‌شود. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که ولتاژ پمپ رابطه خطی با دبی پمپ دارد.

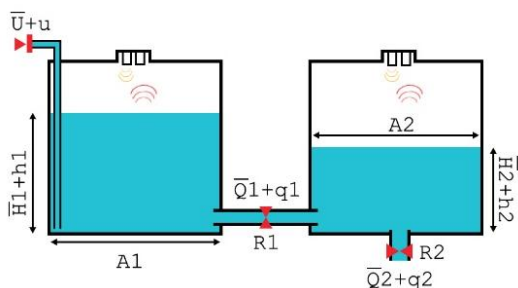
$$A_1 \dot{h}_1 = u - q_1, \quad (۱)$$

$$A_2 \dot{h}_2 = q_1 - q_2, \quad (۲)$$

که در آن A_i ($i = 1, 2$) و h_i ($i = 1, 2$) به ترتیب مجموعه سطح و ارتفاع مخازن یک و دو از حالت پایا هستند. همچنین q_1 دبی عبوری از سمت مخزن شماره یک به شماره دو و q_2 دبی تخلیه به هوای آزاد در شرایط پایا بوده و به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$q_1 = \frac{h_1 - h_2}{R_1}, \quad (۳)$$

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2}, \quad (۴)$$

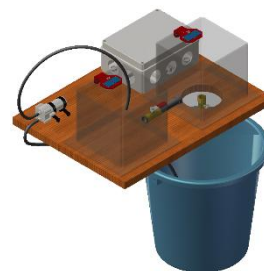


شکل ۴: ساختار شماتیکی سیستم انتقال دو مخزن.

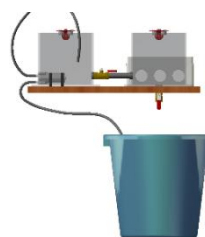
که در آن، R_i ($i = 1, 2$) مقاومت شیرها می‌باشند. این نکته لازم به ذکر بوده به دلیل نوشتن معادلات از حالت پایا، دینامیک خطی در بخش شیرها در نظر گرفته شده است. با جایگذاری معادلات (۳) و (۴) در معادلات (۱) و (۲) و محاسبه تبدیلات لاپلاس، تابع تبدیل بین ورودی کنترلی و ارتفاع مخزن دوم به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{G}(s) = \frac{h_2(s)}{u(s)} = \frac{K\beta}{s^2 + \alpha s + \beta}, \quad (۵)$$

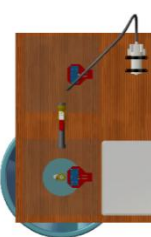
که در آن ضرایب تابع تبدیل α و β به شکل زیر محاسبه می‌شوند:



(الف)

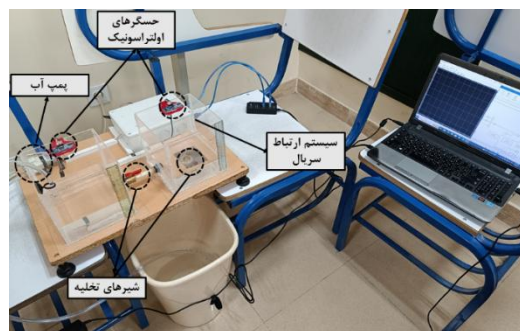


(ج)



(ب)

شکل ۲: سیستم طراحی شده در نرم‌افزار کتیا، (الف) نمای ایزومتریک، (ب) نمای بالا، (ج) نمای جانبی.



شکل ۳: سیستم دو تانک ساخته شده.

۴ معادلات دینامیکی سیستم

در این بخش به استخراج مدل دینامیکی سیستم دو تانکه پرداخته می‌شود. ساختار این سامانه در شکل ۴ ارائه شده است. براساس شکل ۴ با در نظر گرفتن ورودی کنترلی اعمال شده توسط پمپ به شکل u ، معادلات سیستم به شکل زیر استخراج

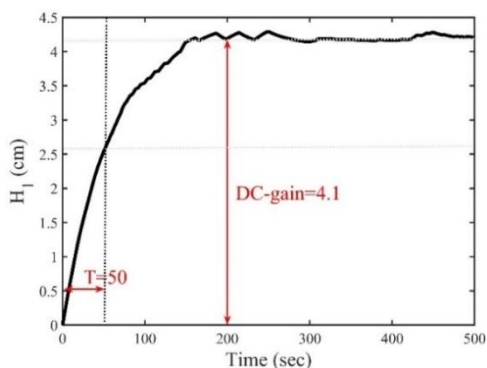
می‌باشد. براساس شکل ۶ و معادله (۵)، ضرایب تابع تبدیل ورودی سیستم به خروجی ارتفاع تانک دوم به شکل زیر استخراج می‌شود:

$$y_{ss} = \lim_{x \rightarrow \infty} y(t) = D = 5.3, \quad (9)$$

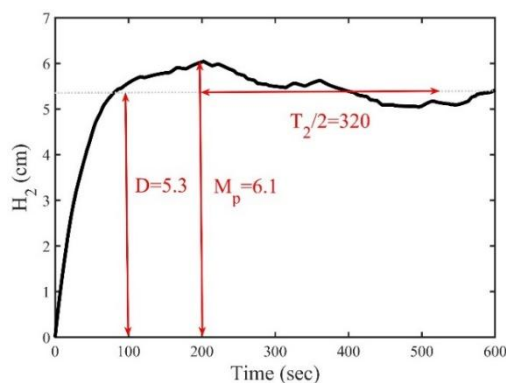
$$M = \frac{M_p}{K} - 1 = 0.151, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{4}{T_2^2} [\pi^2 + (\ln M)^2] = 1.3225e - 4, \quad (11)$$

$$\alpha = -2 \frac{\ln M}{[\pi^2 + (\ln M)^2]^{1/2}} \sqrt{\beta} = 1.1872e - 2. \quad (12)$$



شکل ۵: تست ۱- برای شناسایی مقاومت شیر شماره یک.



شکل ۶: تست ۲- برای شناسایی مقاومت شیر شماره دو.

$$\alpha = \frac{\{A_1 \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) + A_2\}}{A_1 A_2 R_1}, \quad \beta = \frac{1}{A_1 A_2 R_1 R_2}.$$

همچنین پارامتر K بهره تنظیم می‌باشد. در بخش‌های بعدی، ابتدا پارامترهای سیستم شناسایی شده، سپس براساس مدل شناسایی شده به طراحی کنترل کننده مدل داخلی پرداخته خواهد شد.

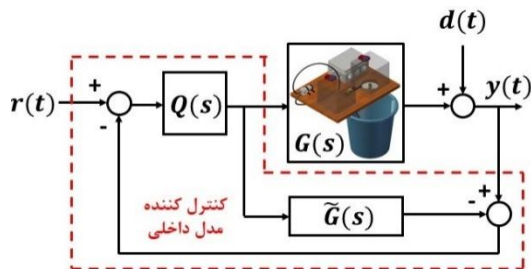
۵ شناسایی پارامترهای دینامیکی

در این بخش به شناسایی پارامترهای دینامیکی سیستم شامل مقاومت دو شیر پرداخته خواهد شد. به منظور شناسایی مقاومت شیر اول، این شیر و شیر دوم را به طور کامل باز کرده و ولتاژی به اندازه ۶ ولت به پمپ اعمال می‌شود. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که این ولتاژ به منظور جلوگیری از افزایش ارتفاع مخزن دوم و ایجاد استقلال در معادلات مخزن اول اعمال می‌شود. از آنجایی که در این تست ارتفاع مخزن دوم صفر بوده، دبی خروجی از مخزن به صورت $q_1 = \frac{h_1}{R_1}$ مدلسازی شده و تابع تبدیل سیستم به شکل زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$\frac{h_1(s)}{u(s)} = \frac{K_1 R_1}{R_1 A_1 s + 1}. \quad (7)$$

با انجام این تست، نتیجه تغییرات ارتفاع خروجی در مخزن شماره یک در شکل ۵ ارائه شده است. براساس شکل ۵، ثابت زمانی سیستم (T) مقدار ۵۰ ثانیه قابل محاسبه بوده و از آنجایی که سطح مقطع مخزن ۱۲۵ سانتی متر مربع می‌باشد، مقدار مقاومت شیر ۰/۴ s/cm² قابل محاسبه می‌باشد. همچنین براساس مقدار بهره دی‌سی و ورودی ۶ ولت سیستم، مقدار بهره $K_1 = 1.708$ قابل محاسبه می‌باشد.

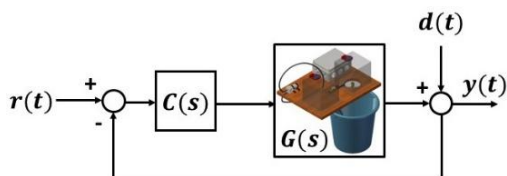
در مرحله بعد به منظور استخراج مقاومت شیر دوم، با کاهش دبی خروجی مخزن دوم و اعمال ۱۲ ولت به پمپ، شکل ۶ از ارتفاع مخزن شماره دو اندازه‌گیری می‌شود. در این شکل M_p بیشینه فراجش، $y_{ss} = D$ مقدار نهایی و T_2 دوره تناوب



شکل ۷: کنترل کننده مدل داخلی.

در این صورت سیستم حلقه بسته پایدار داخلی است، اگر و تنها اگر $Q(s)$ و $G(s)$ هر دو پایدار باشند. براساس رابطه (۵) و از آن جایی که سیستم مخازن همواره سیستم پایداری هستند، آن گاه سیستم حلقه بسته به ازای حضور $Q(s)$ پایدار، همواره پایدار داخلی خواهد بود. به ساختار ارائه شده به این صورت، ساختار فاکتور Q نیز گفته می‌شود. به منظور طراحی کنترل کننده برای این مجموعه به شکل PID، می‌توان ساختار ارائه شده در شکل ۷ را به صورت شکل ۸ تبدیل نمود. که در آن با مقایسه شکل ۷ و ۸ می‌توان کنترل کننده $C(s)$ را به شکل زیر استخراج نمود:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)\tilde{G}(s)} \quad (۱۵)$$



شکل ۸: کنترل کننده PID در ساختار کنترل کننده مدل داخلی.

طبق قضیه یولا [۲۰]، سیستم حلقه بسته با $G(s)$ پایدار و کنترل کننده ارائه شده در (۱۵) پایدار داخلی است، اگر و تنها اگر $Q(s)$ پایدار باشد. در نتیجه با فرض $G(s)$ پایدار برای سیستم حلقه بسته ارائه شده در شکل ۷ تمامی کنترل کننده‌های پایدار ساز را می‌توان به فرم (۱۵) پارامتریزه نمود که در آن $Q(s)$ یک تابع تبدیل پایدار است.

همچنین از آنجایی که مقدار نهایی به ازای ولتاژ ۱۲ ولت، ۵/۳ می‌باشد، مقدار بهره K در تابع تبدیل (۵) مقدار ۰/۴۴۱ قابل محاسبه می‌باشد. با مقایسه روابط (۹) تا (۱۲) و رابطه (۵)، مقاومت شیر دوم، ۱/۲۱ s/cm² محاسبه می‌شود.

۶ طراحی کنترل کننده مدل داخلی

در این بخش به طراحی کنترل کننده مدل داخلی با ساختار کنترل کننده PID پرداخته می‌شود. ساختار کنترل کننده مدل داخلی پیشنهادی در شکل ۷ ارائه شده است. در این ساختار از مدل شناسایی شده در بخش قبل در یک حلقه پیش‌خور استفاده می‌شود. در ادامه سیگنال کنترلی که از کنترل کننده صادر می‌شود، به صورت یکسان به سیستم واقعی و مدل شناسایی شده آن اعمال می‌شود و سیگنال خطای حاصل که می‌تواند اغتشاشات و نویزها را شناسایی کند، پس‌خور می‌شود. مزیتی که کنترل کننده مدل داخلی دارد این است که در صورتی که مدل شناسایی شده به میزان مطلوبی به مدل واقعی نزدیک باشد، رفتار سیستم حلقه بسته، مستقل از مدل سیستم خواهد شد و عملکرد آن توسط کنترل کننده تعیین می‌شود. در ادامه به روند طراحی این کنترل کننده پرداخته می‌شود.

براساس شکل ۷، تابع تبدیل بین ورودی مرجع و خروجی سیستم به شکل زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Q(s)G(s)}{1 + Q(s)[G(s) - \tilde{G}(s)]} \quad (۱۳)$$

با فرض این که مدل شناسایی شده از سیستم یک مدل دقیق باشد ($G(s) = \tilde{G}(s)$)، آن گاه با توجه به شکل ۷ و رابطه (۱۳) عملاً حلقه پس‌خور باز شده و یک سیستم حلقه باز با تابع تبدیل زیر استخراج می‌شود:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = Q(s)G(s). \quad (۱۴)$$

۷ نتایج پیاده‌سازی عملی

در این بخش نتایج پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده مدل داخلی در ساختار PID ارائه می‌شود. براساس شکل ۱، هدف طراحی، کنترل ولتاژ پمپ ورودی متصل به مخزن شماره یک می‌باشد، تا ارتفاع مخزن شماره دو در سطح مناسبی قرار گیرد. در این ساختار شیر متصل بین دو مخزن به صورت کامل باز بوده و عملکرد کنترل‌کننده در حضور اغتشاش ناشی از شرایط مختلف باز بودن شیر شماره دو مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نکته لازم به ذکر می‌باشد که از یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع یک هرتز در جهت نویززدایی از داده‌های حسگرهای اولتراسونیک بهره برده شده است.

در ابتدا عملکرد کنترل‌کننده به ازای باز بودن شیر شماره دو به اندازه ۷۵ درصد مقدار نهایی خود مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج خروجی به ازای این آزمایش برای ردیابی مقدار مرجع ۵ سانتی‌متر برای ارتفاع مخزن دوم در شکل ۹ ارائه شده است. براساس شکل ۹ (الف)، کنترل‌کننده از عملکرد مطلوبی در جهت ردیابی مسیر مرجع برخوردار می‌باشد. نتایج تغییرات ارتفاع موجود در مخزن شماره یک نیز در شکل ۹ (ب) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع در مخزن شماره یک عامل انتقال دبی از این مخزن به مخزن شماره دو می‌باشد. شکل ۹ (ج) ولتاژ کنترلی پمپ متصل به مخزن شماره یک را ارائه می‌دهد. ولتاژ نهایی در این پمپ ۱۲ ولت بوده و مخزن تا ۵۰ ثانیه با ولتاژ ۸ ولت در حال رسیدن به سطح پایا می‌باشد.

به منظور نمایش استقلال نتایج کنترل‌کننده از مسیر مرجع و همچنین بررسی عملکرد کنترل‌کننده در شرایط اغتشاش متفاوت، نتایج کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای ۵۰ درصد باز بودن شیر شماره دو ارائه می‌شود. براساس شکل ۱۰ این کنترل‌کننده از عملکرد مطلوبی در ردیابی مسیر متغیر با زمان در حضور منابع اغتشاش دارد. رسیدن به حد ۱۲ ولت ولتاژ کنترلی در نقاط تغییر مسیر به وضوح در شکل ۱۰ (ج) قابل مشاهده می‌باشد.

به منظور طراحی تابع تبدیل $Q(s)$ ، با توجه به (۱۴) می‌توان آن را به شکل زیر در نظر گرفت:

$$Q(s) = F_r(s)G^{-1}(s), \quad (۱۶)$$

که در آن $F_r(s)$ یک پیش‌فیلتر بوده و در جهت سره شدن کنترل‌کننده و امکان عملی پیاده‌سازی به معکوس دینامیک سیستم اعمال می‌شود. تابع تبدیل این پیش‌فیلتر به شکل زیر می‌باشد:

$$F_r(s) = \frac{1}{(\tau_c s + 1)^r} \quad (۱۷)$$

که در آن τ_c ثابت زمانی پیش‌فیلتر بوده و شکل پاسخ مطلوب خروجی را نمایش می‌دهد. همچنین درجه r تعداد قطب‌های مورد نیازی می‌باشد تا کنترل‌کننده سره شود. در نهایت بعد از این‌که کنترل‌کننده استخراج شد، می‌توان از رابطه (۱۵) کنترل‌کننده فیدبک را استخراج نمود. در این پژوهش با در نظر گرفت مدل سیستم ارائه شده در (۵) و پیش‌فیلتر در نظر گرفته شده با درجه $r = 2$ می‌توان کنترل‌کننده زیر را استخراج نمود:

$$C(s) = \frac{s^2 + \alpha s + \beta}{K\beta(\tau_c^2 s^2 + 2\tau_c s)}. \quad (۱۸)$$

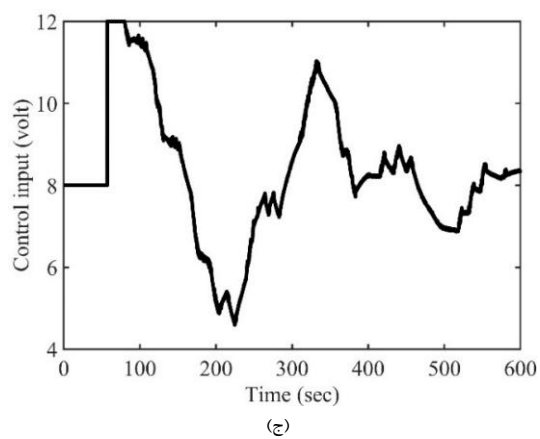
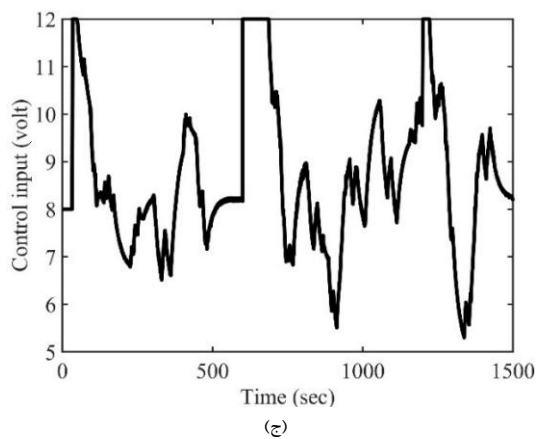
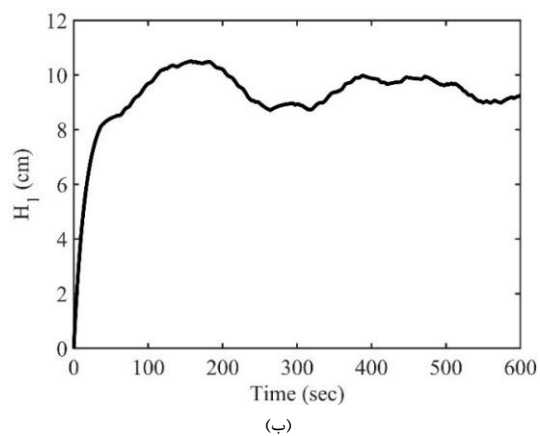
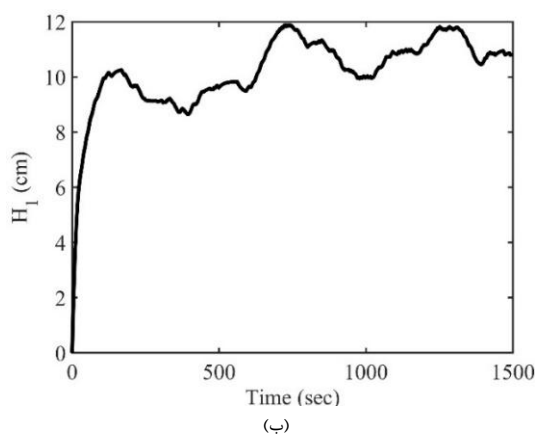
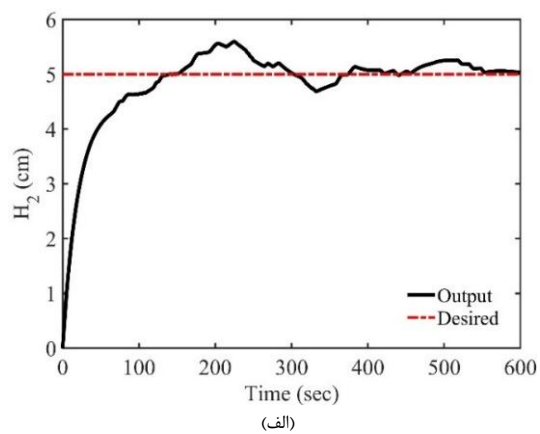
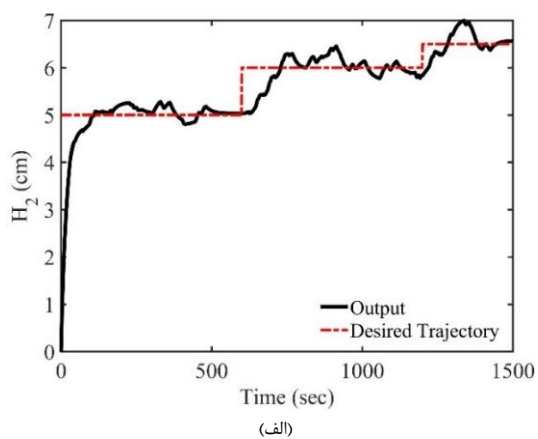
کنترل‌کننده ارائه شده در (۱۸) را می‌توان به فرم استاندارد یک کنترل‌کننده PID به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_c s + 2} \right), \quad (۱۹)$$

که در آن ضرایب کنترل‌کننده به شکل زیر استخراج می‌شوند.

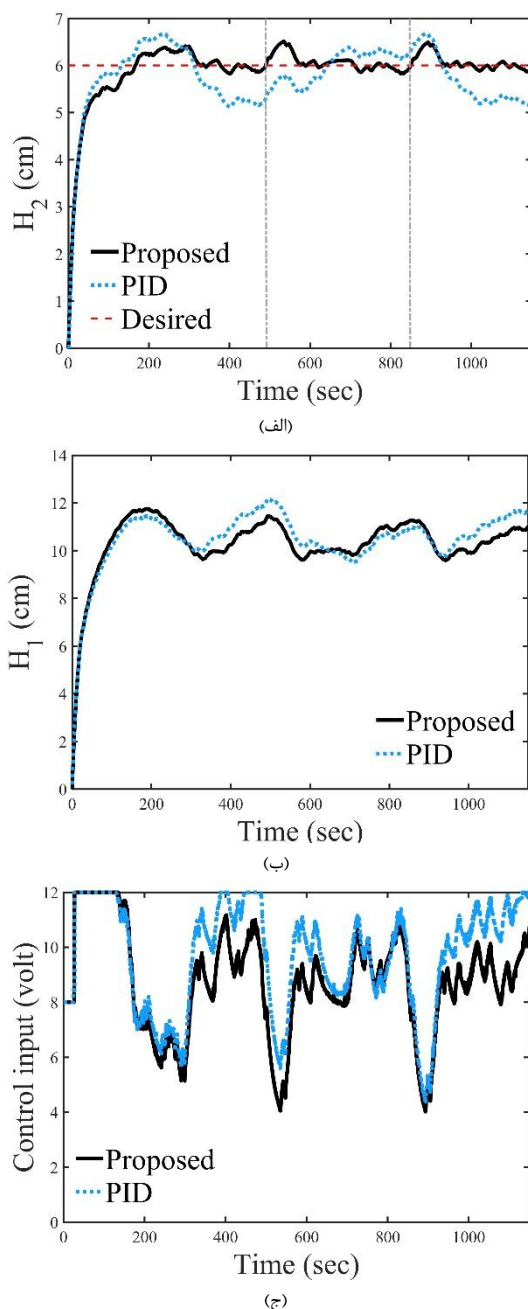
$$K_p = \frac{\alpha}{K\beta\tau_c}, \quad T_i = \frac{\alpha}{\beta}, \quad T_d = \frac{1}{\alpha}.$$

در ادامه نتایج پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده پیشنهادی در بستر آزمایشگاهی ارائه می‌شود.



شکل ۱۰: نتایج ردیابی پله متغیر، (الف) ارتفاع مخزن شماره دو، (ب) ارتفاع مخزن شماره یک، (ج) ورودی کنترلی.

شکل ۹: نتایج ردیابی پله واحد، (الف) ارتفاع مخزن شماره دو، (ب) ارتفاع مخزن شماره یک، (ج) ورودی کنترلی.



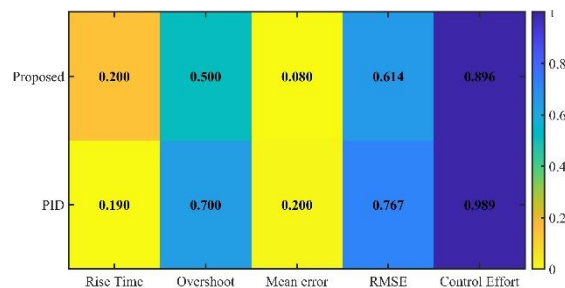
شکل ۱۱: مقایسه روش پیشنهادی با کنترل کننده PID، (الف) ارتفاع مخزن شماره دو، (ب) ارتفاع مخزن شماره یک، (ج) ورودی کنترلی.

شکل ۱۱ عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با کنترل کننده PID نشان می‌دهد. شایان ذکر است که از روش زیگلر-نیکولز برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID استفاده شده است. در این مقایسه، به منظور ارزیابی عملکرد در حضور اغتشاشات متغیر، موقعیت شیر در ثانیه ۴۸۰ از ۳۰ درصد به ۵۰ درصد و در ثانیه ۸۵۰ به ۷۰ درصد تغییر داده می‌شود. همان‌طور که در زیرشکل ۱۱ (الف) مشخص است، روش پیشنهادی با بهره‌گیری از ساختار مدل داخلی و قابلیت حذف اغتشاشات، در تنظیم سطح ارتفاع مخازن، به‌ویژه در مخزن دوم، دقت بیشتری دارد. روش پیشنهادی پس از گذرای اولیه، مقدار مرجع ۶ سانتی‌متر را با خطای کم‌تر و نوسان محدودتری دنبال می‌کند؛ این در حالی است که کنترل کننده PID انحراف بیشتری از مقدار مطلوب نشان می‌دهد. علاوه بر این، نقشه حرارتی مقایسه پارامترهای عملکردی (شکل ۱۲) نیز برتری روش پیشنهادی را تایید می‌کند. نتایج ریشه میانگین مربعات خطا و ورودی کنترلی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به PID عملکرد بهتری دارد. مطابق شکل ۱۲، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ردیابی و همچنین ورودی کنترلی در روش پیشنهادی کم‌تر از PID است که این امر بیانگر کاهش خطای ملنگار و بهبود تلاش کنترلی است. گفتنی است که در این شکل، به منظور مقایسه دقیق‌تر، پارامترهای عملکردی نرمال‌سازی شده‌اند.

۸ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، طراحی و پیاده‌سازی عملی یک کنترل کننده مدل داخلی با ساختار PID برای تنظیم سطح مایع در یک سامانه دو تانکه ارائه شد. بدین منظور، پس از طراحی و ساخت مجموعه آزمایشگاهی و شناسایی پارامترهای دینامیکی سیستم، کنترل کننده پیشنهادی بر بستر سخت‌افزار در حلقه پیاده‌سازی و عملکرد آن در شرایط مختلف عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که روش پیشنهادی در ردیابی مقادیر

- [6] Son, N. N., 2020. "Level control of quadruple tank system based on adaptive inverse evolutionary neural controller". *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18(9), pp. 2386-2397.
- [7] Valdez, F., Vazquez, J. C., and Gaxiola, F., 2018. Fuzzy dynamic parameter adaptation in ACO and PSO for designing fuzzy controllers: the cases of water level and temperature control. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018.
- [8] Hussien, S. Y. S., Jaafar, H. I., Selamat, N. A., Daud, F. S., & Abidin, A. F. Z., 2014. "PID control tuning via particle swarm optimization for coupled tank system". *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 4(2), pp. 202-206.
- [9] Jaafar, H. I., Hussien, S. Y. S., Selamat, N. A., Nasir, M. N. M. and Jali, M. H., 2014. "Analysis of Transient Response for Coupled Tank System via Conventional and Particle Swarm Optimization (PSO) Techniques". *International Journal of Engineering and Technology*, 6(5), pp. 2002-2007.
- [10] Zhao, Y., Zhang, Y., Gong, Y., & Zou, X. (2023, November). Design of Double Tank Liquid Level Control System Based on Fuzzy PID. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2650, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
- [11] Manna, S., Singh, D. K., Ghadi, Y. Y., Yousef, A., Kotb, H., & AboRas, K. M. (2023). Probabilistic Bi-level Assessment and adaptive control mechanism for two-Tank Interacting System. *IEEE Access*, 11, 118268-118280.
- [12] Kumar, A., Vashishth, M., & Rai, L., 2013. "Liquid level control of coupled tank system using fractional PID controller". *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics*, 3(1), pp. 61-64.
- [13] Roy, P., and Roy, B. K., 2016. "Fractional order PI control applied to level control in coupled two tank MIMO system with experimental validation". *Control Engineering Practice*, 48, 119-135.
- [14] Rafatnia, S., & Mirzaei, M. (2026). Optimization-based fixed-time control of a thermoelectric element using disturbance and uncertainty estimate: Design and experiment. *Control Engineering Practice*, 168, 106666.
- [15] Rafatnia, S., & Mirzaei, M. (2026). Novel practically finite-time constrained control of thermoelectric coolers with model-updated approach. *International Journal of Dynamics and Control*, 14(1), 18.
- [16] Ahmadlou, N., Mirzaei, M., Rafatnia, S., & Jamshidi, S. (2025). Input-constrained fixed-time fault-tolerant tracking control of autonomous wheeled mobile robot. *Results in Control and Optimization*, 100636.



شکل ۱۲: نقشه حرارتی مقایسه شاخص‌های عملکردی دو روش کنترل.

مرجع و مقابله با اغتشاشات خارجی و نویزهای اندازه‌گیری، عملکرد مطلوب و پایداری از خود نشان می‌دهد. همچنین، مقایسه با کنترل‌کننده PID متداول بیانگر آن است که ساختار پیشنهادی با بهره‌گیری از مدل داخلی، دقت بیشتری در تنظیم سطح، خطای کم‌تر و تلاش کنترلی مناسب‌تری فراهم می‌سازد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده، مؤثر و قابل‌پیاده‌سازی در کاربردهای صنعتی مرتبط با کنترل سطح مخازن مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] Cartes, D., and Wu, L., 2005. "Experimental evaluation of adaptive three-tank level control". *ISA transactions*, 44(2), pp. 283-293.
- [2] Short, M., and Selvakumar, A. A., 2020. "Non-linear tank level control for industrial applications". *Applied Mathematics*, 11(9), pp. 876-889.
- [3] Başçi, A., and Derdiyok, A., 2016. "Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system". *Measurement*, 91, pp. 12-18.
- [4] Khan, M. K., and Spurgeon, S. K., 2006. "Robust MIMO water level control in interconnected twin-tanks using second order sliding mode control". *Control engineering practice*, 14(4), pp. 375-386.
- [5] Kumar, S., and Nagpal, P., 2017. "Comparative Analysis of P, PI, PID and Fuzzy Logic Controller for Tank Water Level Control System". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4), pp. 1174-1177.

- backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, 13(1), 27-40.
- [20] Rasmussen, B. P., and Alleyne, A. G., 2009. "Gain scheduled control of an air conditioning system using the Youla parameterization". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(5), pp. 1216-1225.
- [17] Mirzaei, M., Rafatnia, S., Shahir, M. M., Jamshidi, S., & Farbodi, M. (2025). Observer-based fault tolerant control of shape memory alloy actuator. *Scientific Reports*, 15(1), 39455.
- [18] Xu, T., Yu, H., Yu, J., & Meng, X. (2020). Adaptive disturbance attenuation control of two tank liquid level system with uncertain parameters based on port-controlled Hamiltonian. *IEEE Access*, 8, 47384-47392.
- [19] Pan, H., Wong, H., Kapila, V., & de Queiroz, M. S. (2005). Experimental validation of a nonlinear