



## Mechanical Arm Modeling of Bascule Lift with Simulation Method and Fuzzy Inference Approach

Reza Rahbar Hadibigloo<sup>1</sup>, Mohammad Mehdi Movahedi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Industrial Management, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Industrial Management, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 08.25.2021

**Revised:** 02.01.2022

**Accepted:** 05.18.2022

#### Keyword:

Palletizer

Robot Arm

4DOF

Controller PID

Controller Fuzzy

#### \*Corresponding Author:

Mohammad Mehdi Movahedi

**Email:**

[mmmovahedi@gmail.com](mailto:mmmovahedi@gmail.com)

### ABSTRACT

Thus far, controllers have often used the equations governing direct kinematics or reverse kinematics to control the position of the final implement of the robotic arm. Difficulties in unravelling direct kinematic equations and reverse kinematics, errors in solving equations, lack of user-friendly graphical environment, lack of flexibility in controller decision making and large volumes of calculations are problems of control systems in controlling robotic arms. In this paper, a skeletal lift robot with two classic PID and Fuzzy control methods with 4 degrees of freedom, in addition to a simulation in which four parts of the arm were examined by the controller and Matlab / Simulink as a tool for feature testing were used. Robotic arm movements were used. Implementation outputs show the satisfactory performance of the fuzzy controller which was able to control the arms of this robot with a percentage of uplift and a desired sitting time of 1.23 seconds. Furthermore, in order to test the performance of the scaffolding robot, the movement nodes of the arm were placed optimally and the controlled system showed the high accuracy of the fuzzy controller so that after 1.23 seconds at the critical point, the wrist area, it was able to continue with the desired sitting with a permanent error of zero and without any distortion.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

An increase in industrial activities and to aid different industries, robots have been invented to be utilized instead of humans. Due to their different applications, Bascule lift robots have been utilized extensively. This research was conducted to design a Bascule lift robot, to model its cinematic, static and dynamics, to model its lifting capacity, to present a computational algorithm for determination of maximum lifting burden in a specified route, to develop the simulation-based model of the robot arm, to implement and simulate the cinematic and dynamic equations as well as the proposed algorithm for determination of the lifting capacity of the simulated robot.

### Methodology

#### Simulation of Bascule Lift Robot

The robotic arm is comprised of four joints, which differ from each other in terms of their position and orientation. Simulink based model of the robot arm with open-loop structure is shown in Figure 1. Furthermore, Figure 2 presents the characteristics of the Bascule lift robot.

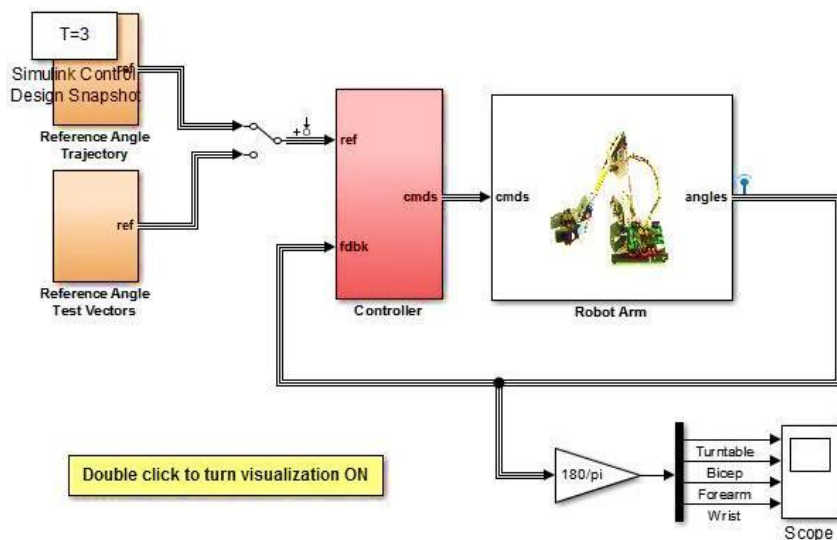


Figure 1. Simulink diagram of Bascule lift robot in MATLAB.

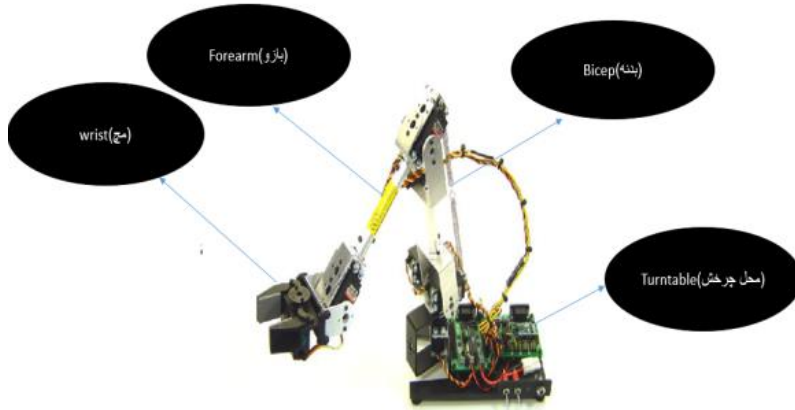


Figure 2. Characteristics of Bascule lift robot.

### Fuzzy Inference Approach

Fuzzy controllers are designed in such a way to follow fuzzy rules. In this system, the error and derivation of error (changes in error) were used as input for the controller.  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  are outputs of the fuzzy inference and their ranges of  $K_p$  and  $K_d$  were assumed to be  $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ , and  $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ , respectively. In order to define membership functions, the proportional and derivative parameters of the controller were normalized using the following linear equations changing their ranges into into  $[0, 1]$ .

$$(1) \quad K'_p = \frac{K_p - K_{p \min}}{K_{p \max} - K_{p \min}}$$

$$(2) \quad K'_d = \frac{K_d - K_{d \min}}{K_{d \max} - K_{d \min}}$$

In order to obtain the integral parameter, a variable as  $\alpha$ , with fixed values, was defined as follows:

$$(3) \quad K_i = \frac{K_p^2}{\alpha K_d}$$

$K'_p$ ,  $K'_d$  and  $\alpha$  were obtained using a set of fuzzy rules. Inputs of the controller were error and derivative of error, considered to be in the range of  $[-1, 1]$ .  $\alpha$  had fixed fuzzy values. The maximum and minimum boundaries of  $K_p$  and  $K_d$  were obtained as follows:

$$(4) \quad K_{p \min} = 0.32K_u$$

$$(5) \quad K_{p \max} = 0.6K_u$$

$$(6) \quad K_{d \min} = 0.08K_u T_u$$

$$(7) \quad K_{d \max} = 0.15K_u T_u$$

Finally, using  $K_u$  and  $T_u$  fitted for the system, the fuzzy PID controller was designed.

### Results and discussion

Figure 3 presents the model of the robotic arm with fuzzy PID controllers applied to the four degrees of freedom. Figure 4 shows the step response of wrist angle for the classic and fuzzy controllers. The results indicated a significant difference between classic and fuzzy controllers, where the settling time for the classic controller was very high while the response was fast for the fuzzy controller (settling time was 1.23 seconds), the output reaching the steady-state quickly.

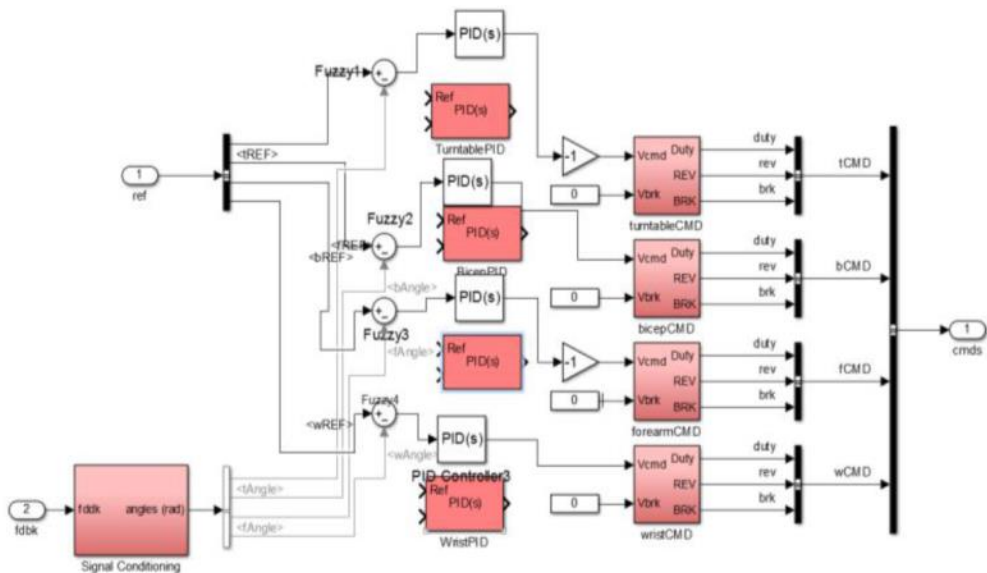


Figure 3. Fuzzy inference controller applied to four important points of the robotic arm.

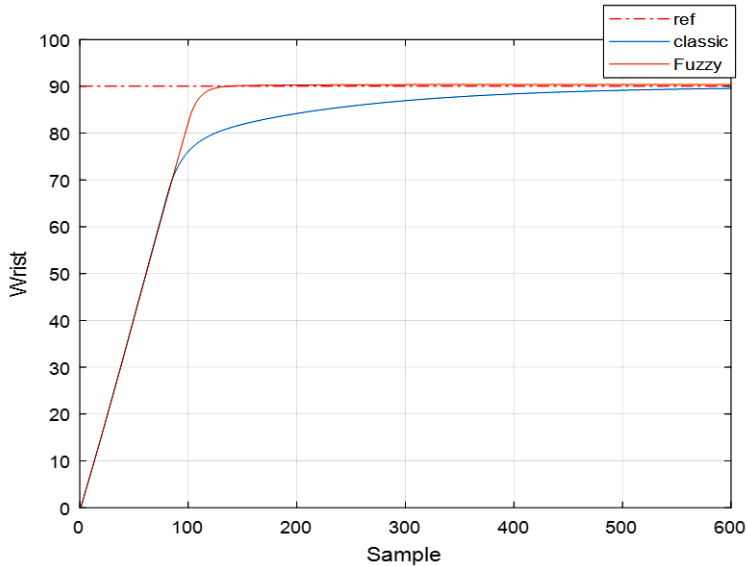


Figure 4. Comparison of classic and fuzzy controllers considering step response of wrist angle.

## Conclusion

In the present study, the knowledge-based mechanical arm modeling of Bascule lift with simulation method and fuzzy inference approach, was studied. Based on the simulation results, it was observed that classic PID controller in comparison with the fuzzy PID controller had steady-state error and therefore lacked the appropriate accuracy. Use of fuzzy algorithm can potentially transform the simulation of mechanical systems and specifically robotic systems. Analyses of direct cinematic, direct dynamics and indirect dynamics as samples of possible analyses were performed. The possibility of linearization and determination of equilibrium points was another application of this algorithm, which can be useful in designing controller systems. Obtained results showed the satisfactory performance of the designed fuzzy controller, where it was able to control the robot arms with appropriate overshoot and settling time (1.23 seconds). In addition, in order to test the performance of the Bascule lift robot, the moving joints of the robotic arm were positioned appropriately. The controlled system showed a significant accuracy in fuzzy PID controller; where after 1.23 seconds in the critical joint, i.e. the wrist, the step response was settled with zero steady-state error and without any distortion.



## مدل‌سازی بازوی مکانیکی دانش‌بنیان بالابر باسکول‌دار با رویکرد شبیه‌سازی و استنتاج فازی

رضا رهبر هادی بیگلو<sup>۱</sup>، محمدمهدی موحدی<sup>۲\*</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تاکنون کنترل‌کننده‌ها اغلب از معادلات حاکم بر سینماتیک مستقیم یا سینماتیک معکوس، با هدف کنترل موقعیت مجری نهایی بازوی رباتیک استفاده می‌کردند. حل دشوار معادلات سینماتیک مستقیم و سینماتیک معکوس، خطا در حل معادلات، نبود محیط گرافیکی کاربرپسند، انعطاف‌ناپذیری در تصمیم‌گیری کنترل‌کننده و حجم زیاد محاسبات از مشکلات سیستم‌های کنترلی موجود در کنترل بازوهای رباتیک می‌باشد. در این مقاله، ربات بالابر باسکول‌دار توسط دو روش کنترلی PID کلاسیک و Fuzzy و با تعداد درجه آزادی ۴ به همراه ارائه شبیه‌سازی که در آن چهار قسمت از بازو توسط کنترل‌کننده بررسی شده و از Matlab/Simulink به‌عنوان ابزار برای آزمایش ویژگی‌های حرکتی بازوی ربات استفاده شده است. خروجی‌های پیاده‌سازی نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش کنترل‌کننده فازی طراحی شده است که توانسته با درصد بالادگی و زمان نشست مطلوب ۱.۲۳ ثانیه به کنترل بازوهای این ربات بپردازد. همچنین به‌منظور آزمون عملکرد ربات بالابر باسکول‌دار، گره‌های حرکت بازو را هم به‌صورت مطلوب قرار داده و سیستم موردکنترل نشان از دقت بالای کنترل‌کننده فازی دارد؛ به‌طوری که بعد از گذشت ۱.۲۳ ثانیه در نقطه بحرانی یعنی مچ دست ناحیه wrist توانسته با نشستی مطلوب با خطای ماندگار صفر و بدون هیچ به‌هم‌خوردگی تداوم پیدا کند.

### نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

### کلید واژگان:

بازوی ربات  
ربات بالابر باسکول‌دار  
درجه آزادی  
کنترل‌کننده PID  
کنترل‌کننده Fuzzy

\*نویسنده مسئول: محمدمهدی موحدی  
پست الکترونیکی:  
[mmmovahedi@gmail.com](mailto:mmmovahedi@gmail.com)



## مقدمه

تکنولوژی رباتیک در دهه ۵۰ میلادی پر و بال گرفت و امروزه یکی از حوزه‌های بسیار پیشرفته فناوری به حساب می‌آید که در زمینه‌های تولید، هوا و فضا، نظامی، امنیت مدنی و حمل‌ونقل به بشر خدمات بسیاری ارائه کرده است. در دوران جنگ داخلی آمریکا آبراهام لینکلن به کشورش (در واقع به کل دنیا) کمک کرد تا برده‌داری را از بین ببرد. اما ظاهراً ظرف ده سال آینده این رویه باز هم به وجود خواهد آمد [۱]. اگرچه این بار برای داشتن آن‌ها لازم نیست درگیر ستیز با نظام برده‌داری بشویم. این خدمتکاران که در زندگی روزمره ما نقش پیش‌خدمت همه‌کاره دارند ربات‌هایی هستند که از ترکیب چندین و چند فناوری خاص با هوش مصنوعی ایجاد شده‌اند [۲]. با افزایش فعالیت‌های صنعتی، رباتیک برای کمک به صنایع مختلف برای انجام کار به جای استفاده از نیروی انسانی اختراع شده است [۳]. ربات حمل‌بالابر با توجه به گستردگی کاربرد خود در صنایع مختلفی کاربرد پیدا کرده است [۴]. سالانه براساس آمار غیررسمی (درج شده در جراید معتبر کشور ایران ۱۳۹۷) مصدومین حامل حمل بار در کشور ۱۶۰۰۰ نفر می‌باشد. به‌منظور تقلیل و کاهش آمار مصدومیت حاصل از حمل بار می‌توان این آمار را حتی به صفر رساند [۵]. ربات‌ها به دلیل ویژگی‌های عملکردی مناسب از جمله صلبیت بالا، دقت بالا، آزادی سرعت عملکرد بالا و ظرفیت حمل بار بالا مورد توجه قرار دارد. ظرفیت حمل بار دینامیکی ربات به‌عنوان ماکزیمم باری که ربات می‌تواند به‌صورت تکرارپذیر و با درنظر گرفتن تأثیرات دینامیکی بار و ساختمان ربات با دقت مشخص و تعریف شده‌ای حمل کند تعریف می‌شود [۶]. اهمیت موضوع ظرفیت حمل بار ربات به این دلیل است که دانستن ظرفیت حمل بار دینامیکی ربات از جمله مهم‌ترین ابزار در طراحی ظرفیت نیرو، گشتاور سیستم محرکه ربات می‌باشد. به عبارت دیگر با استفاده از تحلیل ظرفیت حمل بار ربات می‌توان بیشترین بار مجازی که ربات می‌تواند در شرایط کاملاً ایمن و مطابق با دقت تعریف شده حمل کند را با در نظر گرفتن اثرات دینامیکی بار و ساختمان ربات و درنظر گرفتن سایر قیده‌های عملکردی از جمله دقت حرکت، تعیین کرد. این روند در فاز طراحی برعکس طی شده است و می‌توان با این تحلیل ظرفیت نیروی/گشتاور عملگرها را برای یک کاربرد خاص و شرایط کاری مشخص تعیین کرد و انتخاب بهینه‌ای برای سیستم محرکه ربات انجام داد. انتخاب صحیح و بهینه برای سیستم محرک ربات، هم از نظر ایمنی عملکرد و هم از نظر هزینه ساخت و عملکرد ربات بسیار اهمیت دارد [۷]. این پژوهش با هدف طراحی ربات حمل بار بررسی کاربردهای آن، مدل‌سازی سینماتیکی، استاتیکی و دینامیکی آن، مدل‌سازی ظرفیت حمل بار آن و ارائه یک الگوریتم محاسباتی برای تعیین بیشترین بار قابل حمل ربات در یک مسیر مشخص و در انتها طراحی یک مدل آزمایشگاهی از این ربات و اجرا و شبیه‌سازی روابط سینماتیکی و دینامیکی و الگوریتم تعیین ظرفیت حمل بار پیشنهادی برای مدل آزمایشگاهی این ربات انجام خواهد شد (آزمون‌های همبستگی). آزمون‌های همبستگی برای بررسی رابطه بین دو یا چند متغیر به‌کار می‌روند. همبستگی به معنای هم‌تغییری دو متغیر است که از آن استنباط می‌شود افزایش یا کاهش یک متغیر با افزایش یا کاهش متغیر دیگر همراه است. برای مثال: میزان اشتباه و خطای عملکردی در بازوی یک ربات، به‌طور کلی خطایابی یک روش مفید ارزیابی اجرا و عملکرد دقیق ربات‌ها می‌باشد. میزان اشتباه و خطای عملکردی ربات، به‌طور کلی خطایابی یک روش مفید ارزیابی اجرا و عملکرد ربات‌ها می‌باشد. خطاها نمی‌توانند در تجربه اظهار کنند که چگونه اشتباهات بیشتر ایجاد می‌شود یا در کجا این خطاها روی می‌دهند. این در حالی است که کنترل‌کننده ربات برای کاهش خطاها در واقعیت می‌تواند عملکرد دقیق را برحسب وظایف، در بازه زمانی، مهیا کند. این ربات در سرعت، دقت و کاهش انرژی و منابع انسانی نقش به‌سزایی دارد. بنابراین در این پژوهش، مدل‌سازی بازوی مکانیکی دانش‌بنیان بالابر باسکول‌دار با رویکرد شبیه‌سازی و استنتاج فازی انجام شده است. در مدل پیشنهادی، ابتدا مدل بازوی مکانیکی ربات و درجات آزادی آن ارائه و سپس حرکت آن در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. علاوه بر استفاده از معادلات لاگرانژ، برای بازوی ربات، سیستم‌های کنترلی PID و Fuzzy نیز طراحی شده است.

## کارهای مرتبط

به‌طور خلاصه، اگرچه در سال‌های اخیر، مطالعاتی در حوزه مدل‌سازی بازوی مکانیکی وجود دارد اما این مطالعات در مورد بهبود پارامترهای درصد بالازدگی، دقت بالای کنترل‌کننده فازی و کاهش خطا با روش‌های منطق فازی، هنوز محدود است. در این مقاله، یک مدل‌سازی بازوی مکانیکی دانش‌بنیان بالابر باسکول‌دار با رویکرد شبیه‌سازی و استنتاج فازی پیشنهاد شده است که پارامترهای کنترلی موردنظر را بهبود می‌دهد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در ارتباط با ربات بالابر باسکول‌دار و ربات با کنترل‌کننده‌ها پیشنهاد شده [۸] و استفاده از کنترل منطقی فازی برای بازوی ربات را مطالعه کرده است. در این مطالعه، قوانین مرتبط با کنترل‌کننده‌های PID فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. کنترل‌کننده‌های PID فازی از لحاظ عددی، شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج شبیه‌سازی، موفقیت کنترل PID فازی در مسائل ردیابی مسیر را تأیید می‌کنند [۹]. یک روش نظارت فازی برای کنترل‌کننده PID را ارائه کرده است. این روش به دنبال تنظیم پارامترهای PID آنلاین برای بهبود عملکرد به صورت خودکار است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد تنظیم نظارت فازی بهتر از عملکرد روش‌های کلاسیک تنظیم برای کنترل PID است [۵]. کنترل مقاوم ساده‌ای را برای ردگیری موقعیت بازوی ربات، در حضور عدم قطعیت‌های موجود در دینامیک، سینماتیک و ماتریس ژاکوبین بازوی ربات ارائه داده است. اثبات پایداری نشان می‌دهد که سیستم حلقه بسته دارای پایداری مجانبی سراسری است [۷]. یک کنترل‌کننده PID فازی به‌منظور حل مسئله ردیابی یک مسیر مطلوب برای ربات نگرهبان مرزی دو لینکی پیشنهاد شده است. ضرایب کنترل‌کننده PID توسط یک سیستم فازی با مجموعه‌های گوسی به‌صورت برخط و بدون نیاز به پارامترهای مدل تنظیم می‌گردد. در نهایت با اجرای عملی کنترل‌کننده پیشنهادی توسط سخت‌افزارهای مناسب بر ربات نگرهبان مرزی و بررسی و مقایسه نتایج حاصل از این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده PID کلاسیک، موفقیت کنترل‌کننده پیشنهادی نشان داده شده است [۶]. مناسب بودن کنترل‌های فازی-تناسبی-انتگرالی و مشتقی برای کنترل ربات با دو درجه آزادی را بررسی کرده است. هدف این تحقیق، اجرای عملی کنترلر هوشمند روی رباتی است که در پژوهشکده رباتیک دانشگاه آزاد نجف‌آباد موجود می‌باشد [۲]. طراحی کنترل‌کننده PID برای کنترل بازوی ربات از طریق سرو موتور DC را ارائه کرده و سپس طراحی مناسب‌تر آن با استفاده از منطق فازی پیشنهاد داده است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد نشان داده است که کنترلر منطق فازی FLC نسبت به کنترلر PID اثر بخشی و بازدهی بالایی دارد و خطای سیستم به‌مراتب کمتر و سیستم از دقت بالایی برخوردار است [۱۰]. ابتدا یک کنترل‌کننده مقاوم برای کنترل موقعیت ربات ارائه شد که پایداری آن توسط روش لیاپانف تضمین می‌گردد. سپس کنترل‌کننده پیشنهادی بر روی یک ربات تک مفصل اعمال شد و شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف صورت پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که سیستم کنترل ارائه‌شده، در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها مقاوم است و عمل تنظیم و ردگیری موقعیت را به‌طور مطلوبی انجام می‌دهد [۱۱]. به طراحی ربات اسکارا برای استفاده در خطوط تولید و مونتاژ انعطاف‌پذیر، به‌منظور مونتاژ و پالت‌گذاری مجموعه‌ای از قطعات و با در نظر گرفتن اهدافی چون سهولت ساخت و مونتاژ اقتصادی بودن طرح و قابلیت دوران نامحدود قطعه کار پرداخت [۱۲]. از منطق فازی و قوانین حاکم بر آن به‌منظور پیش‌بینی موقعیت رسیدن مجری نهایی بازوی رباتیک به نقطه مؤثر استفاده کرده است. با استفاده از منطق فازی می‌توان یک سیستم استنتاج فازی که سینماتیک معکوس را استنتاج کند، ایجاد کرد [۱۳]. روشی برای فعال کردن تبعیض اشیا و مرتب‌سازی بر روی سطوح‌های جداگانه ارائه کرده است. در مطالعه حاضر 5D.O.F کیت بازو توسط دانش‌آموزان مونتاژ شد و برای درک مفاهیم رباتیک ساده مانند درجه آزادی، عمل جابه‌جایی، انتخاب و محل پالتیزاسیون و سایر موضوعات در یک برنامه آزمایشگاهی همراه با شبیه‌سازهای آنلاین که در آن ربات‌ها شبیه‌سازی شده است، استفاده شد [۱۴]. در این مطالعه، پایدارسازی و کنترل سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی شده و نصب بهینه پایدارساز سیستم قدرت طراحی و یک سیستم قدرت چندماشینه معرفی شده است. مشکل تنظیم پارامتر پایدارساز سیستم قدرت

به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی که توسط الگوریتم جست‌وجوی کوکو حل شده، فرموله شده است. یک مقدار ویژه براساس تابع هدف شامل نسبت میرایی و فاکتور میرایی از حالت‌های الکترومکانیکی میراشونده کُند برای مشکل طراحی پایدارساز سیستم قدرت در نظر گرفته شده است [۱۵]. در این پژوهش، انتقال حرارت جریان ناپایای سیال نیوتنی بین یک صفحه نوسانی و یک صفحه ثابت تحت تأثیر میدان مغناطیسی بررسی شده است. در مطالعه حاضر، ابتدا معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای سیال نیوتنی ارائه گردید و سپس برای جریان هیدرومغناطیس ناپایای سیال نیوتنی بین دو صفحه نوسانی، ساده‌سازی گردید. با توجه به این که معادلات حاکم، معادلات دیفرانسیل جزئی هستند با استفاده از تبدیل تشابهی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شدند [۱۶]. مکانیزم و حرکت یک ربات بالابر باسکول‌دار را شبیه‌سازی کرده است. در این مقاله، برای ۴ درجه آزادی در نظر گرفته شد و معادلات حرکت به‌صورت ماتریسی در نرم‌افزار متلب حل گردید [۱۷]. یک طراح کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای یک ربات بازوی مکانیکی متحرک با دو درجه آزادی پیشنهاد کرده، به‌گونه‌ای که با اعمال ورودی مناسب که همان گشتاورهای ربات است، مجری نهایی (پنجه ربات) در موقعیت موردنظر قرار می‌گیرد. ابتدا با استفاده از روش اوپلر لاگرانژ که مبتنی بر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل سیستم است، معادلات دینامیکی سیستم محاسبه شد و سپس کنترل‌کننده مود لغزشی فازی طراحی شد [۱۸] و نیز یک کنترل‌کننده تطبیقی فازی برای یک بازوی مکانیکی سه درجه آزادی طراحی شد. در طرح پیشنهادی ابتدا معادلات سینماتیک مستقیم ربات سری سیکو با سه درجه آزادی استخراج شد و سپس فضای کاری اثرگذار انتهایی ربات مذکور بررسی گردید. در ادامه، معادلات دینامیکی ربات مذکور با استفاده از روش لاگرانژ به‌دست آمد و سپس یک کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی به روش دینامیک معکوس برای پایداری آن طراحی گردید [۱۹]. و روش کنترل مدل فرامحلی روی بازوی ماهر مکانیکی بیان و اجرا شد. در ابتدا ساختار کلی این روش که زیرمجموعه‌ای از روش‌های متنوع کنترل مستقل از مدل است بیان گردید، سپس روش کنترلی مذکور بر روی استراتژی کنترل ولتاژ بازوی مکانیکی اجرا شد و نتایج شبیه‌سازی‌ها تخمین خوب و حذف نامعینی‌ها را در حلقه کنترلی نشان داده است.

### سینماتیک ربات بالابر باسکول‌دار

تحلیل سینماتیکی ساختار مکانیکی یک ربات را می‌توان تشریح حرکت آن نسبت به مرجع ثابت (با متحرک) بدون در نظر گرفتن تأثیر نیرو و گشتاورها تعریف کرد که اگر تمایزی بین سینماتیک مستقیم و مشتق آن قائل باشیم مفید خواهد بود. در بازوی ماهر رباتیک، سینماتیک، تحلیل رابطه بین موقعیت مفاصل و مجری نهایی را مشخص می‌سازد. مشتق سینماتیکی در واقع رابطه بین حرکت مجری نهایی و مفاصل را در قالب سرعت و ژاکوبین بازوی ماهر تعیین می‌کند. فرموله کردن روابط سینماتیکی، نیازمند مطالعه دو نوع از مسائل است که به‌ترتیب، مسائل سینماتیک مستقیم و سینماتیک معکوس می‌باشند. مورد اول در ارتباط با تشریح حرکت مجری نهایی به‌عنوان تابعی از حرکت مفاصل به وسیله محاسباتی در قالب جبر خطی است. در مورد دوم ابتدا حرکت مطلوبی برای مجری نهایی در فضای کار در نظر گرفته می‌شود، سپس موقعیت و حرکت مفصلی بر مبنای آن محاسبه می‌شود که عنوان سینماتیک معکوس نیز به همین دلیل به آن اطلاق می‌شود. داشتن مدل سینماتیکی ربات همچنین برای تعیین روابط بین نیروها و گشتاورهایی که به مفاصل اعمال می‌شود و نیز نیروهای واردشده به مجری نهایی در حالت تعادل استاتیکی مورد استفاده است. سینماتیک بازوی ماهر در واقع راهی برای دستیابی به دینامیک مدل ارائه می‌دهد. دستیابی به مدل دینامیکی ربات در طراحی ساختار مکانیکی، انتخاب سیستم‌های محرکه، تعیین راهبرد کنترلی و شبیه‌سازی کامپیوتری بسیار حائز اهمیت است و در حال حاضر نیز در این زمینه تحقیقات گسترده صورت می‌گیرد.

## کنترل PID

یکی از مهم‌ترین و به‌روزترین روش‌های کنترلی<sup>۱</sup> PID کنترلر است. PID کنترلی است که از سه متغیر تناسبی، انتگرال و مشتق‌گیر، تشکیل شده است. اگرچه مفهوم PID به ظاهر ساده می‌رسد اما زیربنای محاسبات کنترل PID پیچیده و دستیابی به عملکرد مطلوب، مستلزم تعیین مقادیر فرایندهای خاص برای طیف وسیعی از پارامترهای تأثیرگذار بر هم است. فرایند یافتن این مقادیر، تیونینگ<sup>۲</sup> نام دارد. کنترلر PID از خطای بین ورودی و خروجی استفاده می‌کند و یک سیگنال کنترلی برای کنترل سیستم تولید می‌کند. تابع تبدیل کنترلر PID به صورت زیر است:

$$G_{PID}(S) = K_p + K_I/S + K_D S \quad (1)$$

که  $K_p$  بهره تناسبی،  $K_I$  بهره انتگرالی و  $K_D$  بهره مشتقی است.

## منطق کنترل فازی

منطق کنترل فازی از چهار مفهوم اصلی تشکیل شده است: فازی‌ساز، پایه‌دانش فازی، واحد استنتاج و دفازی‌ساز. فازی‌ساز سیگنال‌های پیچیده را به سیگنال فازی‌شده تبدیل می‌کند. پایه‌دانش از پایه داده و پایه قانون تشکیل شده است. قسمت استنتاج، قوانین کنترلی را در زمان‌های مختلف بررسی می‌کند و تصمیم می‌گیرد که ورودی برای سیستم چگونه سیگنالی باشد. در نهایت دفازی‌ساز سیگنال فازی را به سیگنال کنترلی حالت قبل تبدیل می‌کند. بلوک دیاگرام این ساختار در شکل ۱ ارائه شده است.

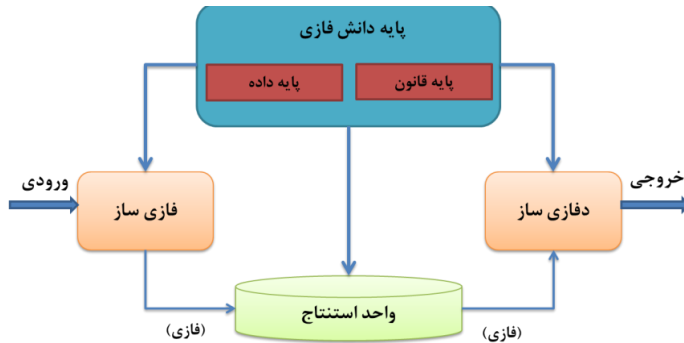
سیستم‌های کنترل فازی PID به‌طور کلی به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند. کنترل فازی با عملکرد مستقیم و کنترل فازی نظارتی. نحوه عملکرد کنترل فازی مستقیم تقریباً با سیستم کنترلی PID متداول مشابه است؛ از این رو این نوع سیستم کنترلی فازی را سیستم کنترلی شبه PID نیز می‌نامند اما عملکرد سیستم فازی نظارتی به‌گونه‌ای است که امکان غیرخطی بودن را برای خروجی کنترلر به ارمغان می‌آورد. بنابراین بهره‌های PID براساس استنتاج فازی تیون می‌شوند تا براساس روش مرسوم Z-N [۹].

اهداف کنترل در این منطق کنترلی عبارتند از:

- (۱) خوب بودن تعقیب
- (۲) کم بودن اثر نویز و اغتشاش در خروجی
- (۳) کم بودن حساسیت خروجی به تغییرات فرایند تحت کنترل
- (۴) پایدار بودن سیستم تحت شرایط مختلف.

<sup>1</sup> Proportional-Integral-Derivative Controller

<sup>2</sup> Tuning

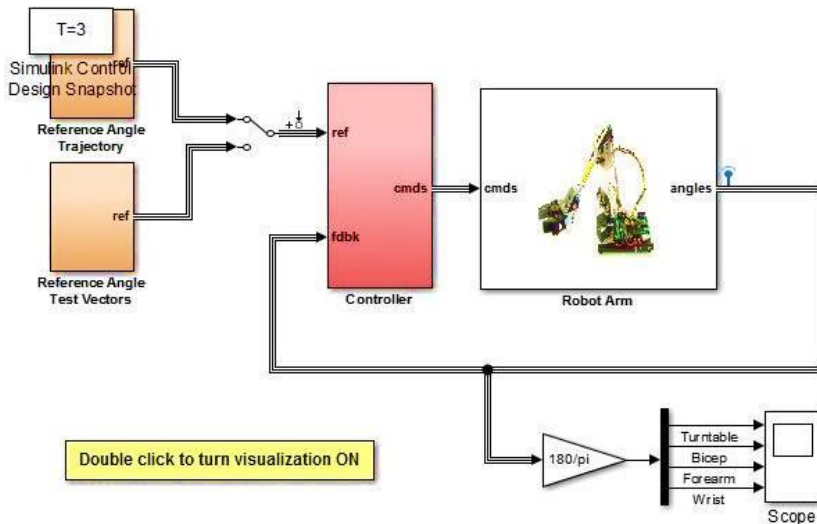


شکل ۱. اجزای تشکیل‌دهنده کنترل‌کننده فازی [۲۰].

## تجزیه و تحلیل نتایج

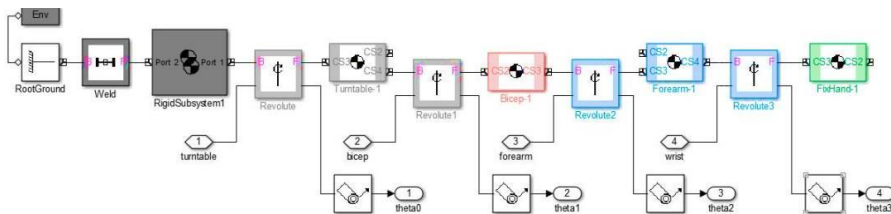
### شبیه‌سازی ربات بالابر باسکول‌دار

بازوی ربات، توسط چهار گره ایجاد شده است. تنها تفاوت در محل و جهت‌گیری آن‌ها می‌باشد. بنابراین لازم است برای تعیین محل دستگاه مختصات اجزای هرکدام از بازوها از پارامترهای متفاوت استفاده شود. برای معنی‌دار شدن نام داده‌ها، آن‌ها به‌صورت ساختار اندیس‌دار ذخیره می‌شوند. شماره اندیس بیانگر شماره بازو می‌باشد. قابلیت انتقال داده‌ها به زیرسیستم از طریق پنجره محاوره‌ای که با کلیک مضاعف روی زیرسیستم باز می‌شود از مزیت‌های زیرسیستم ماسک شده است. بدین وسیله می‌توان شماره بازو و حالت اولیه بازوها را از طریق این پنجره محاوره‌ای مشخص کرد. با مشخص شدن شماره بازو و ارتباط دادن آن به اندیس داده مربوط می‌توان پارامترهای هر بازو را مشخص کرد. در ضمن می‌توان توضیحاتی را نیز برای کمک به استفاده‌کننده درج کرد. همان‌گونه که در پنجره محاوره‌ای مشاهده می‌شود، با وارد کردن مقادیر پارامترهای دلخواه که از قبل تنظیم شده‌اند، این مقادیر در متغیرهای محلی مربوط به زیرسیستم ذخیره می‌شوند. سپس با انتصاب این متغیرها به پارامترهای درون زیرسیستم می‌توان عمل انتقال داده‌ها را از طریق پنجره محاوره‌ای انجام داد. پارامترهای زیرسیستم ماسک شده بازوها عبارتند از: شماره بازو که بیانگر محل بازو و اندیس متغیر ساختاری مربوط به آن می‌باشد، حداکثر تغییر طول بازو از حالت تعادل، حالت اولیه هر بازو که به‌صورت تغییر طول از حالت تعادل بیان می‌شود و ضریب فنر و دمپر که برای شبیه‌سازی انتهای نقطه کار بازو استفاده شده است. طراحی شبیه‌ساز ساختار بازو به‌صورت مدل Simulink نهایی آن در شکل ۲ می‌باشد.



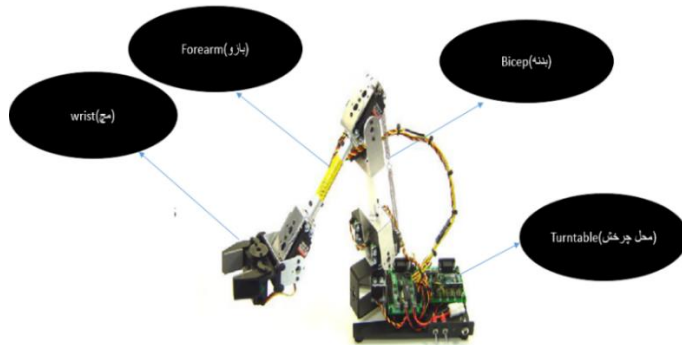
شکل ۲. شماتیک سیمولینک در متلب.

برای اعمال نیرو به محور کشویی بین بازوی بالا و پایین از بلوک محرک محور استفاده شده است. همچنین بلوک حسگر محور مقادیر اندازه‌گیری شده تغییر مکان، تغییر سرعت، تغییر شتاب، نیروی وارد شده، گشتاور عکس‌العمل و نیروی عکس‌العمل را در دسترس قرار داده است. این پارامترها را می‌توان نسبت به دستگاه مختصات مرجع یا دستگاه مختصات محلی اندازه‌گیری کرد. این دو بلوک به درگاه‌های افزوده‌شده روی محور متصل می‌شوند. شکل ۳ مشخصات درجات آزادی و متغیرهای ورودی ربات بالابر باسکولدار را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مشخصات درجات آزادی و متغیرهای ورودی ربات بالابر باسکولدار.

برای اعمال شرایط اولیه بازوها از بلوک شرایط اولیه محور استفاده شده است. مقادیر عددی این بلوک همان‌گونه که بیان شد از طریق پنجره محاوره‌ای زیرسیستم ماسک‌شده برای هر قسمت بازو معین می‌گردد. به دلیل افزونگی محرک‌ها نسبت به درجات آزادی ساختار (برابر چهار درجه آزادی محرک)، تنها می‌توان برای بازو از بلوک شرایط اولیه استفاده کرد.



شکل ۴. مشخصات ربات بالابر باسکول‌دار.

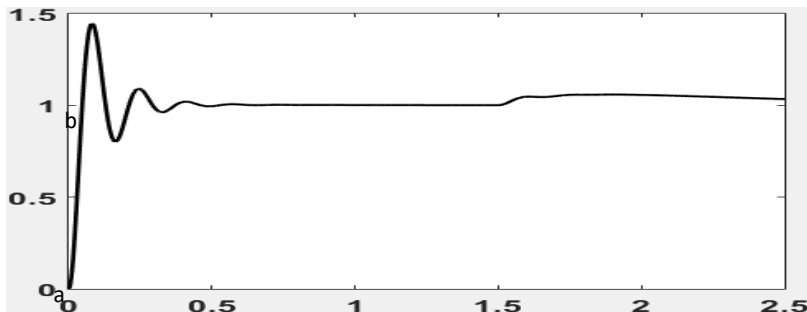
محل بازوی بین گره سوم و چهارم با تعیین سطح دو گره به‌طور منحصربه‌فردی مشخص خواهد شد. مسئله اساسی دیگر، نحوه مدل کردن نقطه انتهای کار هرکدام از گره‌ها می‌باشد. در واقع گره، مانع از آن می‌شود که بازو بتواند افزایش طول نامحدودی داشته باشد؛ بنابراین باید نیرویی عکس جهت حرکت، در لحظه رسیدن بازو به محدوده مشخص اعمال گردد. مدل‌های متعددی برای ایجاد این سطح مجازی وجود دارد؛ از جمله می‌توان به مدل هانت و کراسلی، مدل فنر و دمپر، مدل سطح فنری، سطح فنری با اشباع و سطح فنری همراه با پسماند اشاره کرد.

### کنترل‌کننده PID

PID از سه قسمت مجزا به نام‌های تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر تشکیل شده است که هرکدام از آن‌ها سیگنال خطا را به‌عنوان ورودی می‌گیرند و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی‌شان با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترل‌کننده PID است برای اصلاح خطابه سیستم فرستاده می‌شود. در ادامه مدل طراحی کنترل‌کننده فازی برای سیستم ربات مورد استفاده در این مقاله ارائه شده است.

### طراحی کنترل‌کننده فازی

کنترل‌کننده فازی به صورتی طراحی می‌شود که از قوانین فازی پیروی می‌کند. این قوانین با توجه به خروجی پاسخ پله سیستم به همراه اغتشاش که در این مقاله بررسی شده نوشته شده است (شکل ۵).



شکل ۵. پاسخ پله سیستم به همراه اغتشاش.

در ادامه، روش طراحی کنترلر فازی (سیستم کنترل فازی PID) در این مقاله ارائه شده است. در این سیستم کنترلی، خطا و تغییرات خطا (مشتق خطا) به عنوان ورودی کنترل کننده هستند که توابع عضویت آن‌ها در شکل ۶ ارائه شده است.  $K_p$ ،  $K_i$  و  $K_d$  خروجی کنترل کننده هستند به طوری که ابتدا فرض می‌شود  $K_p$  و  $K_d$  در محدوده‌های  $[K_{pmin}, K_{pmax}]$  و  $[K_{dmin}, K_{dmax}]$  هستند. به دلیل تعریف کردن توابع عضویت استاندارد پارامترهای تناسبی و مشتق گیر کنترل کننده با استفاده از رابطه خطی زیر نرمالیزه می‌شوند و در محدوده بین  $[0, 1]$  قرار می‌گیرند.

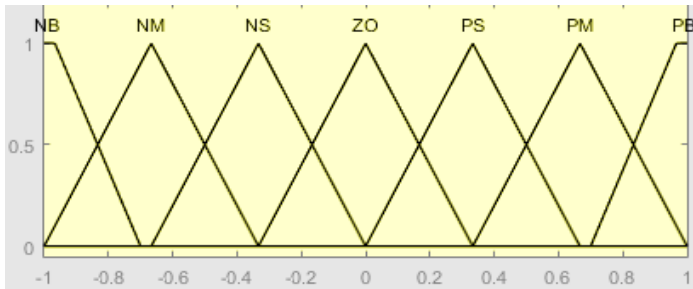
$$K'_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (۲)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} \quad (۳)$$

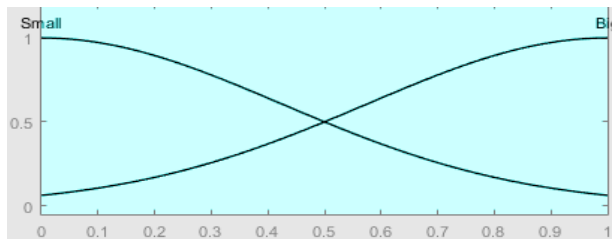
برای محاسبه پارامتر انتگرالگیر کنترلر یک متغیر ثابت  $\alpha$  تعریف شده و از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K_i = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad (۴)$$

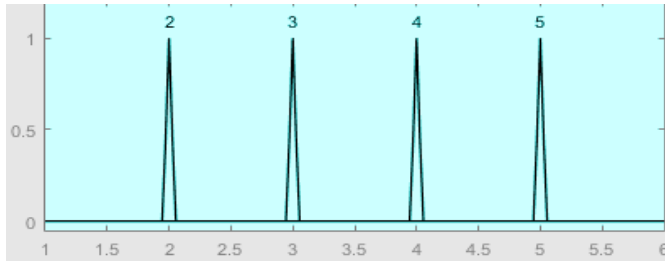
$K'_p$  و  $K'_d$  و  $\alpha$  به وسیله مجموعه قوانین فازی به دست می‌آیند. ورودی کنترل کننده خطا است، از طرفی خطا و مشتق آن متغیرهای ورودی هستند که در محدوده بین  $[-1, 1]$  در نظر گرفته شده‌اند.  $\alpha$  یک عدد فازی ثابت است که تابع عضویت آن در شکل ۸ و توابع عضویت  $K'_d$  و  $K'_p$  نیز در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶. تابع عضویت خطا و مشتق خطا.



شکل ۷. تابع عضویت  $K'_d$  و  $K'_p$ .



شکل ۸. تابع عضویت  $\alpha$ .

همان‌طور که معلوم است توابع عضویت عدد  $\alpha$ ، خطا و مشتق آن به‌صورت مثلثی و توابع عضویت  $K'_d$  و  $K'_p$  به‌صورت گوسین در نظر گرفته شده است. در توابع عضویت  $N$  برای معرفی منفی،  $P$  برای مثبت،  $S$  برای کوچک،  $M$  برای متوسط،  $B$  برای بزرگ به‌کار رفته است. برای مثال  $NB$  نشان‌دهنده خیلی منفی یا  $PM$  نشان‌دهنده مثبت متوسط است. حال با استفاده از شکل ۷ می‌توان قوانینی نوشت و  $K'_d$ ،  $K'_p$  و  $\alpha$  را تعیین کرد. در نقطه  $a$  که نقطه شروع پاسخ سیستم است برای این که زمان خیز سیستم بالا باشد و سیستم سرعت پاسخ خوبی داشته باشد به یک سیگنال کنترلی قوی نیاز است. در این نقطه، خطا بسیار مثبت و مشتق خطا تقریباً صفر (عدد منفی کوچک) است پس به بهره تناسبی بزرگ، بهره انتگرالی بزرگ و بهره مشتق‌گیر کوچک نیاز است. برای این منظور باید  $K'_p$  بزرگ،  $K'_d$  کوچک و  $\alpha$  نیز ۲ باشد. در نقطه  $b$  برای اینکه سیستم فراجهدش بیشتر نداشته باشد و زودتر به حالت پایدار برسد و ورودی را دنبال کند به سیگنال کنترلی ضعیف نیاز است، برای این منظور باید بهره تناسبی کوچک، بهره انتگرالی کوچک و بهره مشتق‌گیر بزرگ باشد در نتیجه  $K'_p$  کوچک،  $K'_d$  بزرگ و  $\alpha$  هم ۵ باشد و به همین ترتیب بقیه نقاط هم استدلال می‌شود. به سیستم بعد از رسیدن به پایداری، اغتشاش وارد شده است. برای حذف تأثیر اغتشاش دقیقاً مانند قبل استدلال می‌گردد و قوانین فازی نوشته می‌شود. در این مقاله ترسیم نوع شکل توابع عضویت و نوشتن قوانین فازی با این فرض که به سیستم اغتشاش وارد شده است، انجام شده است؛ برای مثال می‌توان گفت:

(۱) اگر خطا بسیار مثبت و مشتق خطا صفر باشد، آن‌گاه  $K'_p$  بزرگ،  $K'_d$  کوچک و  $\alpha=۲$ .

(۲) اگر خطا صفر و مشتق خطا بسیار منفی باشد، آن‌گاه  $K'_p$  کوچک،  $K'_d$  بزرگ و  $\alpha=۵$ .

مجموعه قوانین فازی که برای  $K'_d$ ،  $K'_p$  و  $\alpha$  نوشته شده است، به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. قانون فازی  $K'_d$  و  $K'_p$  [۹].

		$\Delta e(t)$									$\Delta e(t)$									
		$K'_d$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB			$K'_p$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
$e(t)$	$K'_d$	NB	S	S	S	S	S	S	S	$e(t)$	$K'_p$	NB	B	B	B	B	B	B	B	
		NM	B	B	S	S	S	B	B			NM	S	B	B	B	B	B	S	
		NS	B	B	B	S	B	B	B			NS	S	S	B	B	B	S	S	
		ZO	B	B	B	B	B	B	B			ZO	S	S	S	B	S	S	S	
		PS	B	B	B	S	B	B	B			PS	S	S	B	B	B	S	S	
		PM	B	B	S	S	S	B	B			PM	S	B	B	B	B	B	B	S
		PB	S	S	S	S	S	S	S			PB	B	B	B	B	B	B	B	B

جدول ۲. قانون فازی  $\alpha$  [۹].

$\alpha$	$\Delta e(t)$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	
NM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	
NS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴	
ZO	۵	۴	۳	۳	۳	۴	۵	
PS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴	
PM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	
PB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	

محدوده‌های بیشینه و کمینه  $K_p$  و  $K_d$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{p \min} = 0.32K_u \tag{۵}$$

$$K_{p \max} = 0.6K_u \tag{۶}$$

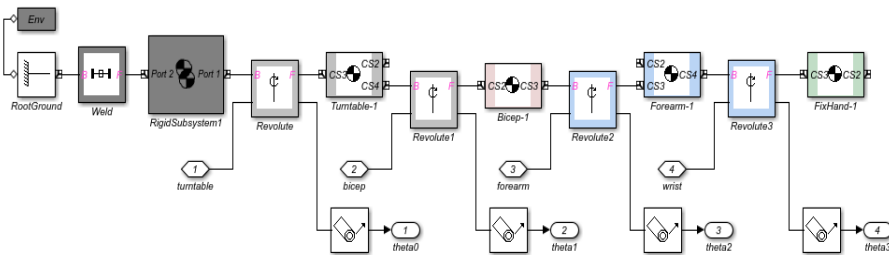
$$K_{d \min} = 0.08K_u T_u \tag{۷}$$

$$K_{d \max} = 0.15K_u T_u \tag{۸}$$

با قرار دادن  $T_u$  و  $K_u$  متناسب با هر سیستم، کنترل کننده PID فازی طراحی می‌شود. در بخش بعدی با آوردن بازوی ربات چهار درجه آزادی برای مثال عملکرد بهتر کنترل کننده PID فازی نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک نشان داده شده است.

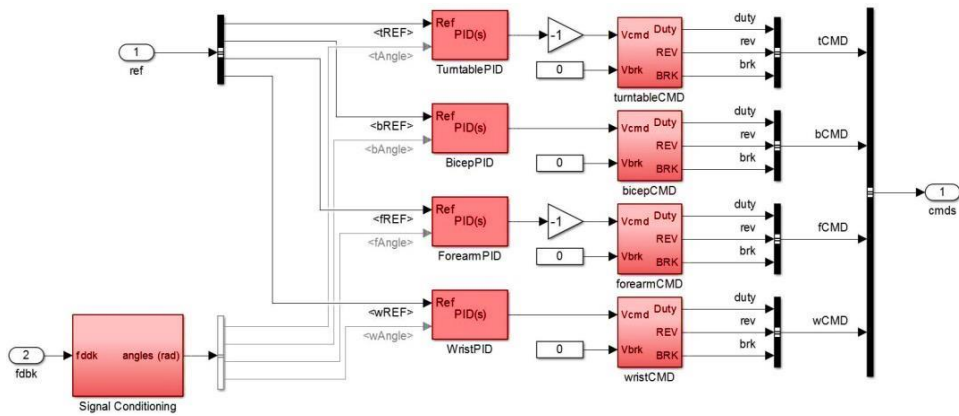
خروجی مدلینگ شبیه‌سازی شده در قسمت PID

حال به بررسی ربات چهار درجه آزادی در Sampel مکانی (اجزای ربات با توجه به حساسیت موقعیت مکانی بر حسب زمانی یک صدم ثانیه) پرداخته شده است. شکل ۹ مدل بازوی چهار درجه آزادی را در شماتیک PID نشان می‌دهد.



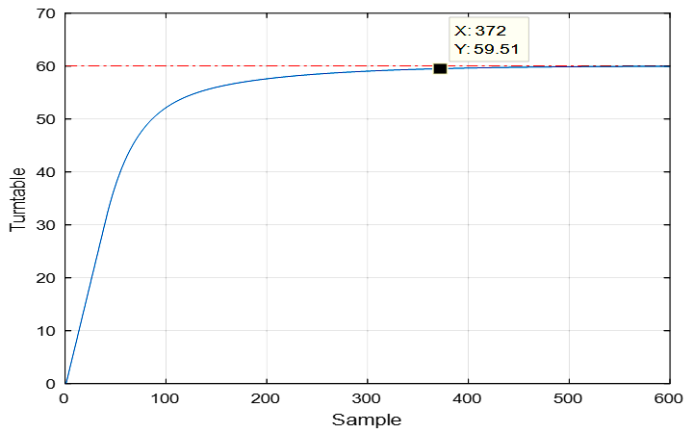
شکل ۹. مدل ساخته شده پس از افزودن حسگرها در بازوی چهار درجه آزادی در قسمت کنترل PID.

نحوه اتصال کنترل‌کننده PID نیز با توجه به الگوریتم اتصال آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. کنترل‌کننده در چهار نقطه از ربات قرار گرفته تا اندرکنش ربات را بررسی کند و آن را بهبود دهد.



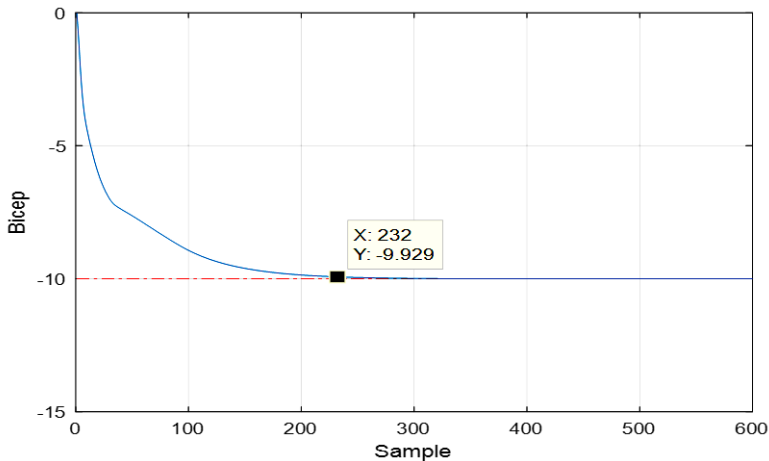
شکل ۱۰. قرار دادن کنترل‌کننده PID در چهار نقطه حساس ربات.

ابتدا نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده PID کلاسیک برای چهار درجه آزادی بررسی شده است.



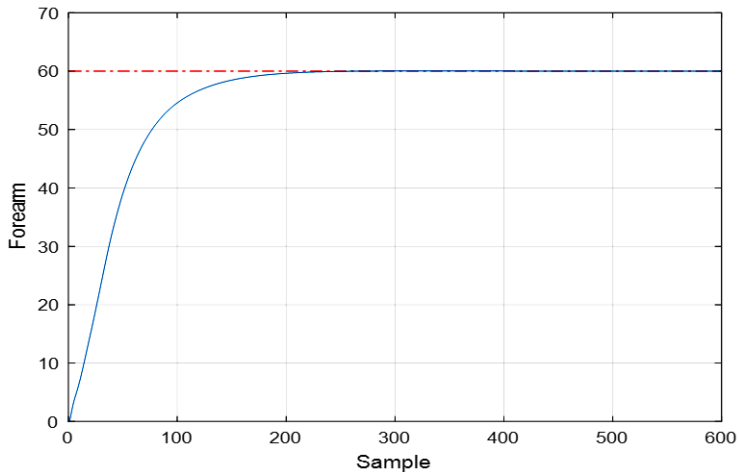
شکل ۱۱. ردیابی Turntable با کنترل‌کننده کلاسیک بر سیمپل مکانی.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود زمان نشست بالا خیلی بالا می‌باشد به طوری که با این کنترل‌کننده در نظر گرفته‌شده زمان نشست تقریباً برابر ۳.۷ ثانیه (۳۷۲ سیمپل) می‌باشد. همان‌طور که متوجه می‌شویم ردیابی سیستم با این کنترل‌کننده کند می‌باشد و خطای حالت ماندگار با گذشت زمان زیادی صفر می‌شود، در حالت کلی این کنترل‌کننده عملکرد بهتری ندارد. حال به نتیجه شبیه‌سازی برای Bicep می‌پردازیم:



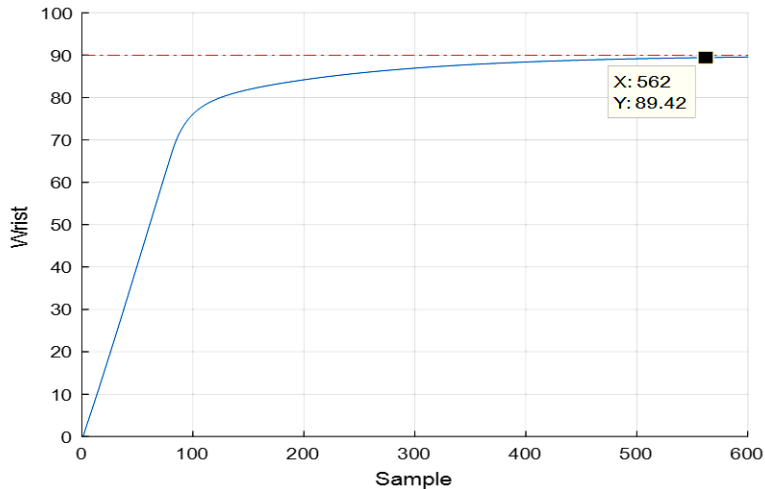
شکل ۱۲. ردیابی Bicep با کنترل کننده PID کلاسیک بر سمپل مکانی.

با توجه به شکل ۱۲ زمان نشست سیستم تقریباً برابر ۲.۳ ثانیه می باشد و باز هم سیستم موردنظر کند می باشد. نتیجه شبیه سازی برای Forearm هم به صورت زیر است:



شکل ۱۳. ردیابی Forearm با استفاده از کنترل کننده PID کلاسیک بر سمپل مکانی.

همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است نتیجه ردیابی برای این بازو نسبت به بازوهای قبل بهتر است ولی باز هم زمان نشست سیستم زیاد است و در کل عملکرد بهتری ندارد. همچنین در این حالت سیستم فراجش ندارد و خطای حالت ماندگار سیستم تقریباً بعد از گذشت ۳ ثانیه برابر صفر می باشد. نتیجه شبیه سازی بازوی دیگر با کنترل کننده مذکور به صورت زیر است:

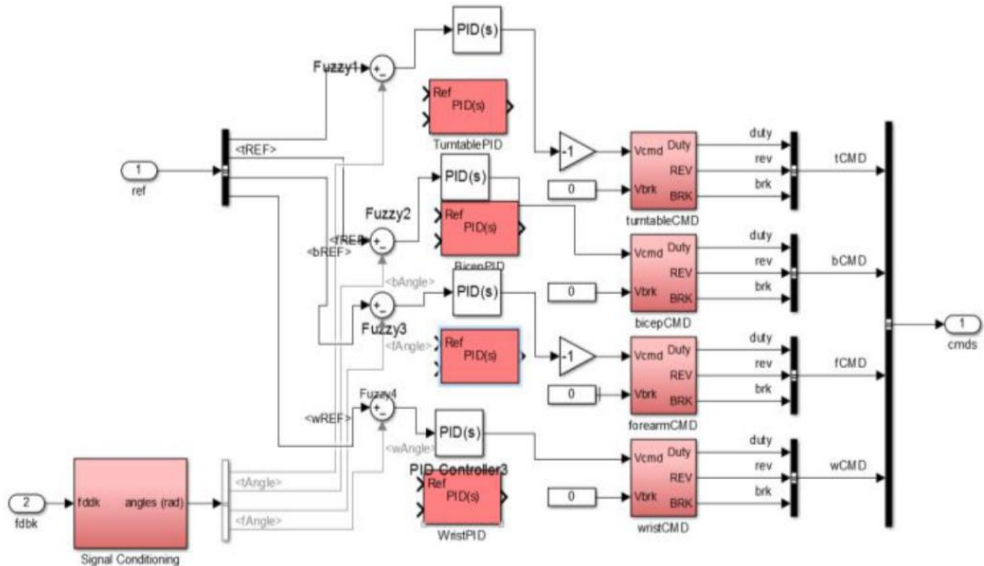


شکل ۱۴. ردیابی Wrist با کنترل‌کننده PID کلاسیک بر سَمپل مکانی.

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده می‌شود ردیابی این سیستم هم دارای خطای حالت ماندگار می‌باشد، هم‌چنین زمان نشست این سیستم بسیار بالا است و تقریباً زمان نشست برابر ۵.۶ ثانیه می‌باشد. با توجه به شکل‌های بالا این نتیجه دریافت می‌شود که کنترل‌کننده PID در نظر گرفته شده برای این سیستم عملکرد مطلوبی ندارد و خروجی‌ها دارای زمان نشست بالا می‌باشد و خطای حالت ماندگار، صفر نمی‌شود یا زمان زیادی طول می‌کشد تا خطای حالت ماندگار صفر شود.

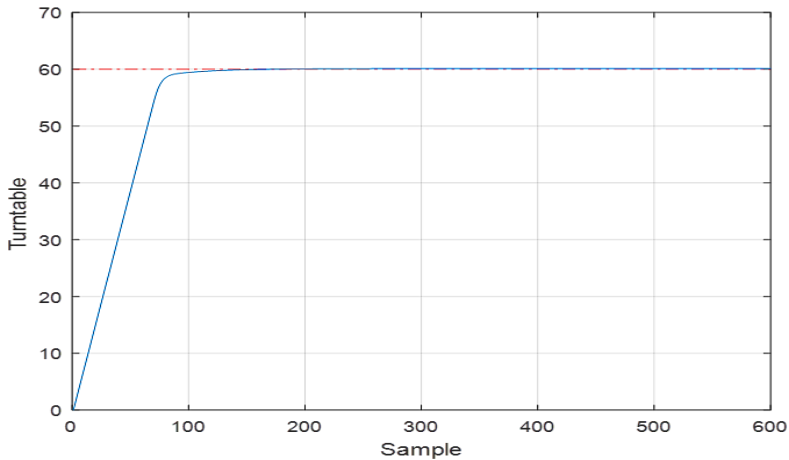
#### خروجی مدلینگ شبیه‌سازی شده در قسمت Fuzzy

حال به بررسی ربات چهار درجه آزادی در Sempel مکانی (اجزای ربات با توجه به حساسیت موقعیت مکانی برحسب زمانی یک‌صدم ثانیه) پرداخته شده است. شکل ۱۵ مدل بازوی چهار درجه آزادی را در شماتیک فازی نشان می‌دهد.



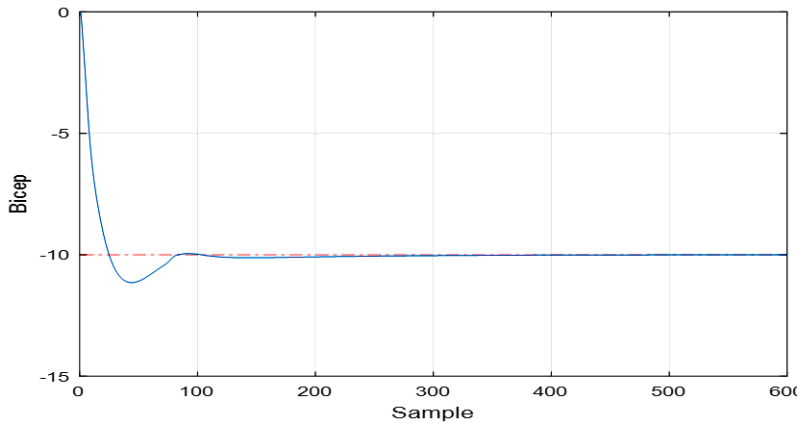
شکل ۱۵. قرار دادن کنترل کننده Fuzzy در چهار نقطه حساس ربات.

در ادامه به ارزیابی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از کنترل کننده فازی پرداخته شده است.



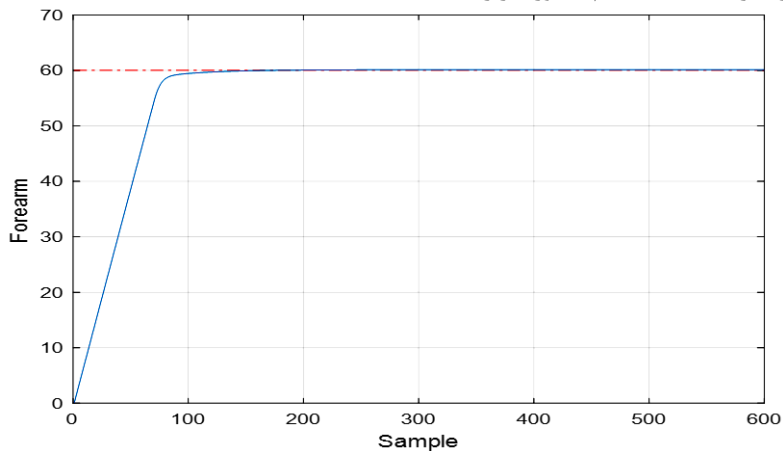
شکل ۱۶. ردیابی Turntable با کنترل کننده فازی بر سیمپل مکانی.

با توجه به شکل ۱۶ زمان نشست سیستم کم است و تقریباً برابر یک ثانیه می‌باشد که در مقایسه با کنترل کننده کلاسیک سریع‌تر است و خطای حالت ماندگار نیز برابر صفر می‌باشد. همچنین سیستم اورشوت ندارد. حال به نتیجه شبیه‌سازی درجه آزادی Bicep با کنترل کننده فازی می‌پردازیم:



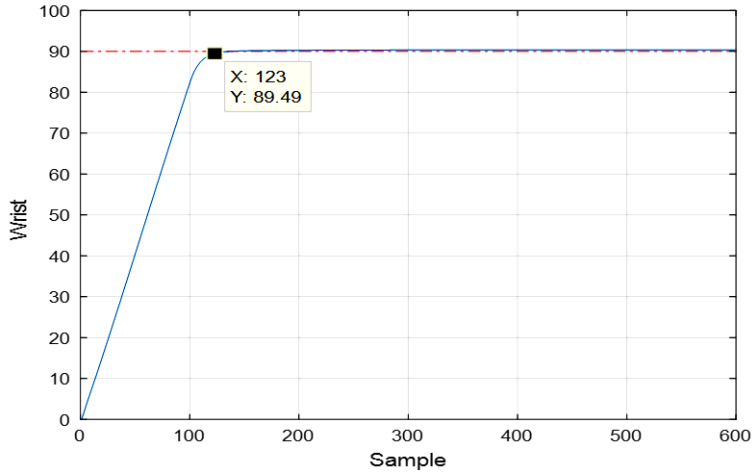
شکل ۱۷. ردیابی Bicep با کنترل‌کننده فازی بر سمپل مکانی.

شکل ۱۷ ردیابی Bicep با کنترل‌کننده فازی بر سمپل مکانی را نشان می‌دهد. در این حالت سیستم بسیار کم آندرشوت دارد ولی زمان نشست آن نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک کمتر است و عملکرد سیستم سریع‌تر می‌باشد. نتیجه شبیه‌سازی برای Forearm هم به صورت زیر است:



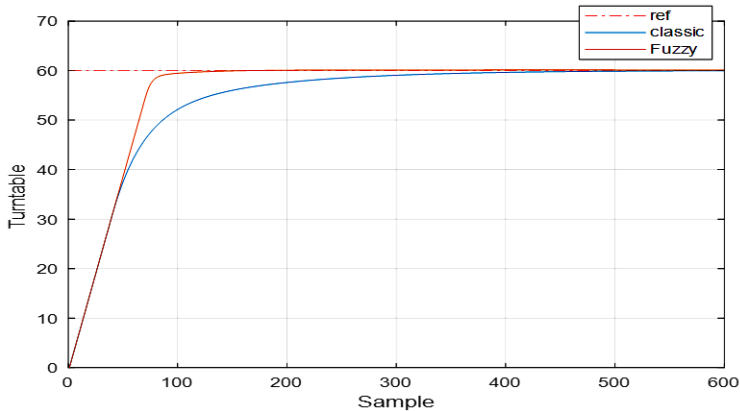
شکل ۱۸. ردیابی Forearm با استفاده از کنترل‌کننده فازی بر سمپل مکانی.

همان‌طور که پیشتر نیز توضیح داده شد برای شکل ۱۸ سیستم اورشوت ندارد و زمان نشست کمتر از حالت قبل می‌باشد و خروجی خیلی سریع به حالت ماندگار رسیده است؛ در نتیجه کنترل‌کننده فازی برای این بازو هم نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک متناظر بهتر جواب می‌دهد و عملکرد مطلوبی دارد و همچنین برای آخرین بازو نتیجه شبیه‌سازی به صورت زیر است:

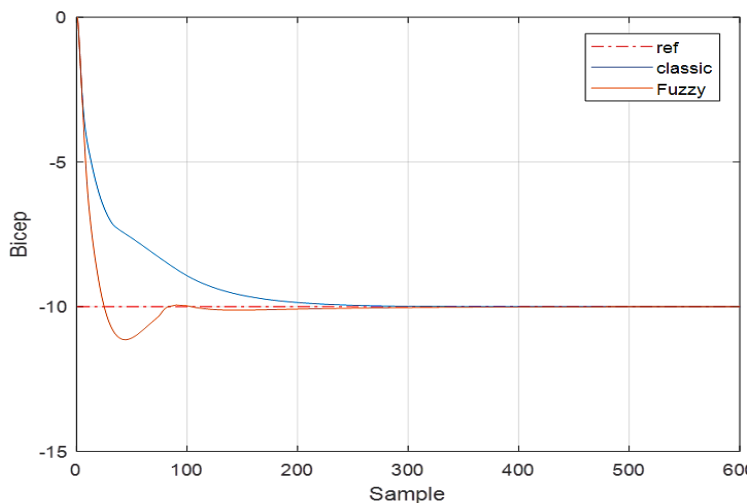


شکل ۱۹. ردیابی Wrist با کنترل کننده فازی بر سمپل مکانی.

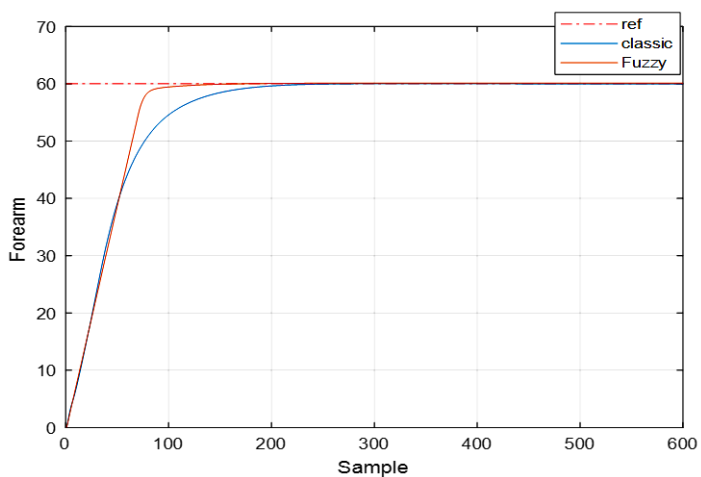
شکل ۱۹ ردیابی Wrist با کنترل کننده فازی بر سمپل مکانی را نشان می‌دهد. در این خروجی، تفاوت بسیار زیادی بین کنترل کننده فازی و کلاسیک دیده می‌شود؛ به طوری که در کنترل کننده کلاسیک زمان نشست بسیار بالا می‌باشد در صورتی که در کنترل کننده فازی، زمان نشست تقریباً برابر ۱.۲۳ ثانیه بوده و سیستم خیلی سریع عمل کرده و همچنین خروجی بسیار سریع به حالت ماندگار رسیده است. در نتیجه همه این نتایج نشان دهنده عملکرد مطلوب کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده کلاسیک می‌باشد. برای بهتر دیده شدن تفاوت بین کنترل کننده کلاسیک و فازی خروجی‌های متناظر دو کنترل کننده در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ نشان داده شده است.



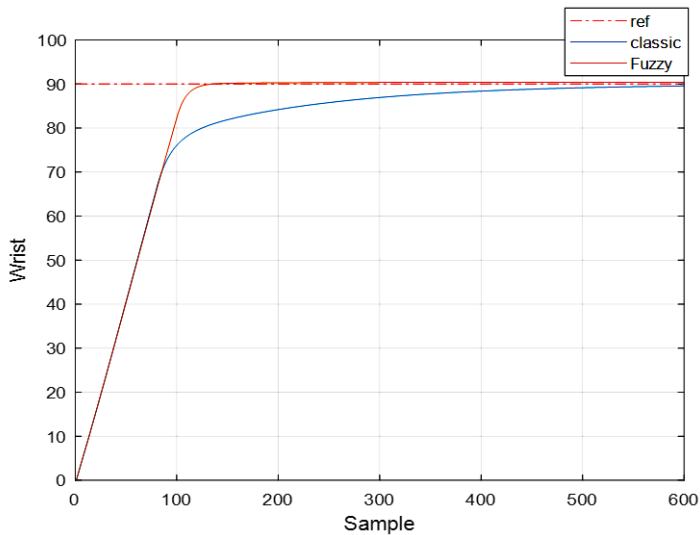
شکل ۲۰. ردیابی Turntable با کنترل کننده کلاسیک و فازی بر سمپل مکانی.



شکل ۲۱. ردیابی Bicep با کنترل‌کننده کلاسیک و فازی بر سمپل مکانی.



شکل ۲۲. ردیابی Forearm با استفاده از کنترل‌کننده کلاسیک و فازی بر سمپل مکانی.



شکل ۲۳. ردیابی Wrist با کنترل کننده کلاسیک و فازی بر سمپل مکانی.

در تمام این شبیه‌سازی‌ها تفاوت بین کنترل کننده کلاسیک و فازی به خوبی آشکار است و در همه این خروجی‌ها کنترل کننده فازی عملکرد مطلوبی نسبت به کلاسیک دارد. که این طور هم انتظار می‌رفت.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌سازی بازوی مکانیکی دانش‌بنیان بالابر باسکول‌دار با رویکرد شبیه‌سازی و استنتاج فازی مطالعه شد. براساس نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد که روش PID کلاسیک نسبت به فازی دارای خطای ماندگار می‌باشد و از دقت مناسبی برخوردار نیست. استفاده از الگوریتم فازی می‌تواند تحولی در شبیه‌سازی سیستم‌های مکانیکی و به‌خصوص رباتیکی به‌وجود آورد. تحلیل‌های سینماتیک مستقیم، دینامیک مستقیم و دینامیک معکوس به‌عنوان نمونه‌ای از تحلیل‌های ممکن انجام شد. امکان خطی‌سازی و به‌دست‌آوردن نقاط تعادل از دیگر ابزارهای این الگوریتم می‌باشد که در طراحی سیستم‌های کنترل کننده می‌تواند کارساز باشد. خروجی‌های نشان داده شده و برگرفته از سیستم مبین عملکرد رضایت‌بخش کنترل کننده فازی طراحی شده است که توانسته با درصد بالادستی و زمان نشست مطلوب (۱.۲۳ ثانیه) به کنترل بازوهای این ربات بپردازد. همچنین به‌منظور آزمون عملکرد ربات بالابر باسکول‌دار، گره‌های حرکت بازو را نیز به‌صورت مطلوب قرار دهد و سیستم موردکنترل نشان از دقت فوق‌العاده کنترل کننده فازی به‌طوری که بعد از گذشت ۱.۲۳ ثانیه در نقطه بحرانی یعنی میچ دست ناحیه wrist می‌تواند با نشستی مطلوب با خطای ماندگار صفر و بدون هیچ به‌هم‌خوردگی تداوم پیدا کند.

### References

- [1] Taghi Rad, H. (2017). *Introduction to automation and industrial control processes* (3 ed.). Khajeh Nasir al-Din Tusi University of Technology. [https://press.kntu.ac.ir/book\\_388123.html](https://press.kntu.ac.ir/book_388123.html)
- [2] Nemati, A., & Bakhshizadeh, Y. (2017, May 5). *Improving robot arm performance using fuzzy logic controller and comparing it with PID controller*. Third National Conference

- on New Approaches in Computer and Electrical Engineering, Rudsar, Iran. <https://civilica.com/doc/657955/>
- [3] Azgoli, S., Moradian Lotfi A., & Taghi Rad, H. (2006, May 15). *Design and implementation of controller for detailed elastic robot with fuzzy observer ring to solve problems caused by operator saturation*. 14th Annual Conference of Mechanical Engineering, Esfahan, Iran. <https://civilica.com/doc/27789/>
- [4] Ogata, K. (2012). *Digital control systems (two volumes)* (7 ed.). University of Tehran [https://press.ut.ac.ir/book\\_268.html](https://press.ut.ac.ir/book_268.html)
- [5] Soltanpour, M. R. (2012). Variable Structure Tracking Control of Robot Manipulator in Task Space in the Presences of Structure and Unstructured Uncertainties in Dynamics and Kinematics. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 1(1), 81-88. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2012.29>
- [6] Ebrahimi, Z., & Chatraei, A., & Shah Nazari, O., & Pour Rahim, M. (2017, September 14). *Design and practical implementation of intelligent controller for border guard robot*. 2nd International Conference on Electrical Engineering, Qarchak, Iran. <https://civilica.com/doc/698674/>
- [7] Abedi, A., & Sakhavati, A. (2014, April 22). *PID-ICA controller design for robot arm drive motor*. The 22nd Annual International Conference on Mechanical Engineering, Ahvaz, Iran. <https://civilica.com/doc/277346/>
- [8] Khoury, G. M., Saad, M., Kanaan, H. Y., & Asmar, C. (2004). Fuzzy PID Control of a Five DOF Robot Arm. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 40(3), 299-320. <https://doi.org/10.1023/B:JINT.0000038947.97195.22>
- [9] Alassar, A. Z., Abuhadrous, I. M., & Elaydi, H. A. (2010, February 26-28). *Modeling and control of 5 DOF robot arm using supervisory control*. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore <https://doi.org/10.1109/ICC AE.2010.5451398>
- [10] Talebi, N. (2017, July 5). *Design of a robust controller for tracking the position in robots*. National Conference on New Research in Electrical, Computer and Medical Engineering, Kazerun, Iran. <https://civilica.com/doc/658153/>
- [11] Rahimi, A., & Rezaei, S., & Parviziyan, J. (2017, May 24). *Scara robot design 4 degrees of freedom of flexible assembly unit*. The first national congress on the use of materials and advanced manufacturing in industries Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/673941/>
- [12] Davari, M., & Soheili Najafabadi, F. (2016, May 4). *Using fuzzy logic to mathematically infer angles and effective point positions in robotic arm joints*. The Second National Conference on New Approaches in Computer and Electrical Engineering, Rudsar, Iran. <https://civilica.com/doc/522666/>
- [13] Basu, R., & Padage, S. (2017). Development of 5 DOF Robot Arm -Gripper for sorting and investigating RTM Concepts. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1634-1643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.002>
- [14] Sabri, M. (2017). Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(2), 33-55. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_100504\\_13ffdcdd667a867abcbf8d00c439c081.pdf](https://karafan.tvu.ac.ir/article_100504_13ffdcdd667a867abcbf8d00c439c081.pdf)
- [15] Masoumnezhad, M., Kazemi, M., Askari, N., Taheri, M. H., & Ghamati, M. (2021). Semi-Analytical Solution of Unsteady Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer between two Oscillation Plate under the Influence of a Magnetic Field. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(1), 35-62. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.131037>

- [16] Olmedo, N. A., Barczyk, M., Zhang, H., Wilson, W., & Lipsett, M. G. (2020). A UGV-based modular robotic manipulator for soil sampling and terramechanics investigations. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(4), 364-381. <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0003>
- [17] Jafarian, S., & Shamisa, A. (2019, November 1). *Design and simulation of fuzzy slip resistant resistor controller for movable mechanical arm claw*. Third National Conference on Electrical and Computer Engineering, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1005855/>
- [18] Nejad Korki, N., & Mahmoudabadi, M. J. (2019, November 20). *Design of a fuzzy adaptive controller for a mechanical arm*. 3rd International Conference on Soft Computing, Rudsar, Iran. <https://civilica.com/doc/1005950/>
- [19] Masihabadi, S., & Akbarzadeh Kalat, A. (2019, May 29). *Implement trans-local model control on a skilled mechanical arm*. Fourth National Conference on Electrical and Computer Engineering, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/989090/>
- [20] Soto-Hidalgo, J. M., Vitiello, A., Alonso, J. M., Acampora, G., & Alcalá-Fdez, J. (2019). Design of Fuzzy Controllers for Embedded Systems With JFML. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 12(1), 204-214. <https://doi.org/10.2991/ijcis.2019.125905646>