

طراحی، ساخت و ارزیابی تجربی یک کنترل‌کننده ارزان قیمت و قابل برنامه‌ریزی دبی جریان سیال

محمد رضا کمالی^۱، وحید فخاری^۲، آرمان محسنی^۳

^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، mr.kamali74@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، v_fakhari@sbu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ar_mohseni@sbu.ac.ir (نویسنده مسئول)

چکیده

کنترل‌کننده‌های جریان سیال در صنایع بسیار پرکاربرداند. امروزه بسیاری از صنایع تولیدی از جمله صنایع پتروشیمی، غذایی، کشاورزی و غیره به طور مستقیم از کنترل‌کننده‌های دبی در فرآیندهای مختلف بهره‌می‌برند. در این مقاله به طراحی و بررسی تجربی یک نمونه کنترل‌کننده دبی جریان سیال و به طور خاص برای سیال آب پرداخته می‌شود. این کنترل‌کننده از یک شیر معمولی بهره می‌برد و باقی قطعات آن نیز در دسترس و قابل تعویض و ارتقا هستند. الگوریتم کنترلی دستگاه تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر (پی‌ای‌دی) است و جهت بهبود پاسخ آن یک کنترل‌کننده پی‌ای‌دی با ضرایب متغیر طراحی شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری و کنترل اختلاف فشار بالادست و پایین دست را داراست و کنترل دبی آب را با دقت ۱۰ درصد دبی مرجع انجام می‌دهد. از مزیت‌های این دستگاه نسبت به دستگاه‌های موجود هزینه تمام شده بسیار پایین آن است. با توجه به دقت و سرعت کنترل، دستگاه ساخته شده می‌تواند در صنایع کشاورزی، و صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

کنترل‌کننده دبی، ناظم تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر (پی‌ای‌دی)، اندازه‌گیری تجربی، پاسخ پله، اثر نویز

مقدمه

اندازه‌گیری و کنترل دبی سیال در صنایع مختلف همچون صنایع غذایی، پتروشیمی، کشاورزی، نیروگاهی و غیره امری بسیار مهم است. اندازه‌گیری میزان سیال تحویلی به نقاط مصرف مانند نقاط تحویل گاز طبیعی به مصرف‌کننده‌های شهری و صنعتی و پایانه‌های تحویل محصولات نفتی به نفتکش‌ها جهت صادرات، اندازه‌گیری و کنترل میزان سیال عبوری در بخش‌های مختلف فرآیندهای پتروشیمی، مواد غذایی و تولید دارو نمونه‌هایی از کاربردها و گستره استفاده از اندازه‌گیرها و کنترل‌کننده‌های دبی سیال هستند. صنایع پتروشیمی شامل واحدهای فرآیندی مختلفی هستند که بوسیله خطوط لوله به

یکدیگر متصل شده‌اند. برای اینکه این واحدها در شرایط مناسب عملیاتی کار کنند، باید متغیرهای فرآیندی از قبیل دما، فشار، ارتفاع سطح مایع و دبی سیال در محدوده‌های طراحی نگه داشته شوند یا به عبارت دیگر کنترل شوند. در یک راکتور شیمیایی، مواد اولیه باید با یک نسبت مشخص وارد شده و در دما و فشار معینی با هم واکنش دهند. تغییر نسبت و مقدار مواد اولیه و یا دما و فشار راکتور می‌تواند منجر به تولید محصولات ناخواسته و یا بازدهی کم راکتور شود.

در سال ۱۳۸۵ ه.ش. موجائز و دشموخ [۱] در زمینه افت فشار جریان مغشوش در اتصالات پرکاربرد شامل زانویی و سه راهی متعامد فعالیت‌هایی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (سی‌اف‌دی) رفتار جریان (گرادیان فشار و گرادیان سرعت) را در مقاطع این اتصالات بررسی کرده و با نتایج تجربی موجود مقایسه کردند. نتایج آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی داشت و در برخی موارد حداکثر ۱۸ درصد اختلاف را ثبت کردند. در سال ۱۳۸۷ ه.ش. موجائز و جاگان [۲] در زمینه افت فشار یک شیر توپی تحقیق کرده و با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان سیال در موقعیت‌های مختلف شیر افت فشار آن را بدست آوردند. در سال ۱۳۹۶ ه.ش. لین و همکاران [۳] در زمینه اثرات شیر توپی در جریان بالا دست و پایین دست تحقیق کردند. برای بررسی این گرادیان فشار را در محل شیر با استفاده از شبیه‌سازی بدست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رفتار گذرای میدان جریان بر اثر تغییر موقعیت شیر در هنگام باز شدن با زمانی که شیر بسته می‌شود متفاوت است. در سال ۱۳۸۳ ه.ش. چرن و همکارش ونگ [۴] در زمینه کنترل دبی حجمی عبوری از یک شیر توپی با درگاه وی شکل^۱ کار کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که درگاه‌های با زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه، دبی عبوری را متناسب با موقعیت شیر می‌کنند. چرن همچنین با همکارانش در سال ۱۳۸۶ ه.ش. [۵] نیز در زمینه رفتار جریان در شیرهای توپی و کارایی آن‌ها مقاله‌ای ارائه داد که در آن روش مفید برای بررسی کارایی و بازدهی شیرهای توپی و همچنین عوامل آغازگر کاویتاسیون ارائه شده است. در سال ۱۳۹۸ ه.ش. دادخواه [۶] جریان

^۱ (V-port)

دوفاز درون شیر تویی را بصورت عددی مدل کرده و تاثیرات کسر حجمی گاز بر رفتار جریان را نشان داد. او با در نظر گرفتن حفره‌زایی، نتایج را بصورت نمودارهای سرعت و فشار ارائه کرده و محل‌های ایجاد گردابه و شروع حفره‌زایی را مشخص کرد. او به این نتیجه رسید که در حالت نیمه باز شیر، احتمال حفره‌زایی بسیار زیاد است.

در سال ۱۳۹۴ ه.ش. صبوحی و تیم ایشان [۷] برای پیش‌بینی کارایی و بازده جریان‌سنج‌های توربینی ماریچی، رفتار آن را به روش سی‌افدی مدل کردند. آن‌ها تاثیر اصطکاک در یاتاقان حسگر را نیز در نظر گرفتند و در نهایت مدلی بسیار نزدیک به واقعیت ارائه دادند که منجر به کاهش هزینه‌های طراحی و تحلیل حسگر شد. یوان و همکاران در سال ۱۳۹۶ ه.ش. [۸] با انجام آزمایشات متفاوت و انجام محاسبات تحلیلی و عددی روابطی برای تعیین خواص دینامیکی جریان‌سنج توربینی استخراج کرده‌اند. آن‌ها زمان سکون جریان‌سنج توربینی را کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه بدست آوردند. پاسخ دینامیکی جریان‌سنج‌های توربینی کوچک توسط لیبی [۹] مورد بررسی قرار گرفت. وی در نتیجه تحقیقات خود شرایطی را پیشنهاد کرد که خطای حسگر را به کمترین مقدار خود برساند. در سال ۱۳۸۲ ه.ش. گارنیر و همکارانش [۱۰] بر روی عملکرد و کارایی جعبه ابزار شناسایی سیستم نرم‌افزار متلب کار کردند و اثرات شدت نویز را روی آن بررسی کردند. در سال ۱۳۱۹ ه.ش. زیگلر و همکارش [۱۱] به منظور طراحی کنترل‌کننده پی‌آی‌دی برای یک سیستم، روش‌هایی بر پایه آزمایش‌های عددی ارائه دادند که ضرایب پایه کنترل‌کننده را مشخص می‌کردند.

در سال ۱۳۹۶ پریانکا و همکارانش [۱۲] یک کنترل‌کننده فازی-پی-آی-دی را جهت کنترل دبی نفت در خطوط انتقال طراحی کردند. آن‌ها با کنترل سیگنال‌های فشار در سراسر خط لوله، دبی را کنترل کردند. آن‌ها نشان دادند که کنترل فازی-پی‌آی‌دی نسبت به کنترل پی‌آی‌دی تاخیر بسیار کمتری دارد. در سال ۱۳۹۸ اسماعیلی [۱۳] جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی، یک کنترل‌کننده طراحی و پیاده‌سازی کرد. وی بر اساس برنامه بهینه آبیاری گیاه، سه کنترل‌کننده پی-پی-آی و پی-آی-دی را با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کرد. در نهایت با پیاده‌سازی ضرایب زیگلرنیکولز، کنترل‌کننده پی-آی را پیشنهاد کرد. در سال ۱۳۹۹ احمد و همکارش [۱۴] به منظور کنترل دبی، یک کنترل‌کننده شبکه عصبی را طراحی کردند. به این دلیل که نمی‌توان از زبان‌های برنامه‌نویسی پیشرفته در پی-ال-سی استفاده کرد، آن‌ها با متصل کردن کامپیوتر به پی-ال-سی، کنترل‌کننده خود را پیاده‌سازی کردند. آن‌ها کنترل‌کننده خود را با یک کنترل‌کننده پی-آی-دی معمولی مقایسه کردند، که نتایج مقایسه نشان داد کنترل‌کننده شبکه عصبی از دو منظر حداکثر فراجهد و خطای ماندگار رفتار بهتری دارد.

در این مقاله طراحی و ساخت یک کنترل‌کننده ارزان‌قیمت و قابل برنامه‌ریزی برای کنترل جریان سیال در مقیاس کوچک ارائه شده است و مقاومت آن نسبت به اغتشاش عملگر و تغییرات دینامیک سیستم به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از

نوآوری‌های اصلی این طرح در مقایسه با سایر طرح‌های موجود، استفاده از شیرهای متداول به جای شیر کنترل به منظور کاهش هزینه است. در نمونه‌های صنعتی از شیرهای تناسبی به عنوان عملگر استفاده می‌شود که دقت بالایی داشته و در جریان اغتشاش کمی ایجاد می‌کنند، اما دارای قیمت بالایی هستند. در کنترل‌کننده ارائه شده در این پژوهش، از شیر تویی استفاده شده است که به علت داشتن قیمت پایین، استفاده از آن به صرفه است و می‌توان در برخی کاربردها از آن‌ها استفاده کرد. به دلیل وجود فشارسنج اختلافی در دو سمت شیر، کنترل‌کننده ارائه شده توانایی کنترل فشار را نیز دارد.

نوآوری دیگر این پژوهش، قابل برنامه‌ریزی بودن کنترل‌کننده دبی جریان سیال با استفاده از تجهیزات و نرم‌افزارهای در دسترس است. کنترل‌کننده‌های دبی صنعتی عموماً از پردازنده‌های اختصاصی و گران قیمت استفاده می‌کنند و اغلب قابل برنامه‌ریزی نیستند. اما در این پژوهش از مدار کنترلی آردوینو استفاده شده است که قیمت بسیار کمتری نسبت به کنترل‌کننده‌های دبی صنعتی دارد و به راحتی قابل برنامه‌ریزی است. بنابراین می‌توان این دستگاه را با توجه به نیاز مورد نظر، برنامه‌ریزی کرده و بکار گرفت. بطور نمونه، می‌توان با تغییر برنامه دستگاه، کنترل‌کننده دبی را به کنترل‌کننده فشار تبدیل کرد و یا این که هر دو خروجی فشار و دبی را با هم کنترل کرد.

در ادامه ابتدا به طراحی سخت‌افزاری کنترل‌کننده و معیارهای آن و بستر آزمون پرداخته می‌شود. سپس جهت طراحی کنترل‌کننده مناسب، دستگاه ساخته شده به عنوان یک سیستم، شناسایی شده و الگوریتم کنترلی آن طراحی می‌شود. در ادامه مدل کنترلی روی سخت‌افزار پیاده‌سازی شده و عمل کرد آن به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

طراحی، ساخت و آزمون دستگاه

پیش از ساخت نمونه محصول، ابتدا باید براساس عملکرد مورد نظر و مطلوب آن، قابلیت ساخت و هزینه تمام شده، محصول طراحی شده و عملکرد آن تخمین زده شود. کنترل‌کننده‌های صنعتی دبی، قطعاتی با فناوری پیشرفته بوده و از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند. ویژگی‌های اصلی کنترل‌کننده جریان شامل دقت قابل قبول، بازه کاری مناسب، سرعت پاسخ گویی مناسب، پایداری کنترل و در نهایت قیمت قابل قبول می‌باشد. کیفیت تمامی ویژگی‌های عنوان شده، بر اساس نوع کاربرد کنترل‌کننده تعیین می‌شود. قطعات اصلی تشکیل دهنده کنترل‌کننده شامل شیر کنترلی جهت تنظیم دبی، سنسور جریان جهت اندازه‌گیری دبی، برد الکترونیکی جهت پردازش داده و عملگر جهت تحریک شیر می‌باشند. تمامی قطعات باید متناسب با یکدیگر انتخاب شوند تا هم عملکرد مورد نظر تامین شود و هم در هزینه‌ها صرفه‌جویی شود. در این پروژه، با توجه به محدودیت‌های موجود، قیمت نهایی کنترل‌کننده به عنوان معیار اصلی طراحی تعیین شده و باقی ویژگی‌ها به نحوی طرح‌ریزی می‌شوند که دستگاه بتواند در صنایع متوسط مانند کشاورزی و کارهای آزمایشگاهی به کار گرفته شود.

هدف از شناسایی سیستم، تعیین تابع تبدیل آن به منظور مشخص کردن ضرایب کنترل کننده پی‌آی‌دی مناسب برای آن می‌باشد. روش‌های شناسایی سیستم به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند:

- مدل‌سازی جعبه سفید (تحلیلی)
- مدل‌سازی جعبه سیاه (آزمایشی)
- مدل‌سازی جعبه خاکستری (ترکیبی)

هنگام در دست نبودن پارامترهای سیستم و پیچیدگی به نسبت زیاد آن برای شناسایی سیستم، از مدل‌سازی جعبه سیاه استفاده می‌شود [۱۸].

در این پژوهش به دلیل خصوصیات دستگاه و بخصوص حسگر جریان‌سنج به کار رفته، جهت شناسایی سیستم از روش جعبه خاکستری بر پایه حداقل مربعات استفاده شده است. رابطه (۱) تقریب خطی بین ورودی و خروجی را نمایش می‌دهد. رابطه (۲) که با حداقل کردن مقدار مجموع مربعات خطا بدست آمده است، مقادیر پارامترها را محاسبه می‌کند. رابطه (۳) نیز نحوه محاسبه مجموع مربعات خطا را نمایش می‌دهد [۱۸].

$$y = U\theta + e \quad (1)$$

$$\theta_{LS} = (U^T U)^{-1} \cdot U^T y \quad (2)$$

$$S = e^T \cdot e \quad (3)$$

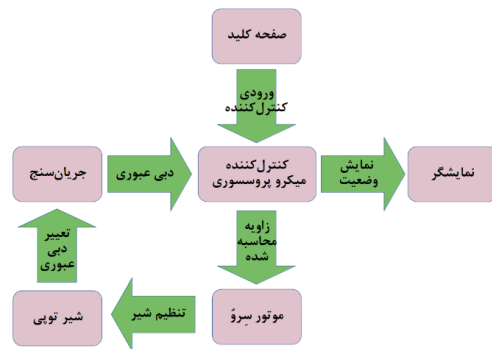
در روابط بالا، e معرف ماتریس خطا، S مجموع مربعات خطا، U ماتریس متشکل از بردارهای ورودی و خروجی سیستم، y ماتریس بردار خروجی و θ بردار پارامترهای مجهول تابع تبدیل می‌باشند. پیش از تخمین تابع تبدیل سیستم، مرتبه آن مشخص می‌شود. برای تخمین اولیه مرتبه سیستم، برای هر عضو ذخیره‌کننده انرژی یک مرتبه در نظر گرفته می‌شود. بر همین اساس به دلیل وجود پمپ دو مرتبه، موتور سرو دو مرتبه، شیر توپی یک مرتبه و برای سیال عبوری یک مرتبه در نظر گرفته شد. در نتیجه سیستم بصورت پایه مرتبه شش در نظر گرفته شد. جهت استفاده از این روش، در بستر آزمایشگاهی یک ورودی با دامنه تصادفی ایجاد و به سیستم اعمال شد.

با شناسایی سیستم از روش حداقل مربعات غیرخطی (با الگوریتم بازتاب منطقه قابل اعتماد [۱۹])، مرتبه بهینه سیستم برابر با هفت بدست می‌آید. تابع تبدیل شناسایی شده از همین روش نیز در رابطه (۴) آورده شده است.

مقدار میانگین حداقل مربعات خطا برابر با $3/05$ لیتر بر دقیقه می‌باشد که با توجه به این که سیستم غیرخطی با سیستمی خطی تقریب زده شده است، قابل قبول است.

$$G(s) = \frac{-0.1s^6 + 18s^5 + 445s^4 + 454s^3 + 1548s^2 + 1379s + 312}{s^7 + 23s^6 + 326s^5 + 1318s^4 + 1861s^3 + 4270s^2 + 2622s + 480} \quad (4)$$

پس از بررسی انواع شیرها [۱۵-۱۷]، جریان‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها، از شیر توپی به عنوان عملگر، از جریان‌سنج توربینی و حسگر فشار اختلافی استفاده شد. به منظور پردازش داده‌ها، پیاده‌سازی کنترل کننده و خواندن حسگرها از یک مدار کنترل کننده میکروپروسسوری استفاده گردید. شکل ۱ روندنمای عملکرد دستگاه را نشان می‌دهد. شکل ۲ نیز کنترل کننده ساخته شده را نمایش می‌دهد.

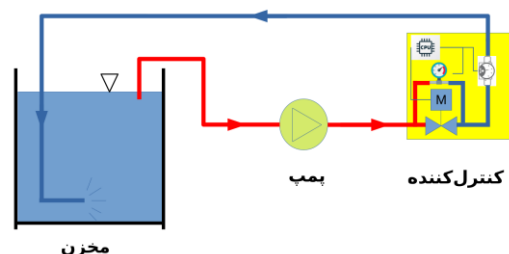


شکل ۱: روندنمای عملکرد سیستم طراحی شده

برای انجام آزمایش و داده‌برداری نیاز به تجهیزات جداگانه در آزمایشگاه می‌باشد تا بتوان مدار آزمایشگاهی دستگاه را تکمیل کرد. بدین منظور از یک مخزن ۳۰ لیتری، یک پمپ با قدرت ۷۴۶ وات و فشار حداکثر ۶ بار، یک فیلتر تصفیه آب و اتصالات مورد نیاز برای بستن مدار استفاده شده است. شکل ۳ شماتیک مدار آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد.

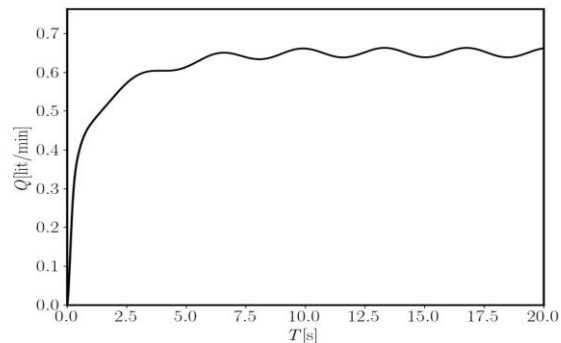


شکل ۲: کنترل کننده دبی حجمی ساخته شده



شکل ۳: شماتیک مدار آزمایشگاهی

با توجه به پاسخ پله سیستم (شکل ۴)، سیستم در زمان بسیار کوتاهی به ورودی پله واکنش می‌دهد و با گذشت زمان با آرامش بیشتری به سمت مقدار نهایی میل می‌کند. این رفتار دقیقاً با رفتار شیر تویی هنگام باز شدن متناسب است.



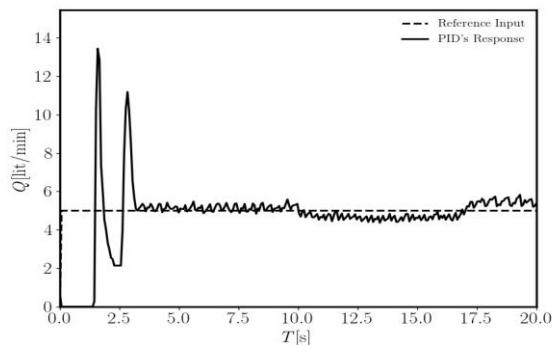
شکل ۴: پاسخ پله سیستم گسسته تخمین زده شده

پیاده‌سازی تجربی کنترل‌کننده و بررسی نتایج حاصل

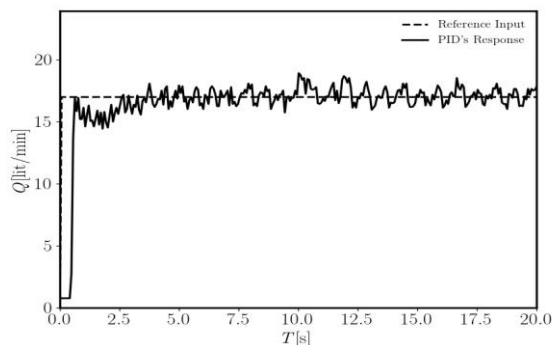
با پیاده‌سازی و تنظیم ضرایب بدست آمده در بخش قبل بر اساس رفتار سیستم، ضرایب مناسب تعیین می‌شوند (جدول ۴). همان‌طور که از پاسخ‌های سیستم (شکل‌های ۵ و ۶) مشخص است، پاسخ این سیستم به پله‌های مختلف متفاوت بوده و بنابراین رفتار خطی ندارد. بررسی ورودی‌های کمتر از ۳ لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد که نوسانات بسیار شدید بوده و خروجی نتوانسته است به یک مقدار پایدار همگرا شود. بنابراین محدودیت این کنترل‌کننده در ورودی‌های کمتر از ۳ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

جدول ۴: ضرایب پیاده‌سازی شده روی کنترل‌کننده پی‌آی‌دی

نوع کنترل‌کننده	K_p	K_i	K_d
پی‌آی‌دی	۲	۶	۰/۱۱۳



شکل ۵: پاسخ پله سیستم آزمایشگاهی کنترل شده به ورودی مرجع ۵.



شکل ۶: پاسخ پله سیستم آزمایشگاهی کنترل شده به ورودی مرجع ۱۷

جهت بهبود پاسخ سیستم، یک کنترل‌کننده پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر به آن اعمال می‌شود. بدین صورت که با توجه به بازه تغییرات ورودی کنترل‌کننده، ضرایب آن تغییر می‌کنند. در ادامه جدول ۵ بازه تغییرات ضرایب را گزارش می‌کند. شکل ۷ بصورت کلی بهبود رفتار سیستم را نشان می‌دهد اما جدول ۶ مقایسه جامعی بین پاسخ‌های کنترل‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. در ابتدای بازه تغییرات (تا دبی ۶ لیتر بر دقیقه) زمان نشست در کنترل‌کننده با ضرایب متغیر نسبت به کنترل‌کننده معمولی افزایش داشته است اما مقدار فراجاهش بطور قابل توجهی کاهش داشته است. به جز در موارد معدود، از ورودی ۶

۱۴۰۱ تا ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱

طراحی کنترل‌کننده

برای دستگاه یک کنترل‌کننده پی‌آی‌دی در نظر گرفته شد. برای مشخص کردن ضرایب پی‌آی‌دی، از روش زیگلر-نیکولز حلقه بسته [۱۵] و ابزار پی‌آی‌دی تیونر متلب استفاده و کنترل‌کننده اولیه طراحی شد. رابطه (۵) تابع تبدیل کنترل‌کننده پی‌آی‌دی را نشان می‌دهد.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (5)$$

در این رابطه K_p ضریب تناسبی، K_i ضریب انتگرالگیر، K_d ضریب مشتقگیر و G_c تابع تبدیل کنترل‌کننده می‌باشد. ضرایب بدست آمده از روش زیگلر-نیکولز حلقه بسته و ابزار پی‌آی‌دی تیونر متلب به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند. هر دو کنترل‌کننده به سیستم شناسایی شده اعمال شده و کیفیت پاسخ آن‌ها، شامل زمان اوج، زمان سکون و فراجاهش، بررسی گردید (جدول ۳). با توجه به این که زمان سکون و میزان فراجاهش در کنترل‌کننده پیشنهادی تیونر متلب کمتر است، در نهایت ضرایب پیشنهادی تیونر به عنوان کنترل‌کننده پایه انتخاب شد.

جدول ۱: ضرایب پیشنهادی روش زیگلر-نیکولز حلقه بسته

نوع کنترل‌کننده	K_p	K_i	K_d
پی‌آی‌دی	۲۰/۹۲	۱۳۴۸	۰/۰۷۸

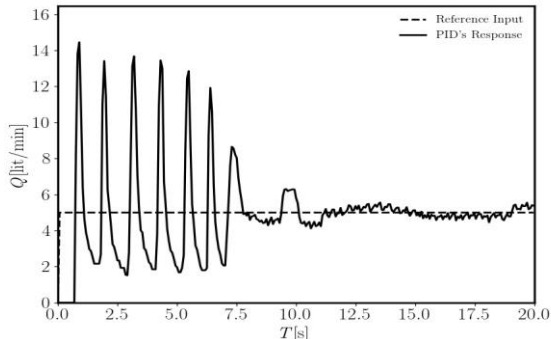
جدول ۲: ضرایب پیشنهادی پی‌آی‌دی تیونر متلب

نوع کنترل‌کننده	K_p	K_i	K_d
پی‌آی‌دی	۱/۳۲	۳/۵۱	۰/۱۲۴

جدول ۳: مقایسه کنترل‌کننده پی‌آی‌دی تیونر متلب و زیگلر-نیکولز حلقه بسته.

روش طراحی کنترل‌کننده	T_p (s)	M_p [%]	T_s (p)
پی‌آی‌دی تیونر متلب	۰/۹۱	۶/۰	۱/۰۷
زیگلر-نیکولز	۰/۶۱	۱۴/۲	۰/۹۶

۱۵ در شکل ۸ و جدول ۷، می‌توان گفت که کنترل‌کننده در مقابل اغتشاش با دامنه ۲۰ درصد عملکرد خوبی داشته و توانسته به خوبی به مقادیر مرجع همگرا شود، اما با افزایش دامنه اغتشاش ورودی به ۳۵ درصد، در ورودی مرجع ۵، نوسانات شدید بوده و کنترل‌کننده نتوانسته است به ورودی مرجع همگرا شود.



شکل ۸: پاسخ سیستم آزمایشگاهی کنترل شده به ورودی اغتشاشی با حداکثر دامنه ۲۰ درصد به ورودی پله ۵

پاسخ‌های سیستم نشان می‌دهند که هرچه مقدار ورودی مرجع افزایش می‌یابد، مقاومت کنترل‌کننده نسبت به اغتشاش نیز افزایش می‌یابد. در جدول ۷ مقایسه‌ای بین مقاومت کنترل‌کننده پی‌آی‌دی و پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر انجام شده است. با توجه به نتایج، بصورت تقریبی می‌توان بیان کرد که مقاومت کنترل‌کننده با ضرایب متغیر در برابر اغتشاش کمی کمتر است.

جدول ۷: بررسی و مقایسه مقاومت کنترل‌کننده‌های پی‌آی‌دی و پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر در برابر اغتشاش

مقدار ورودی مرجع [lit/min]	حداکثر دامنه اغتشاش [%]	کنترل‌کننده پی‌آی‌دی		کنترل‌کننده پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر	
		زمان نشست [s]	حداکثر دامنه خطا [%]	زمان نشست [s]	حداکثر دامنه خطا [%]
۵	۲۰	۱۱/۱۰	۱۱/۲	۱۱/۲	۱۱/۲
۱۵	۲۰	۲/۹۱	۹/۷	۲/۱۷	۱۰/۷
۵	۳۵	-	۲۱۸	-	۱۸۲/۸
۱۵	۳۵	-	۱۶/۷	-	۶۶/۴

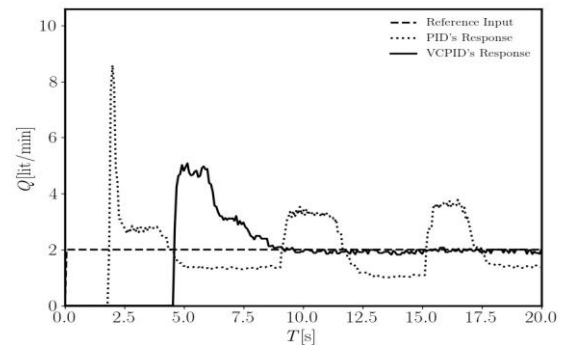
نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی، تحلیل و ساخت یک نمونه کنترل‌کننده دبی جریان سیال ارائه شده است. این دستگاه امکان کنترل دبی آب را با دقت ۱۰ درصد دبی ورودی داراست. از مزیت‌های این دستگاه نسبت به دستگاه‌های موجود هزینه تمام شده بسیار پایین آن و اندازه‌گیری و کنترل اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست می‌باشد. کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده روی دستگاه نسبت به تغییر پارامترهای سیستم پایدار است و توانایی کنترلی خود را نیز حفظ می‌کند. در بررسی مقاومت کنترل‌کننده در برابر اغتشاش نیز مشخص شد که با اعمال تا ۲۰ درصد اغتشاش، علاوه بر پایدار ماندن سیستم، توانایی کنترل دبی ۲۰ تا ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱

به بعد زمان نشست و فراجهش کاهش یافته‌اند. در کل نوسانات سیستم کمتر و همگرایی به پاسخ نهایی سریع‌تر شده است. با توجه به این که رفتار سیستم در دبی‌های بیشتر کندتر است، مقدار ضریب انتگرال‌گیر افزایش یافته است. مقدار ضریب مشتق‌گیر تاثیر چندانی بر عملکرد نداشته است و ضریب تناسبی نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است.

جدول ۵: ضرایب پیاده‌سازی شده روی کنترل‌کننده پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر

محدوده دبی مطلوب [lit/min]	K_p	K_i	K_d
۴-۰	۲/۴	۲	۰/۰۳
۷-۴	۲/۵	۲/۴	۰/۰۳
۸-۷	۱/۴	۴	۰/۰۲۵
۱۵-۸	۱/۶	۴	۰/۰۲
>۱۵	۳	۹/۵	۰/۰۲



شکل ۷: مقایسه بین پاسخ‌های سیستم آزمایشگاهی به کنترل‌کننده پی‌آی‌دی و کنترل‌کننده پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر در ورودی مرجع ۲.

جدول ۶: مقایسه کنترل‌کننده پی‌آی‌دی و پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر

مقدار ورودی مرجع [lit/min]	کنترل‌کننده پی‌آی‌دی		کنترل‌کننده پی‌آی‌دی با ضرایب متغیر	
	فراجهش [%]	زمان نشست [s]	فراجهش [%]	زمان نشست [s]
۲	۳۲۹	-	۱۵۴	۸/۷۵
۳	۲۸۸	۵/۰	۷۹	۷/۹۷
۵	۱۶۹	۳/۱۵	۳۰	۵/۰۲
۶	۱۴۰	۴/۹۲	۱۲	۵/۵
۱۰	۶۰	۲/۷۶	۸۴	۲/۹۰
۱۴	۱۵	۳/۵۸	۱۰	۱/۴۴

بررسی مقاومت کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده نسبت به

اغتشاش عملگر

جهت ایجاد اغتشاش، به صورت مصنوعی یک عدد تصادفی در دامنه مشخص، در مقدار ورودی زاویه شیر ضرب شده و با آن جمع می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از پاسخ کنترل‌کننده به ورودی‌های مرجع ۵ و

- [3] B. Cui, Z. Lin, Z. Zhu, H. Wang, G. Ma, Influence of opening and closing process of ball valve on external performance and internal flow characteristics, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 80 (2017) 193–202.
- [4] M.J. Chern, C.C. Wang, Control of volumetric flow-rate of ball valve using V-port, *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, 126(3) (2004) 471–481.
- [5] M.J. Chern, C.C. Wang, C.H. Ma, Performance test and flow visualization of ball valve, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31(6) (2007) 505–512.
- [6] م.د. تهرانی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان دوفازی درون شیر توپی دو تکه و تاثیر تغییرات کسر حجمی گاز بر رفتار جریان، *in: کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا*, ۱۳۹۸، pp. 1-13.
- [7] Z. Saboohi, S. Sorkhkhah, H. Shakeri, Developing a model for prediction of helical turbine flowmeter performance using CFD, *Flow Meas. Instrum.*, 42 (2015) 47–57.
- [8] Y. Yuan, T. Zhang, Research on the dynamic characteristics of a turbine flow meter, *Flow Meas. Instrum.*, 55 (2017) 59–66.
- [9] B. Lee, R. Cheeswright, C. Clark, The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows, *Flow Meas. Instrum.*, 15(5-6) (2004) 239–248.
- [10] H. Garnier, M. Mensler, A. Richard, Continuous-time model identification from sampled data: Implementation issues and performance evaluation, *Int. J. Control*, 76(13) (2003) 1337–1357.
- [11] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, 64 (1940) 759–768.
- [12] E.B. Priyanka, C. Maheswari, S. Thangavel, Online Monitoring and Control of Flow rate in Oil Pipelines Transportation System by using PLC based Fuzzy-PID Controller, *Flow Meas. Instrum.*, 62 (2018) 144-151.
- [13] ص. اسماعیلی، طراحی و ساخت سیستم اتوماسیون برای آبیاری بهینه کشاورزی با استفاده از کنترل‌کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۸.
- [14] B. Ahmad, P. Prajitno, Design of neural network and PLC-based water flow controller, *in: 4th International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology*, 2020, pp. 1-6.
- [15] P. Thomas, Control valve liquid flow, *in: Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*, Butterworth-Heinemann, 1999, pp. 60–67.
- [16] P. Smith, R. Zappe, Double Block and Bleed Ball Valves, *in: Valve Selection Handbook*, Gulf Professional Publishing, 2004, pp. 293–307.
- [17] P. Smith, R. Zappe, Check Valves, *in: Valve Selection Handbook*, Gulf Professional Publishing, 2004, pp. 47–151.
- [18] M. Karrari, *System Identification*, Amirkabir University Press, 2019.
- [19] T.C.a.Y. Li, An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds, *SIAM Journal on Optimization*, 6 (1996) 418-445.

بیشتر از ۵ لیتر بر دقیقه نیز حفظ می‌شود که نشان دهنده قابلیت اطمینان قابل توجه کنترل‌کننده است. برای ساخت این کنترل‌کننده از قطعاتی که در دسترس و ارزان بوده‌اند استفاده شده است. به علاوه دستگاه به نحوی ساخته شده است که علاوه بر تغییر قطعات آن (به عنوان مثال تغییر شیر توپی و استفاده از شیر پروانه‌ای) می‌توان به راحتی برنامه عملکردی آن را تغییر داد به نحوی که کاربری دستگاه تغییر کند. این دستگاه در بخش‌هایی که لازم نیست جریان آرام باشد و همچنین افت توان اهمیتی ندارد می‌تواند به کار گرفته شود. به عنوان نمونه در بخش‌های اولیه طراحی مانند امکان‌سنجی، با توجه به هزینه بسیار پایین و انعطاف‌پذیری بالا می‌توان از این دستگاه استفاده کرد.

لازم به ذکر است که کنترل‌کننده ساخته شده توانایی کنترل دبی‌های کمتر از ۲ لیتر بر دقیقه را ندارد. کنترل جریان خروجی از شیر توپی به علت رفتار ناگهانی هنگام باز شدن بسیار سخت است و برای بهبود این مسئله می‌توان از شیرهای توپی وی-پورت استفاده کرد. مسئله دیگر شیر توپی ایجاد اغتشاش در جریان خروجی است که برای بهبود این مشکل می‌توان از شیرهای تناسبی استفاده کرد که هزینه دستگاه را افزایش می‌دهد. محدودکننده اصلی دقت کنترل‌کننده، جریان‌سنج توربینی آن است که به علت نویز زیاد و تاخیر دینامیکی دقت دستگاه را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. با توجه به اندازه دستگاه، می‌توان از جریان‌سنج‌های مقاومتری بهره برد. به علاوه با پیاده‌سازی کنترل‌های تطبیقی و یا عاطفی عملکرد برخط کنترل‌کننده بهبود می‌یابد.

فهرست علائم

e	ماتریس خطا
K	ضریب کنترل‌کننده
s	مجموع مربعات خطا
U	ماتریس متشکل از بردارهای ورودی و خروجی سیستم
y	ماتریس بردار خروجی سیستم
θ	بردار پارامترهای مجهول تابع تبدیل

زیرنویس‌ها

d	مشتق‌گیر
i	انتگرال‌گیر
LS	حداقل مربعات
p	تناسبی

مراجع و منابع

- [1] S.F. Moujaes, S. Deshmukh, Three-Dimensional CFD Predictions and Experimental Comparison of Pressure Drop of Some Common Pipe Fittings in Turbulent Flow, *J. Energy Eng.*, 132(2) (2006) 61-66.
- [2] S.F. Moujaes, R. Jagan, 3D CFD predictions and experimental comparisons of pressure drop in a ball valve at different partial openings in turbulent flow, *J. Energy Eng.*, 134(1) (2008) 24–28.