



طراحی کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش خور برای کنترل دمای سیال خروجی مبدل های حرارتی پوسته و لوله های

مسعود عابدینی فر^۱، جعفر غفوری^۲، لاریسا خدادادی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز
Abedinifar@hotmail.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز
Gh_jafar@yahoo.com

^۳ مربی، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز
lkhodadadi@iaut.ac.ir

چکیده

در فرآیندهای شیمیایی، مهمترین بخشی که مستقیماً با مصرف انرژی ارتباط دارد، مبدل های حرارتی هستند. هدف اصلی مبدل های حرارتی انتقال حرارت از سیال گرم به سیال سرد می باشد. در صنعت انواع مختلفی از مبدل های حرارتی وجود دارند که رایج ترین نوع آنها، مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای هستند. در این مبدل ها، یکی از سیالات در لوله ها و دیگری در داخل پوسته در اطراف لوله ها جریان می یابد. در مبدل های حرارتی یکی از مسائل اصلی، رساندن دمای سیال خروجی به دمای مورد نظر در کوتاه ترین زمان ممکن است. در این مقاله برای کنترل دمای سیال خروجی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای، کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش خور طراحی شده است. ابتدا، مدل سازی ریاضی فرآیند با استفاده از داده های تجربی موجود انجام می شود، سپس کنترل کننده مورد نظر طراحی می شود. کنترل کننده طراحی شده، دمای خروجی سیال گرم شونده را به یک نقطه مطلوب در کوتاه ترین زمان ممکن بدون در نظر غیر خطی بودن فرآیند، تنظیم می کند. در ادامه، عملکرد کنترل کننده طراحی شده بر اساس تحلیل پاسخ پله واحد و شاخص های عملکرد مربوط به سیستم کنترلی ارزیابی می شود. مدل سازی تمامی فرآیندها و طراحی کنترل کننده، در محیط سیمولینک نرم افزار متلب انجام شده است.

کلمات کلیدی

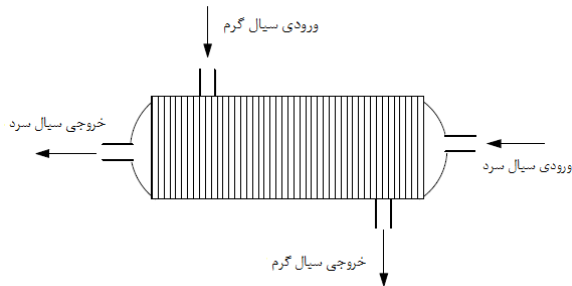
سیمولینک متلب، کنترل کننده PID، کنترل کننده پیش خور، مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای.

پوسته و لوله ای شامل یک سری لوله موازی است که در داخل یک پوسته استوانه ای احاطه شده اند. در مبدل های حرارتی یک سیال از طریق لوله ها و سیال دیگر در اطراف لوله ها جریان می یابد [۱].

پژوهش هایی که در زمینه کنترل دمای مبدل های حرارتی تاکنون انجام شده است بیشتر به سایر انواع مبدل های حرارتی مانند صفحه ای پرداخته اند و همچنین طرح های کنترلی مانند شبکه های عصبی و فازی و غیره به منظور کنترل دمای سیال خروجی آن مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار گرفته اند. بنابراین کمتر به موضوع کنترل دمای مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای پرداخته شده است. لازم به ذکر می باشد با توجه به تحقیقات انجام شده در داخل کشور تاکنون

۱- مقدمه

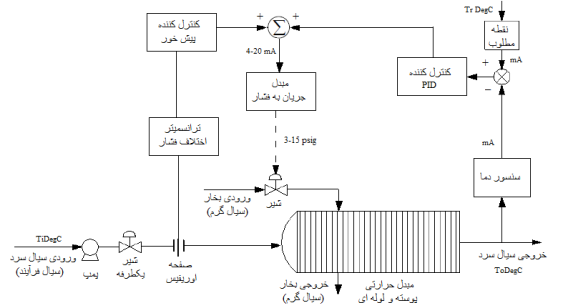
در یک فرآیند شیمیایی مبدل های حرارتی به منظور انتقال حرارت از یک سیال گرم از طریق دیواره جامد به سیال سرد، استفاده می شوند. انواع مختلفی از مبدل های حرارتی در صنعت وجود دارند. نوع خاصی از این مبدل های حرارتی که به مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای مشهور هستند، در انواع مختلفی از پیکربندی ها و اندازه ها ساخته و تولید می شوند که قادر به عملیات در فشار بالا هستند. این مبدل های حرارتی در زمینه های متنوعی مانند تبرید، تولید برق، تهویه مطبوع، فرآیندهای شیمیایی، پزشکی و غیره کاربرد دارند. یک مبدل حرارتی



شکل (۱) : طرح یک سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای [۲].

پیش‌فرض‌های مختلفی برای ایجاد معماری کنترل مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در نظر گرفته شده است. فرض اول بر این است که نرخ جریان ورودی و نرخ جریان خروجی سیال یکسان هستند. فرض دوم بر این است که ظرفیت ذخیره سازی گرمای دیواره‌ها ناچیز است. همچنین دیواره‌های پوسته کاملاً عایق هستند.

شکل (۲) طرح سیستم کنترلی PID به همراه کنترل‌کننده پیش‌خور برای یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۲) : طرح سیستم کنترلی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

در فرآیند شکل (۲)، شیر کنترل مورد استفاده از نوع بازشونده با هوا است. سنسور مورد استفاده در این طرح یک ترموکوپل به همراه یک ترانسمیتر می باشد. ترموکوپل به عنوان عنصر سنجش دما استفاده می‌شود که در مسیر بازخورد معماری کنترل اجرا می‌شود. دمای سیال خروجی توسط ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود و خروجی ترموکوپل به واحد ترانسمیتر ارسال می‌شود، در نهایت خروجی دما به سیگنال استاندارد ۴ الی ۲۰ میلی‌آمپر تبدیل می‌شود. این خروجی واحد ترانسمیتر به واحد کنترل‌کننده PID داده می‌شود. در این طرح یک صفحه اوریفیس وجود دارد که باعث ایجاد اختلاف فشار می‌شود، در واقع فشار را کم می‌کند و سپس می‌توان این اختلاف فشار ایجاد شده را به وسیله یک ترانسمیتر اختلاف فشار به یک سیگنال استاندارد بین ۴ الی ۲۰ میلی‌آمپر تبدیل نمود.

در این سیستم کنترلی، کنترل‌کننده پیش‌خور خطا را تخمین

هیچ‌گونه طرح معتبری به منظور کنترل دمای مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله‌ای با کنترل‌کننده‌های مرسوم انجام داده نشده است و کار پژوهشی انجام شده در این راستا را می‌توان از جهاتی منحصر به فرد به شمار آورد.

این مقاله، با یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای و یک سیستم تک ورودی و تک خروجی با کمک داده‌های تجربی موجود، سروکار دارد. دمای سیال خروجی سیستم مبدل حرارتی بایستی با توجه به نیاز فرآیند، در یک نقطه مطلوب نگه داشته شود. در این تحقیق ابتدا مدل‌سازی سیستم انجام می‌شود. سپس یک کنترل‌کننده PID به همراه کنترل‌کننده پیش‌خور به منظور رسیدن به هدف کنترل، اجرا می‌شود. همچنین تحلیل نتایج حاصل از عملکرد کنترل‌کننده در حوزه زمان انجام می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده از تحلیل پاسخ پله واحد و شاخص‌های عملکرد استفاده شده است. مراحل مدل‌سازی فرآیندها و طراحی کنترل‌کننده در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب که یک نرم‌افزار قدرتمند و قابل انعطاف است، پیاده‌سازی و اجرا می‌شود.

۲- مدل‌سازی ریاضی

یک فرآیند شیمیایی معمولی برای گرم کردن، شامل رآکتورهای شیمیایی و سیستم مبدل حرارتی می‌باشد. مبدل حرارتی سیال سرد را با استفاده از بخار فوق‌گرم ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌پایا شده از دیگ بخار را به دمای دلخواه می‌رساند. مخزن، سیال سرد در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد را با استفاده از یک پمپ و یک شیر یک‌طرفه تامین می‌کند. بخار فوق‌گرم از دیگ بخار آمده و از طریق لوله‌های موجود در مبدل حرارتی جریان می‌یابد، این در حالیست که سیال فرآیند از طریق فضای بین پوسته و لوله‌های سیستم مبدل حرارتی جریان می‌یابد. پس از آن که بخار فوق‌گرم عمل گرم کردن سیال فرآیند را انجام داد، بخار چگالیده در دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد از سیستم مبدل حرارتی خارج می‌شود. مبدل حرارتی، سیال سرد را تا دمای ۵۲ درجه سانتی‌گراد گرم می‌کند. در واقع، هدف کنترل دمای خروجی سیال سرد ورودی به مبدل حرارتی می باشد.

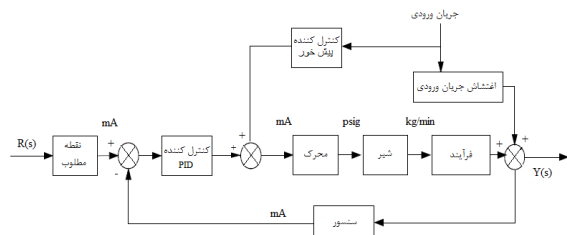
در شکل (۱) طرح یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای نشان داده شده است [۲].

می‌زند و متغیر کنترل کننده را قبل از آنکه اغتشاش بتواند خروجی را تحت تاثیر قرار دهد، تغییر می‌دهد.

کنترل کننده‌ها، الگوریتم کنترل را اجرا می‌کنند و یک سیگنال ترکیبی به منظور کنترل دمای خروجی مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای به محرک می‌فرستند. سپس دستور لازم برای عنصر کنترل نهایی از طریق واحد محرک داده می‌شود. واحد محرک، یک مبدل پنوماتیکی جریان به فشار است و واحد کنترل نهایی شیر پنوماتیکی است. واحد محرک، سیگنال ترکیبی خروجی کنترل کننده‌ها را به یک واحد فشار استاندارد به در محدوده ۳ psig الی ۱۵ تبدیل می‌کند. محرک با توجه به سیگنال‌های ارسالی تصمیم به باز یا بسته کردن شیر می‌کند. در نتیجه جریان بخار وارد سیستم مبدل حرارتی شده و توسط ورودی دیگر دمای نهایی خروجی را ایجاد می‌کند.

در کل، در این فرآیند دو نوع اغتشاش می‌تواند وجود داشته باشد، که یکی تغییرات جریان سیال ورودی و دیگری تغییرات درجه حرارت سیال ورودی است. اما در عمل تغییرات جریان سیال ورودی اغتشاش برجسته‌تری نسبت به تغییرات درجه حرارت سیال ورودی دارد.

در ادامه، سیستم کنترلی PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور شکل (۲) را به صورت بلوک دیاگرام نشان می‌دهیم. شکل (۳) بلوک دیاگرام حلقه بسته شامل فرآیند، کنترل کننده‌ها، محرک، شیر کنترل، سنسور، نقطه مطلوب و اغتشاش فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

کنترل کننده، عمل کنترل را با عنصر کنترل نهایی از طریق محرک اعمال می‌کند. سنسور، خروجی را دریافت می‌کند و به کنترل کننده بازخورد می‌دهد. در واقع دما توسط سنسور اندازه گیری می‌شود و سیگنال خروجی به کنترل کننده فرستاده می‌شود؛ جایی که با مقدار نقطه مطلوب مقایسه می‌گردد. سیگنال خروجی از کنترل کننده به مبدل پنوماتیکی جریان به فشار وارد می‌شود که یک سیگنال پنوماتیکی به منظور تنظیم شیر کنترل ایجاد می‌شود و جریان بخار وارد می‌شود. این جریان وارد مبدل حرارتی شده و به همراه ورودی‌های دیگر دمای نهایی خروجی را ایجاد می‌کند.

داده‌های تجربی موجود برای فرآیند در جدول (۱) آورده شده‌اند

جدول (۱): داده‌های تجربی فرآیند کنترلی مبدل حرارتی [۳]

پاسخ مبدل به بهره جریان بخار	$50 \text{ } ^\circ\text{C} / (\text{kg} / \text{sec})$
ثابت زمانی فرآیند	30 sec
محدوده جریان محرک	$4-20 \text{ mA}$
محدوده فشار محرک	$3-15 \text{ psig}$
ظرفیت شیر کنترل	$1/6 \text{ kg} / \text{sec}$
ثابت زمانی شیر کنترل	3 sec
محدوده دمای سنسور	$50-150 \text{ } ^\circ\text{C}$
ثابت زمانی سنسور	10 sec

توابع تبدیل مربوط به اجزای مختلف سیستم و فرآیند و همچنین بهره‌های مربوط به آنها در جدول (۲) گردآوری شده‌اند.

جدول (۲): توابع تبدیل و بهره‌های اجزای مختلف سیستم

تابع تبدیل فرآیند	$\frac{50e^{-s}}{30s+1}$
تابع تبدیل شیر	$\frac{0.13}{3s+1}$
بهره محرک	0.75
تابع تبدیل اغتشاش	$\frac{1}{30s+1}$
تابع تبدیل سنسور	$\frac{0.16}{10s+1}$

در این طرح کنترلی، کنترل کننده پیش‌خور اغتشاش ایجاد شده توسط جریان سیال ورودی را تنظیم می‌کند. تابع تبدیل کنترل کننده پیش‌خور با $G_{cf}(s)$ نشان داده می‌شود که به صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۴]:

$$G_{cf}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \quad (1)$$

در معادله (۱)، $G_p(s)$ تابع تبدیل فرآیند و $G_d(s)$ تابع تبدیل اغتشاش جریان ورودی است که به ترتیب در معادلات (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند:

$$G_p(s) = \frac{5e^{-s}}{90s^2 + 33s + 1} \quad (2)$$

$$G_d(s) = \frac{1}{30s + 1} \quad (3)$$

با جایگذاری تابع تبدیل اغتشاش جریان و تابع تبدیل فرآیند در معادله (۱)، تابع تبدیل کنترل کننده پیش‌خور به صورت معادله (۴) بیان می‌شود:

$$G_{cf}(s) = \frac{-18s^2 - 6.6s - 0.2}{27s^2 + 30.9s + 1} \quad (4)$$

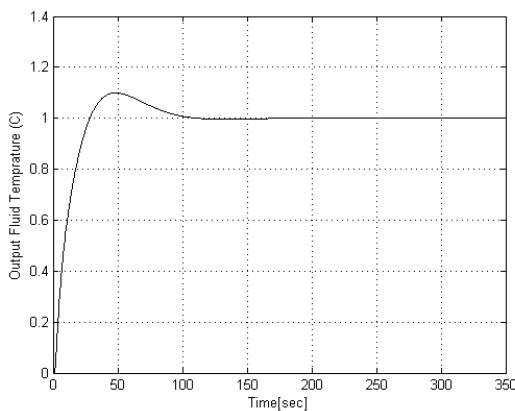
با استفاده از داده‌های تجربی موجود، توابع تبدیل و بهره‌های

جدول (۴) : تنظیم پارامترهای PID

روش تنظیم	τ_d	τ_i	K_c
زیگلر نیکولز	۳/۵۹	۱۴/۳۹۵	۱۴/۲۸

منظور از طراحی سیستم‌های کنترل در حوزه زمان، استفاده از خواص و مشخصه‌های حوزه زمانی سیستمی است که قرار است طراحی شود. این مشخصات اغلب به صورت مقادیری استاندارد در زمان صعود، زمان نشست، حداکثر فراجهش، زمان اوج و خطای حالت ماندگار با استفاده از پاسخ پله واحد بیان می‌شوند. در این کنترل کننده طراحی شده دو پارامتر زمان نشست و حداکثر فراجهش با استفاده از تحلیل پاسخ پله واحد سیستم ارزیابی شده‌اند.

پاسخ پله واحد کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۶) نشان داده شده است:



شکل (۶) : پاسخ پله واحد کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

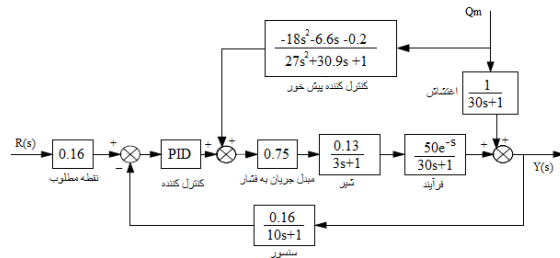
حداکثر فراجهش مقدار تفاوت بین اوج پاسخ زمانی و خروجی پایدار را نشان می‌دهد. آن را به صورت رابطه (۵) می‌توان تعریف نمود [۶]:

$$\%M_p = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} * 100\% \quad (5)$$

زمان نشست (t_s)، زمان مورد نیاز برای اینکه پاسخ سیستم به محدوده مقدار نهایی (حدود ۲٪ الی ۵٪ مقدار نهایی) رسیده و باقی بماند [۶]. در این مقاله به صورت تصادفی ۵٪ مقدار نهایی گرفته شده است.

با تحلیل پاسخ پله واحد این سیستم کنترلی، زمان نشست ۹۰/۲۳ ثانیه و مقدار حداکثر فراجهش ۹/۱ درصد بدست می‌آید.

موجود در سیستم کنترل مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۴) نشان داده شده‌اند:



شکل (۴) : توابع تبدیل و بهره‌های موجود در سیستم کنترل مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

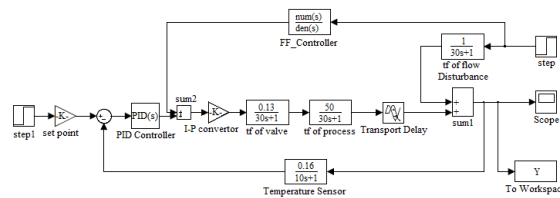
به منظور تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID از روش تنظیم حلقه بسته زیگلر نیکولز که جز روش‌های تنظیم خودکار محسوب می‌شود، استفاده نموده‌ایم. در این روش تنظیم، K_u بهره نهایی است. مقدار بالای افزایش این بهره، سیستم را به آستانه ناپایداری می‌برد. در این روش، سیستم نوسان می‌کند و از نوسانات حاصل، میزان فرکانس (ω) و پریود نوسان (P_u) محاسبه می‌شود. جدول (۳) قوانین تنظیم را بر اساس روش نوسان حلقه بسته زیگلر نیکولز نشان می‌دهد [۵].

جدول (۳) : قوانین تنظیم پارامترهای PID

روش تنظیم	τ_d	τ_i	K_c
زیگلر نیکولز	P_u	$0.5 P_u$	$0.6 K_u$

۳- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

با استفاده از داده‌های تجربی موجود، طرح سیمولینک کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۵) نشان داده شده است:



شکل (۵) : طرح سیمولینک کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

برای کنترل کننده PID مقادیر پارامترهای K_c ، τ_i ، τ_d با استفاده از روش تنظیم حلقه بسته زیگلر نیکولز بدست آمده‌اند که در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

مراجع

- [1] Ramesh, K., Dusan, R., *Fundamentals of heat exchanger design*, John Wiley and Sons, New York, 2003.
- [2] Kaddour, N., *Process modeling and control in chemical engineering*, Marcel Dekker Inc, New York , 1989.
- [3] Gopal, M., *Control systems principles and design*, Tata McGraw-Hill Education, New York , 2008.
- [4] Shue L., Feng, L., "Feedforward Compensation Based the Study of PID Controller", *Advances in Intelligent and Soft Computing*, Vol. 149, pp. 59-64, 2012.
- [5] Kiam, A., Gregory C., Yun, L., "PID control system analysis, design and technology", *Control System Technology*, Vol. 13, pp. 559-576, 2005.
- [6] Kenneth M., Wim, V., *Management Control Systems: Performance Measurement, Evaluation and Incentives*, Prentice Hall, New York , 2007.

به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده، از شاخص‌های عملکرد استفاده شده است. شاخص‌های عملکرد برای ارزیابی این سیستم کنترلی، انتگرال قدر مطلق خطا (IAE)، انتگرال مجذور خطا (ISE)، انتگرال قدر مطلق خطا در زمان (ITAE) و انتگرال مجذور خطا در زمان (ITSE) هستند. شاخص‌های عملکرد یک مقدار کمی از عملکرد سیستم هستند. یک سیستم، زمانی به عنوان یک سیستم کنترلی بهینه در نظر گرفته می‌شود که شاخص‌های عملکرد را به حداقل مقدار ممکن برساند. شاخص‌های عملکرد بیان شده را می‌توان با روابط زیر بدست آورد [۶]:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (6)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (7)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (8)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (9)$$

شاخص‌های عملکرد کنترل کننده PID به همراه کنترل کننده پیش‌خور برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

جدول (۵) : شاخص‌های عملکرد کنترل کننده PID به همراه کنترل-

کننده پیش‌خور

کنترل کننده	IAE	ISE	ITAE	ITSE
PID به همراه پیش‌خور	۳/۵۲۸	۰/۳۳۱	۸۰/۶۶	۳/۴۷۴

۴- نتیجه

مقدار حداکثر فراجهدش در این سیستم کنترلی ۹/۱ درصد بوده و همچنین زمان نشست ۹۰/۲۳ ثانیه است که در فرآیندهای شیمیایی زمان نشستی در حدود چند دقیقه مقدار ایده‌آلی است. همچنین مقادیر شاخص‌های عملکرد نیز برای این سیستم در محدوده کاملاً رضایت‌بخشی هستند. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان دمای سیال خروجی مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای را در کوتاه‌ترین زمان ممکن بدون در نظر گرفتن غیرخطی بودن فرآیند، کنترل نمود. همچنین با کنترل دمای سیال خروجی مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای، می‌توان صرفه‌جویی چشمگیری در حوزه مصرف انرژی انجام داد. برای پژوهش‌های آتی در این زمینه می‌توان از سایر سیستم‌های کنترلی مانند کنترل کننده فازی، مدل داخلی و شبکه‌های عصبی استفاده نمود.