|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  *2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools.* |  |
| Implementation of PID control algorithm with variable setpoint on Arduino board to control the Polishing force |
|  |
| **A R T I C L E I N F O** |  | **A B S T R A C T** |
| ***Authors***Paranideh A.1,Moetakef-Imani B.2\*  | In the polishing process, one of the factors affecting material removal is the contact force between the tool and the workpiece. The contact force parameter is important in the sense that in this process, the amount of this force is lower than other machining processes, as a result, the force contact is one of the important issues to be controlled. In this research, a force control system based on the implementation of proportional-integral-derivative (PID) control algorithm with regulatory strategy in Arduino board is presented. It is possible to apply command signals to the actuator by the Pulse Width Modulation (PWM) unit of the Arduino board. The polishing setup in this research includes solenoid, dynamometer, direct current (DC) motor and belt sander. PID control coefficients were estimated by system identification method and using MATLAB software tools. The results show that the control system designed on the Arduino board provides the desired stability to control the polishing force with an acceptable error. Among other advantages of the developed system, the need for additional equipment is reduced compared to other commercial systems and it is more economical. |
| 1 Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.2 Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. |
| **\* Correspondence**Address: Ferdowsi University of Mashhad, Azadi Square, Mashhad, Khorasan Razavi province, Iran.Postal Code: 9177948944Phone: +98 (51) 38806098imani@um.ac.ir |
| **How to cite this article**Paranideh A, Moetakef-Imani B. Implementation of PID control algorithm with variable setpoint on Arduino board to control the Polishing force. 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools 2022 Oct (pp. \*-\*).  |
|  |  **Keywords** Force Control, PID Control, Variable Setpoint, Arduino Board, Polishing Process |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته* |  |
| پیاده­سازی الگوریتم کنترل PID با نقطه تنظیم متغیر بر روی برد آردوینو برای کنترل نیروی پولیش­کاری  |
|  |
| **چکیده** |  | مشخصات مقاله |
| در فرآیند پولیش­کاری، یکی از عوامل تأثیرگذار بر حذف مواد، نیروی تماسی بین ابزار و قطعه­کار می­باشد. پارامتر نیروی تماسی به این لحاظ حائز اهمیت است که در این فرآیند مقدار این نیرو نسبت به سایر فرآیندهای ماشین­کاری کمتر است، در نتیجه نیروی تماسی یکی از موضوعات مهم است که باید کنترل شود. در این پژوهش یک سیستم کنترل نیرو مبتنی بر پیاده­سازی الگوریتم کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) با قابلیت تنظیم در برد آردوینو ارائه می­گردد. اعمال سیگنال­های فرمان به عملگر، توسط واحد مدولاسیون عرض پالس (PWM) برد آردوینو امکان­پذیر است. بستر آزمایشگاهی پولیش­کاری در این پژوهش شامل سلونوئید، نیروسنج، موتور جریان مستقیم (DC) و سنباده نواری می­باشد. ضرایب کنترل PID توسط روش شناسایی سیستم و با استفاده از ابزارهای نرم­افزار متلب تخمین زده شدند. نتایج نشان می­دهند که سیستم کنترلی طراحی شده بر روی برد آردوینو، پایداری موردنظر برای کنترل نیروی پولیش­کاری را با خطای قابل قبول ارائه می­دهد. از دیگر مزایای سیستم توسعه یافته، نیاز به تجهیزات اضافی نسبت به سایر سیستم­های تجاری کاهش یافته و صرفه اقتصادی بیشتر است. |  | **نویسنده‌ها**احمد پرانیده1بهنام معتکف ایمانی2\* |
| 1 دانشگاه فردوسی، مشهد2 دانشگاه فردوسی، مشهد |
| **\* نویسنده مسئول**آدرس: استان خراسان رضوی، مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی. کد پستی: 9177948944 تلفن: 38806098 051imani@um.ac.ir |
| **کلیدواژه‌ها** کنترل نیرو، کنترل PID، نقطه تنظیم متغیر، برد آردوینو، فرآیند پولیش­کاری |

### 1- مقدمه

فرآیند پولیش­کاری (Polishing Process) معمولاً به عنوان آخرین فرآیند تولید (پرداخت سطوح) جهت حصول اطمینان از کیفیت مناسب سطح قطعات در نظر گرفته می­شود. در فرآیند مذکور سرعت حذف مواد عمدتاً به پارامترهایی نظیر جنس ذرات سنباده، جنس قطعه­کار، سرعت و نیروی فشاری بین ابزار و سطح قطعه­کار وابسته است. یکی از مهمترین پارامترهای این فرآیند نیرو
می­باشد، که در اکثر شرکت­های تجاری تولیدکننده­ی دستگاه­های پولیش­کاری برای کنترل این پارامتر تلاش­های فراوانی صورت گرفته است. بنابراین کنترل نیروی بین ابزار و قطعه­کار در حین فرآیند از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت سطح قطعات
می­باشد.

## 1-1- مروری بر تحقیقات پیشین

کنترل نیروی پولیش­کاری باید توسط یک سیستم کنترلی حلقه بسته صورت پذیرد. محققان سیستم­های مختلفی نظیر
سیستم­های پنوماتیک (Pneumatic)، سیستم­های سروو یا
ربات­های صنعتی را برای کنترل نیروی پولیش­کاری استفاده
کرده­اند. سیستم­های ذکر شده به دلیل بالا بودن هزینه یا بعضاً سرعت پاسخ آهسته، نمی­توانند پاسخگوی مناسبی برای تحقق این امر باشند. برای تولید سیگنال­های فرمان به عملگرها،
روش­هایی نظیر روش کنترل منطق فازی، روش کنترل شبکه عصبی و روش کنترل PID کاربرد گسترده­ای دارند. در بین این روش­ها الگوریتم کنترل PID به دلیل انعطاف­پذیری بالا، کاربرد در موقعیت­های مختلف و درک آسان­تر بیشتر مورد توجه قرار
می­گیرد[1].

ژینلانگ دانگ و همکاران به منظور کنترل نیروی فرآیند
پولیش­کاری، یک سیستم کنترل نیروی پنوماتیک مبتنی بر یک شیر روشن/خاموش سرعت بالا را پیشنهاد کردند. ایشان شیر را توسط یک کنترل­کننده منطقی PID که در PLC قابل برنامه­ریزی هستند، به وسیله سیگنال­های PWM بر روی یک ربات پیوندی با 5 درجه آزادی کنترل کردند[1]. ژیانگ گئو و همکاران به منظور کنترل نیروی پولیش­کاری میکرو-اپتیک (micro-optic)، یک سیستم کنترل برخط طراحی کردند. در تحقیق ایشان از یک حسگر نیروسنج برای اندازه­گیری نیرو و یک حسگر پیزو (piezo) جهت تنظیم نیرو استفاده شده است. ایشان الگوریتم کنترل PID را جهت رسیدن به پایداری نیرو در طی فرآیند، بر روی یک موتور پله­ای پیاده­سازی کردند[2]. فنجی تیام و همکاران به منظور بهبود کیفیت سطوح منحنی توسط ربات پولیش­کاری، اقدام به طراحی یک سیستم کنترل نیرو در طی فرآیند کردند. توسط ایشان اهمیت نیروی فرآیند تحلیل و مدل کنترل فشار طراحی شده است. سیستم پیشنهادی ایشان، یک سیستم نیرو-موقعیت-وضعیت مجزا بوده که این سیستم کنترلی باعث بهبود کیفیت سطوح منحنی گردیده است[3]. فاسااُمی ناگاتا و همکاران برای بهبود کیفیت سطح و کنترل نیروی فرآیند پولیش­کاری قالب­ها، یک سیستم کنترل موقعیت-نیرو مبتنی بر طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر (CAD/CAM)، برروی یک ربات پولیش­کاری قالب ارائه دادند[4]. کندالاس و همکاران چند پروژه آموزشی نظیر کنترل دمای چاپگر سه بعدی، خودکارسازی ربات، برنامه­نویسی ربات انسان­نما و برنامه­نویسی ربات دنبال­کننده را توسط بردهای آردوینو (َArduino) انجام دادند. این پروژه­ها توسط تیم­هایی از دانشجویان دانشگاه آلیکانته (Alicante) انجام شده است. ایشان با توجه به نظرسنجی از دانشجویان بعد از اتمام پروژه­ها، نتیجه گرفتند که این بردهای ارزان قیمت در زمینه کنترل می­توانند بسیار مفید و مؤثر واقع شوند[5].

## 2-1- شرح مسئله

با توجه به تحقیقات صورت گرفته می­توان نتیجه گرفت، که بردهای آردوینو می­توانند به عنوان یک کنترلگر مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این کارت­های مذکور می­توانند به صورت همزمان از حسگرها داده­برداری کنند. این ویژگی­ها باعث می­گردد نیاز به تجهیزات اضافی کاهش یابد. همچنین با توجه به تحقیقات صورت گرفته، کنترلگر حلقه بسته PID برای کنترل نیروی فرآیند نسبت به سایر کنترلگرها کاربرد بیشتری دارد.

با توجه به نتایج فوق، این پژوهش یک سیستم کنترل نیروی پولیش­کاری که از یک عملگر سلونوئید (Solenoid) در آن استفاده شده است را پیشنهاد می­کند، که این سلونوئید توسط سیگنال­های PWM کنترل می­شود. در این پژوهش از الگوریتم کنترل PID با نقطه تنظیم متغیر برای کنترل نیروی فرآیند پولیش­کاری در حین فرآیند استفاده می­شود. به­منظور پیاده­سازی این کنترلگر از برد آردوینو سری AVR-ATMEGA328P مدل UNO بهره گرفته شده است. کارت مذکور به واسطه واحد PWM خود این امکان را فراهم می­سازد، که بتوان سیگنال خروجی دیجیتال را به رفتار آنالوگ تبدیل کرد. برای کاهش زمان در امر برنامه­نویسی از کتابخانه­های موجود کنترل PID برای برد آردوینو استفاده شده است. ضرایب PID توسط روش شناسایی سیستم تخمین زده شده­اند. برای شناسایی سیستم، سیگنال روشن/خاموش زمان تصادفی به عملگر اعمال شده است. در نرم­افزار متلب از ابزار شناسایی سیستم با فرض سیستم مرتبه دو، تابع تبدیل سیستم محاسبه و با استفاده از ابزار تنظیم کنترل PID، ضرایب کنترلگر تخمین زده شده است.

بستر آزمایشگاهی جهت انجام فرآیند پولیش­کاری در آزمایشگاه طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده است. با توجه به نیاز صنعت در زمینه کیفیت سطح، سیستم پیشنهادی این پژوهش را به دلیل داشتن قابلیت توسعه و بهبود می­توان در فرآیندهای مختلف پولیش­کاری پیاده­سازی نمود.

### 2- روش حل

در شکل 1 بستر آزمایشگاهی پولیش­کاری قابل مشاهده است. فرآیند پولیش­کاری توسط سنباده نواری از جنس اکسید آلومینیوم انجام می­پذیرد، که میزان کشش نوار سنباده مذکور توسط دو پولی از جنس پلی­اورتان قابل تنظیم می­باشد. موتور DC که توسط کوپلینگ آلومینیومی انعطاف­پذیر به پولی ثابت متصل است، نیروی لازم جهت دوران سنباده را تأمین می­نماید. برای تنظیم سرعت دورانی موتور مذکور از مقاومت متغیر و به­منظور اندازه­گیری آن از یک حسگر شمارنده نوری FC-03 استفاده شده است. قطعه کار توسط گیره متصل به سلونوئید، برروی نوار سنباده قرار می­گیرد. این گیره دو قسمتی می­باشد که بخش زیرین محل قرارگیری قطعه­کار و بخش فوقانی محل قرارگیری حسگر نیروسنج است. محور سلونوئید در راستای عمود بر سطح نوار سنباده قابلیت جابجایی دارد. به­منظور اندازه­گیری نیرو در حین فرآیند از حسگر مقاومت فشاری FSR-402 استفاده شده است. وجود تکیه­گاه در در زیر محل قرارگیری قطعه برروی نوار سنباده، مانع از ایجاد قوس برداشتن یا کروی شدن سطح قطعه­کار می­گردد. نیروی اندازه­گیری شده توسط حسگر نیروسنج، ورودی سیستم کنترلی حلقه بسته PID می­باشد که کنترلگر مبتنی بر آن، سیگنال­های فرمان PWM مناسب را به سلونوئید اعمال می­کند.

امروزه کارت­های آردوینو بسیار متنوعی با پردازنده­ها، تعداد خروجی/ورودی مختلف و ویژگی­های ارتباطی متفاوت در دسترس هستند، که تهیه آن­ها با هزینه بسیار پایین امکان­پذیر می­باشد. برای برنامه­نویسی پردازنده­ی تمامی کارت­های آردوینو نرم­افزار کاملاً رایگان Arduino IDE استفاده می­شود که نصب آن برای تمام سیستم عامل­های موجود در بازار امکان­پذیر است. زبان
برنامه­نویسی این سخت­افزارها، زبان Arduino C می­باشد. در حال حاضر کتابخانه­های آماده زیادی برای سهولت در امر برنامه­نویسی برای این بردها وجود دارد. تمام این ویژگی­ها باعث می­شود که آردوینو به­طور چشم­گیری در زمینه آموزش، کنترل و رباتیک محبوب شود[5].

همزمان با اجرای سیستم کنترلی، کارت فوق قابلیت داده­برداری به­طور همزمان را نیز دارا می­باشد، که باعث عدم نیاز به تجهیزات داده­برداری مجزا می­شود. برنامه­نویسی بر پایه بستر خود ریزپردازنده­ی کارت طراحی شده است، که همچنین باعث عدم نیاز به تجهیزاتی نظیر رایانه در کنار دستگاه می­شود. داده­های اندازه­گیری شده توسط حسگر نیروسنج، توسط بخش آنالوگ (Analog) کارت قرائت می­شوند. کنترلگر PID توسط مقایسه نیروهای اندازه­گیری شده واقعی و مقدار نقطه تنظیم در هر لحظه، سیگنا­ل­های مناسب PWM را تولید و به صورت فرمان به سلونوئید ارسال ­می­کند. سطح ولتاژ و سطح جریان کارت آردوینو نمی­تواند توان مورد نیاز جهت جابجایی محور سلونوئید را تأمین کند. از این رو به­منظور تقویت این توان، از درایور موتور Monster Moto Shield استفاده شده است. اطلاعات قطعات الکترونیکی مورد استفاده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 1)** بستر آزمایشگاهی |

جدول 1) اطلاعات قعطات الکترونیکی

|  |  |
| --- | --- |
| قطعات الکترونیکی | مشخصات |
| کارت آردوینو | مدل UNO – پردازنده ATMEGA328P14 ورودی/خروجی دیجیتال (6 خروجی PWM) 6 ورودی آنالوگ - ساعت 16 مگاهرتزحافظه 32 کیلوبایت |
| سلونوئید | مدل SH-1040Sولتاژ نامی 15 ولت - جریان نامی 1.5 آمپر |
| موتور | سری DC – مدل 08GAFتوان نامی 40 وات – ولتاژ نامی 24 ولتجریان نامی 2.2 آمپر – دور نامی 1800 دور |
| راه­انداز سلونوئید | مدل Monster Moto Shieldبیشینه ولتاژ 16 ولت - بیشینه جریان لحظه­ای 30 آمپرجریان­دهی پیوسته عملی 14 آمپربیشینه بسامد PWM 20 کیلوهرتزقابلیت راه­اندازی دو موتور - قابلیت سنجش جریان |
| راه­انداز موتور | مدل XY-160Dبیشینه ولتاژ 36 ولت - جریان­دهی پیوسته عملی 7 آمپربیشینه بسامد PWM 20 کیلوهرتز - قابلیت راه­اندازی دو موتور |
| حسگر نیرو | سری فشار مقاومتی – مدل FSR-402سنسور آنالوگ - حساسیت 0.1 نیوتونمحدوده حساسیت نیرو 10-0 نیوتون - تکرارپذیری 2± درصدمقاومت غیرفعال 10 مگااهممحدوده ضخامت 1.25-0.2 میلی­مترپسماند 10+ درصد - زمان نمونه­برداری 3 میکروثانیه  |
| حسگر دور موتور | سری شمارنده نوری – مدل FC-03خروجی دیجیتال – ولتاژ کاری 5/3.3 ولتعرض شیار 5 میلی­متر - نشانگر وضعیت خروجیتعداد حفره دیسک 10 حفره |

سیگنال­های PWM سیگنال­هایی از جنس دیجیتال هستند که یک سیگنال آنالوگ را شبیه­سازی می­کنند. چرخه­کاری سیگنال­های PWM توسط معادله (1) تعریف می­شوند[1]:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) | $$d(t)=\left(\frac{T\_{on}}{T\_{PWM}}\right)×100$$ |

خروجی دیجیتال کارت آردوینو UNO، 8 بیتی است. در نتیجه مقادیر سیگنال­های PWM در کارت مذکور دامنه (256 ،0] را شامل می­شود. سطح ولتاژ خروجی بخش دیجیتال کارت 5 ولت
می­باشد، که واحد PWM این سطح ولتاژ را به 256 قسمت تقسیم می­کند. سیگنال PWM با چرخه­کاری صفر درصد (سطح صفر) معادل صفر ولت، سیگنال PWM با چرخه­کاری 50 درصد (سطح 127) معادل 2.5 ولت و سیگنال PWM با چرخه­کاری 100 درصد (سطح 255) معادل 5 ولت می­باشد.

کنترلگرهای PID در بسیاری از سیستم­ها برای مدیریت
ورودی­های فرآیند و کنترل خروجی­های فرآیند استفاده می­شوند. کنترلگر PID تفاوت بین نقطه تنظیم مورد نیاز و ورودی واقعی را بررسی و از مکانیزم بازخورد برای تغییر خروجی فرآیند استفاده می­کند. اختلاف بین نقطه تنظیم و ورودی کنترلگر خطا نامیده می­شود. هر کنترلگر PID شامل سه جز تناسبی، انتگرالی و مشتقی است، که هر کدام به ترتیب از خطای فعلی، خطای تجمعی و نرخ تغییر در خطا محاسبه می­شوند. خروجی کنترلگر PID توسط معادله (2) محاسبه می­شود[6]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (2) |  | $$O=K\_{p}e+K\_{i}t\sum\_{}^{}e+K\_{d}b\_{e}$$ |

خطای فعلی و نرخ تغییر در خطا به ترتیب توسط معادله­های (3) و (4) قابل محاسبه است[6]:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) | $$e=S-I$$ |
| (4) | $$b\_{e}= \left\{\begin{matrix}e\_{t}-e\_{t-1}&setpoint variable\\I\_{t-1}-I\_{t}&setpoint constant\end{matrix}\right.$$ |

تغییرات ضریب تناسبی مستقیماً خروجی کنترلگر را تغییر
می­دهد، اما منجر به نوسان ورودی اطراف نقطه تنظیم می­شود. افزایش ضریب انتگرالی سرعت رسیدن ورودی کنترلگر به نقطه تنظیم را افزایش می­دهد، اما درحالی­که جزء انتگرالی تجمیع می­گردد، یک تأخیر زمانی وجود خواهد داشت. جزء مشتقی از تغییر سریع خروجی کنترلگر جلوگیری می­کند[6].

### 3- تفسیر

جهت مشاهده عملکرد کنترلگر PID اعمال شده برروی کارت آردوینو، فرآیند پولیش­کاری برروی قطعه استوانه­ای از جنس برنج با سنباده از جنس ذرات اکسید آلومینیوم و شماره 1000 انجام شده است. قطر استوانه برنجی 12 میلی­متر و ارتفاع آن 20 میلی­متر است. فرایند ماشین­کاری برروی سطح قاعده این استوانه صورت گرفته است. به محض شروع فرآیند، کنترلگر PID اجرا می­شود و به دلیل صفر بودن نیروی اندازه­گیری شده توسط نیروسنج در ابتدای فرآیند، کنترلر به علت مقدار اختلاف زیاد بین نقطه تنظیم لحظه­ای و مقدار نیروی اندازه­گیری شده واقعی، مقادیر فرمان خروجی بیشتری را در واحد PWM به سلونوئید اعمال می­کند. در این پژوهش نقطه تنظیم ثابت پله­ای و نقطه تنظیم­های متغیری با حالت­های رمپ (ramp)، مثلثی و سینوسی برای کنترلگر در نظر گرفته شده است (جدول 2). سلونوئیدها به عنوان موتورهای خطی در نظر گرفته می­شوند و حرکت محوری دارند. تلورانس عبوری در نظر گرفته شده برای محور سلونوئید به­صورت عبوری می­باشد، که در حین انجام فرآیند، چرخش سنباده باعث ایجاد لرزش و اغتشاش می­گردد. از راهنمای بلبرینگ خطی، جهت حصول از حرکت نرم محور سلونوئید و عدم لرزش استفاده شده است.

برای تنظیم بهینه ضرایب PID از روش شناسایی سیستم استفاده شده است. برای شناسایی، ابتدا سیگنال روشن/خاموش زمان تصادفی به عملگر اعمال شد و به فاصله زمانی 40 ثانیه نیروهای اندازه­گیری شده توسط حسگر نیروسنج، که پاسخ سیستم به ورودی می­باشد، ذخیره گردید. با فرض سیستم مرتبه دو توسط ابزار شناسایی سیستم نرم­افزار متلب بهترین تابع تبدیل تخمین زده شد. معادله (5) با 85.88 درصد تطبیق، تابع تبدیل تخمین زده شده به روش شناسایی سیستم می­باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) | $$G(s)=\frac{2.548 s^{2}+33560 s+15800}{s^{2}+41.08 s+15.91}$$ |

با استفاده از تابع تبدیل فوق و به کمک ابزار تنظیم ضرایب PID نرم­افزار متلب، این ضرایب برای عبارت­های تناسبی، انتگرالی و مشتقی به ترتیب 0.0295، 3.4561 و صفر تخمین زده شد. معیار انتخاب ضرایب مذکور بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده برای کنترلگر PID می­باشد (جدول 3).

واحد آنالوگ کارت آردوینو 10 بیتی می­باشد، که بیان کننده قابلیت اندازه­گیری از حسگر آنالوگ در بازه (0،1024] می­باشد. با توجه به اطلاعات حسگر، دامنه نیرویی قابل اندازه­گیری برای سنسور بازه [0،10] نیوتون می­باشد. مقادیر دریافت شده توسط این بخش کارت بدون واحد می­باشند زیرا فقط سطحی از ولتاژ را در حالت 10 بیتی ارائه می­دهند. معادله (6) نگاشت یا تبدیل داده­های آنالوگ به نیرو می­باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (6) | $$F= \frac{10}{1023}A$$ |

جدول 2) اطلاعات حالت­های نقطه تنظیم ثابت و متغیر

|  |  |
| --- | --- |
| حالت نقطه تنظیم | مشخصات |
| پله | مقدار پله 800 – شروع از صفر |
| رمپ | دامنه 300 – شروع قسمت شیب­دار 500گام افزایش بخش شیب­دار 3.0303 - بخش ثابت 800100 نمونه در بخش شیب­دار |
| مثلث | دامنه 300 – کمینه نقطه تنظیم 500گام افزایش و کاهش 3.0303 - بیشینه نقطه تنظیم 800100 نمونه در هر صعود یا کاهش |
| سینوس | دامنه قله اوج تا قله قعر 300 – میانگین 650100 نمونه در هر تناوب |

جدول 3) فرضیات کنترلگر PID

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| پارامتر | فرض | نتایج ابزار تنظیم ضرایب متلب |
| بالازدگی (درصد) | 5.0000 > | 4.6600 |
| زمان صعود (ثانیه) | 0.0100 > | 0.0020 |
| زمان نشست (ثانیه) | 0.0500 > | 0.0136 |
| پایداری | دارد | دارد |

### 4- تحلیل نتایج

در شکل 2 نتایج اعمال کنترلگر PID با نقطه تنظیم متغیر برای چهار حالت پله­ای، رمپ، مثلثی و سینوسی قابل مشاهده می­باشد. همانطور که مشاهده می­شود سیستم پیشنهادی قابلیت ردیابی نقطه تنظیم متغیر را دارد. در فرآیند پولیش­کاری نیروی فشاری بین قطعه­کار و ابزار نسبت به سایر روش­های ماشین­کاری پایین­تر است و طراحی کنترلگر جهت کنترل نیرو در این فرآیند منجر به پایداری و تنظیم نیروی مذکور می­گردد، که اعمال آن باعث کاهش زبری و افزایش یکنواختی سطح قطعه­کار خواهد شد. بنابراین
می­توان توسط سیستم کنترلی پیشنهادی این پژوهش کیفیت سطح قطعات مختلف را بهبود بخشید. با بررسی داده­های موجود از لحاظ آماری که در جدول 4 مشاهده می­شوند، بیشینه میزان خطا برای هرکدام از حالت­های نقطه تنظیم قابل قبول می­باشد. از دلایل اغتشاش مشاهده شده در شکل 2 و خطای حاصل از دیدگاه آماری در جدول 4، محل اتصال دو لبه سنباده نواری به دلیل تغییر ضخامت می­باشد. با توجه به اطلاعات جدول 4، پاسخ سیستم کنترلی به تغییرات نقطه تنظیم به صورت رمپ بهترین عملکرد را دارا می­باشد.

با توجه به نتایج تجربی، سیستم پیشنهادی می­تواند نیروی واقعی را برای ردیابی نیروی موردنظر در هر لحظه در طی فرآیند حفظ کند. پیاده­سازی الگوریتم کنترل PID بر روی کارت آردوینو می­تواند دقت مناسب، پایداری و قابلیت اطمینان مطلوبی را برای کنترل نیروی پولیش­کاری ارائه دهد.

در ادامه این پژوهش در نظر گرفته شده است عملیات پولیش­کاری برروی قطعه­کارهای مختلف با جنس متفاوت انجام شود تا تأثیر سیستم کنترلی برروی کیفیت سطح قطعه­کار­ها، توسط اندازه­گیری زبری سطح بررسی شود.

|  |
| --- |
|  |
| (الف) |
|  |
| (ب)(ج) |
| (د) |
| **شکل 2)** پاسخ کنترلگر PID به الف) نقطه تنظیم ثابت ب) نقطه تنظیم متغیر حالت رمپ ج) نقطه تنظیم متغیر حالت مثلثی د) نقطه تنظیم متغیر حالت سینوسی |

جدول 4) نتایج آماری عملکرد کنترلگر

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  پارامتر آماریحالت نقطه تنظیم | میانگین خطا(نیوتون) | انحراف معیار(نیوتون) | بیشینه خطا(نیوتون) |
| ثابت | 0.0539 | 0.0718 | 0.2346 |
| رمپ | 0.0708 | 0.1152 | 0.8427 |
| مثلث | 0.1777 | 0.2329 | 0.9467 |
| سینوس | 0.2203 | 0.2764 | 0.9580 |

### 5- نتیجه گیری

سیستم کنترلی پیشنهادی مقاله بر روی دستگاه پولیش­کاری اجرا شد و می­تواند پاسخ مناسبی جهت کنترل نیروی پولیش­کاری ارائه دهد. پیاده سازی کنترل PID در کارت آردوینو، علاوه بر صرفه اقتصادی و کاهش تجهیزات مورد نیاز نسبت به سیستم­های تجاری، توانایی غلبه بر کاهش نیرو به دلیل براده­برداری از سطح و کاهش ارتفاع قطعه­کار در حین فرآیند را دارد که باعث ردیابی نقطه تنظیم متغیر در حین انجام فرآیند در زمان­های طولانی­تر خواهد شد. خطاهای ردیابی نقطه تنظیم متغیر توسط سیستم پیشنهادی قابل قبول است. بهترین عملکرد سیستم کنترلی، ردیابی نقطه تنظیم متغیر با حالت رمپ است. سیستم کنترلی پیشنهادی باعث پایداری، دقت و قابلیت اطمینان مطلوب در کنترل نیروی پولیش­کاری شده است. بنابراین برای رفع نیاز صنعت به کیفیت سطح مناسب قطعات، سیستم کنترلی پیشنهادی می­تواند در فرآیند­های پولیش­کاری مختلف پیاده­سازی شود که نیروی پولیش­کاری را در طی انجام فرآیند کنترل نماید و به دنبال آن کیفیت سطح مناسب برای قطعات را به همراه داشته باشد. در ادامه پژوهش بهبود عملکرد سیستم و تأثیر کنترلگر برروی زبری و کیفیت سطح
قطعه­کارهایی با جنس­های مختلف در نظر گرفته خواهد شد.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به­طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

**تعارض منافع:** بدین­وسیله نویسندگان اعلام می­کنند این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچ­گونه تضاد منافعی با اشخاص دیگر یا سازمان­ها ندارد.

**منابع مالی:** این پژوهش از هیچ سازمانی حمایت مالی دریافت نکرده است.

### فهرست علائم

|  |  |
| --- | --- |
| A | مقدار خوانده شده توسط واحد آنالوگ کارت آردوینو |
| be | نرخ تغییر در خطا |
| d | چرخه کاری سیگنال PWM (درصد) |
| e | خطای فعلی |
| F | نیرو اندازه­گیری شده حسگر (N) |
| G | تابع تبدیل |
| I | ورودی واقعی اندازه­گیری شده کنترلگر |
| Kp | ضریب عبارت تناسبی |
| Ki | ضریب عبارت انتگرالی |
| Kd | ضریب عبارت مشتقی |
| O | خروجی کنترلگر |
| s | لاپلاس |
| S | نقطه تنظیم کنترلگر |
| Ton | زمان فعال سیگنال PWM (s) |
| TPWM | زمان تناوب سیگنال PWM (s) |
| t | فاصله زمان بین ارزیابی­های پی­درپی کنترلگر و زمان لحظه­ای (s) |
| علایم یونانی |
| ∑ | سری تجمعی |
| زیرنویس­ها |
| d | عبارت مشتقی |
| i | عبارت انتگرالی |
| on | روشن |
| p | عبارت تناسبی |
| PWM | مدولاسیون عرض پالس |

### مراجع

1. Dong J, Shi J, Liu C, Yu T. Research of Pneumatic Polishing Force Control System Based on High Speed On/Off with PWM Controlling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021; 1:14-70.
2. Guo J, Suzuki H, Morita S, Yamagata Y, Higuchi T. A real-time polishing force control system for ultraprecision finishing of micro-optics. Precision Engineering. 2013; 787:792-37.
3. Tian F, Li Z, Lv C, Liu G. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces. Adv Manuf Technol. 2016; 1:8.
4. Nagata F, Hase T, Haga Z, Omoto M, Watanabe K. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot. Mechatronics. 2007; 207:216-17.
5. Candelas FA, Garcia GJ, Puente S, Pomares J, Jara CA, Perez J, Mira D, Torres F. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. IFAC-PapersOnline 48. 2015; 105:110-29.
6. Cameron N. Arduino Applied: Comprehensive Projects for Everyday Electronics. Edinburg, UK: Apress; 2019. 555 p.