



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا و مکانیک

پروژه مبانی طراحی کنترل‌کننده  
مهندسی کنترل

عنوان:

**کنترل وضعیت توپ و تیر**

نگارش:

علی بنی اسد و رضا رضایی

استاد راهنما:

دکتر آریا الستی

بهمن ۱۴۰۰

سلام

## فهرست مطالب

۴	۱	بخش اول
۶	۲	بخش دوم
۱۰	۳	بخش سوم
۱۸	۴	بخش چهارم
۲۶	۵	بخش پنجم
۳۰	۶	بخش ششم
۳۲	۷	نتیجه‌گیری

## فهرست شکل‌ها

۱	سیستم کنترلی . . . . .	۲
۲	پله واحد سیستم حلقه بسته در حضور کنترل‌کننده . . . . .	۳
۱-۱	خروجی پله واحد سیستم مدار بسته در حضور کنترل‌کننده PID . . . . .	۴
۲-۱	خروجی پله واحد سیستم مدار بسته در حضور کنترل‌کننده PID . . . . .	۵
۱-۲	کنترل‌کننده PI طراحی شده در برنامه PID tuner متلب . . . . .	۶
۲-۲	خروجی سیستم به ازای پله واحد با کنترل‌کننده PIDF و PI طراحی شده در برنامه PID tuner متلب . . . . .	۷
۳-۲	پیاده سازی کنترل‌کننده طراحی شده به وسیله PID tuner متلب بر روی مدل غیر خطی شبیه سازی شده . . . . .	۸
۴-۲	نمایی از انیمیشن شبیه سازی حرکت توپ با کنترل‌کننده طراحی شده به وسیله PID tuner و همراه با بلوک اشباع . . . . .	۸
۵-۲	یاده سازی کنترل‌کننده طراحی شده به وسیله PID tuner متلب بر روی مدل غیر خطی شبیه سازی شده . . . . .	۹
۱-۳	پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده ziegler nichols . . . . .	۱۱
۲-۳	پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده refined ziegler nichol . . . . .	۱۱
۳-۳	پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده modified ziegler nicholsl . . . . .	۱۲

- ۳-۴ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده Cohen Coon . . . . . ۱۲
- ۳-۵ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده Cohen Coon revisited . . ۱۳
- ۳-۶ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده Astrom Haggglund . . . . ۱۳
- ۳-۷ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده Frequency based Astrom . . . . . ۱۴
- Haggglund . . . . . ۱۴
- ۳-۸ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده CHR set point 0% . . . . . ۱۵
- overshoot . . . . . ۱۵
- ۳-۹ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده CHR set point 20% . . . . . ۱۵
- overshoot . . . . . ۱۵
- ۳-۱۰ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده WJC . . . . . ۱۶
- ۳-۱۱ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده optimum set point PID . . . . . ۱۶
- ISTE . . . . . ۱۶
- ۳-۱۲ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده optimum set point PI-D . . . . . ۱۷
- ISTE . . . . . ۱۷
- ۴-۱ بلوک دیاگرام مدار باز سیستم استفاده شده در optimpid در حالت با اشباع . . . . . ۱۸
- ۴-۲ بلوک دیاگرام مدار باز سیستم استفاده شده در optimpid در حالت بدون اشباع . . . . . ۱۹
- ۴-۳ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IAE . . . . . ۱۹
- ۴-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IAE . . . . . ۲۰
- ۴-۵ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ISE . . . . . ۲۰
- ۴-۶ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ISE . . . . . ۲۱

- ۷-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی IT2AE ..... ۲۱
- ۸-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی IT2AE ..... ۲۲
- ۹-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی IT2SE ..... ۲۲
- ۱۰-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی IT2SE ..... ۲۳
- ۱۱-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی ITAE ..... ۲۳
- ۱۲-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی ITAE ..... ۲۴
- ۱۳-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه با بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی ITAE ..... ۲۴
- ۱۴-۴ کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک  
اشباع و با روش بهینه سازی ITSE ..... ۲۵
- ۱-۵ پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده دو درجه آزادی PID طراحی شده ..... ۲۶
- ۲-۵ بلوک دیاگرام پیاده سازی کنترل‌کننده دو درجه آزادی بر روی مدل غیر خطی در دو حالت  
با / بدون بلوک اشباع ..... ۲۷
- ۳-۵ بلوک دیاگرام پیاده سازی کنترل‌کننده دو درجه آزادی بر روی مدل غیر خطی در دو حالت  
با / بدون بلوک اشباع ..... ۲۷
- ۴-۵ خروجی سیستم با کنترل‌کننده دو درجه آزادی پیاده سازی شده بر روی سیستم غیر خطی  
با بلوک اشباع ..... ۲۸
- ۵-۵ خروجی سیستم با کنترل‌کننده دو درجه آزادی پیاده سازی شده بر روی سیستم غیر خطی  
بدون بلوک اشباع ..... ۲۸

- ۱-۶ دیاگرام bode تابع تبدیل خروجی به ورودی اغتشاش به ازای کنترل‌کننده‌های طراحی  
شده به وسیله PID tuner در بخش ۲ . . . . . ۳۰
- ۲-۶ دیاگرام bode تابع تبدیل خروجی به ورودی اغتشاش به ازای کنترل‌کننده‌های طراحی  
شده به وسیله SISO tool PID در بخش ۱ . . . . . ۳۱

## مقدمه

هدف از این پروژه طراحی کنترل‌کننده برای سیستم Ball and Beam است. این وسیله از معروف‌ترین و ساده‌ترین سیستم‌های کنترل است. این سیستم شامل یک تیر بلند است که قابلیت حرکت توپ داخل آن را دارد. هدف کنترلی در این سیستم، کنترل مکان توپ دقیقاً در وسط تیر است. به این منظور یک سنسور التراسونیک برای تشخیص مکان و سرعت توپ در هر لحظه و یک سروو موتور در وسط یا اطراف تیر برای تولید حرکت دورانی در تیر و کنترل مکان توپ تعبیه شده است. شمای کلی این دستگاه در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: سیستم کنترلی

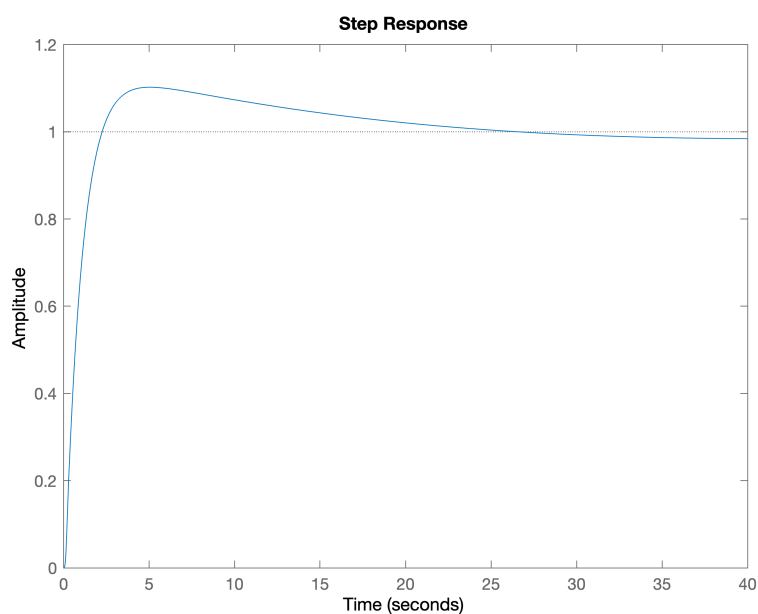
## همکاری

در پروژه جهت همکاری بین اعضای گروه از گیت هاب استفاده شد که کار را به شدت آسان کرد. در این پروژه تمامی کدها به هم اتصال دارند و با تغییر شرایط اولیه تمامی طراحی‌ها برای سیستم جدید اجرا می‌شوند.



## کنترل‌کننده پایدار ساز

در این پروژه برای پایدار سازی سیستم از کنترل‌کننده  $LQG^1$  استفاده شد. در شکل ۲ خروجی پله حلقه بسته سیستم با کنترل‌کننده پایدار ساز آورده شده است.



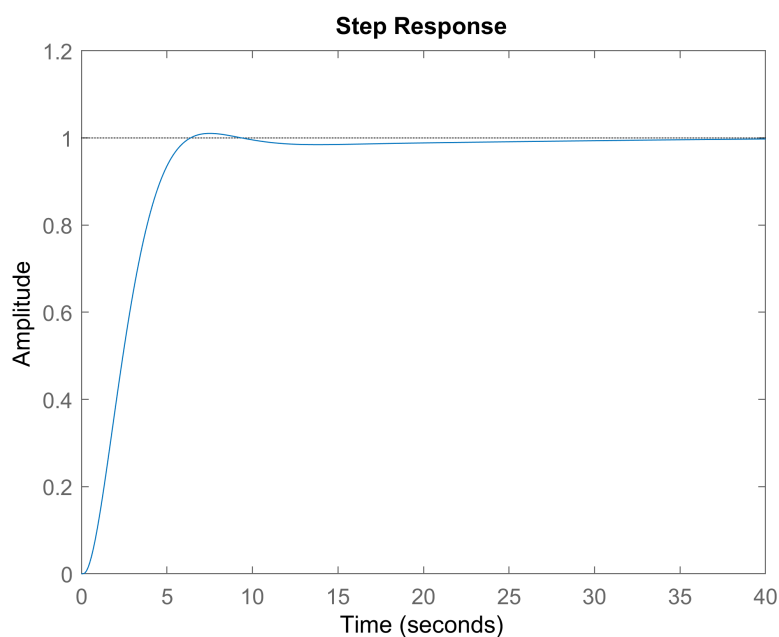
شکل ۲: پله واحد سیستم حلقه بسته در حضور کنترل‌کننده

<sup>1</sup>Linear Quadratic Gaussian

# فصل ۱

## بخش اول

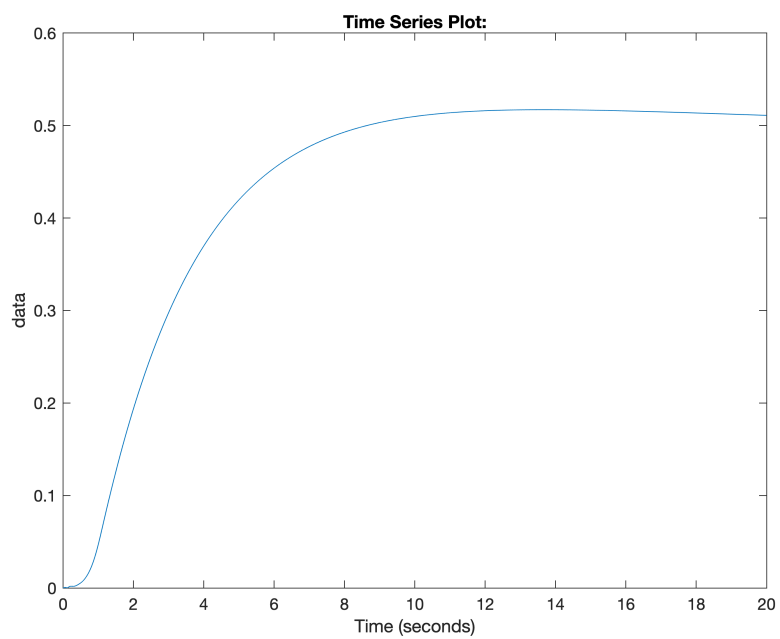
در این قسمت به کمک جعبه‌ابزار SISO یک کنترل کننده از خانواده PID برای سیستم در طراحی شد. خروجی پله واحد سیستم مدار بسته در حضور کنترل کننده PID در شکل ۱-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۱: خروجی پله واحد سیستم مدار بسته در حضور کنترل کننده PID

بعد از طراحی در محیط SISO برای سیستم خطی، کنترل کننده طراحی در محیط غیرخطی نیز آورده شد و عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد. خروجی پله نیم سیستم مدار بسته غیرخطی در حضور کنترل کننده

PID در شکل ۲-۱ آورده شده است.

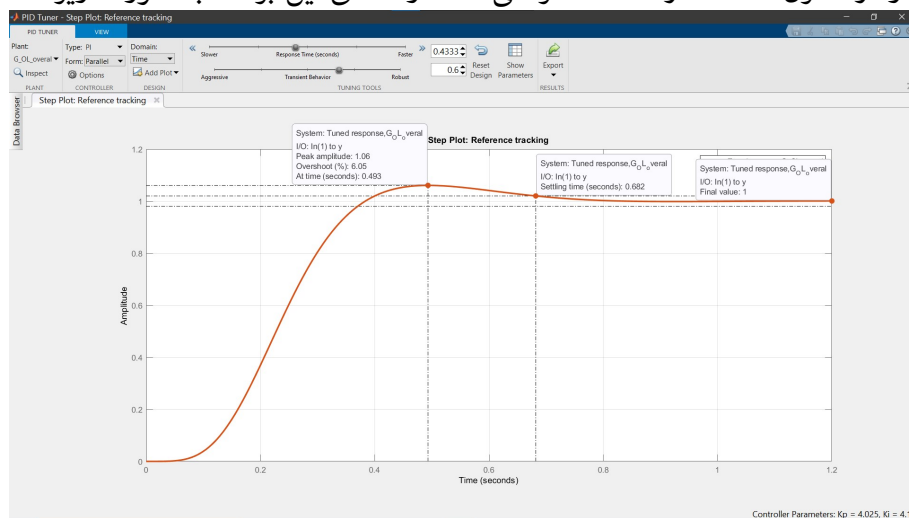


شکل ۲-۱: خروجی پله واحد سیستم مدار بسته در حضور کنترل کننده PID

## فصل ۲

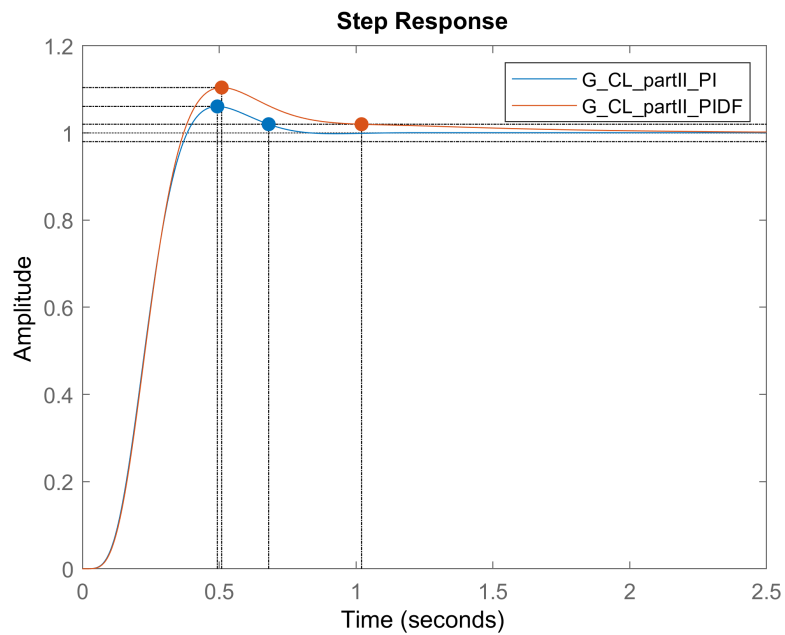
### بخش دوم

در این بخش به طراحی کنترل کننده از خانواده PID به کمک برنامه PID tuner متلب پرداخته شده است. نمایشی از دو کنترل کننده PI و PIDF طراحی شده در فضای این برنامه به صورت زیر است:



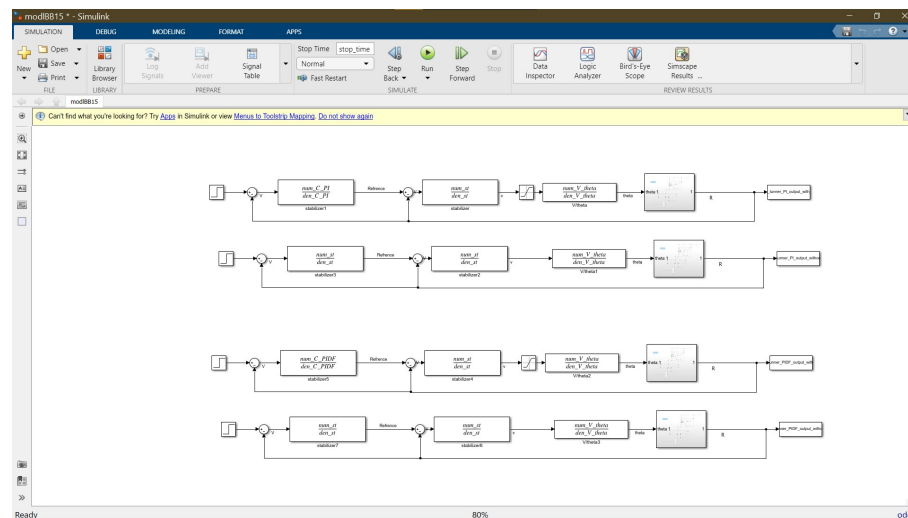
شکل ۲-۱: کنترل کننده PI طراحی شده در برنامه PID tuner متلب

پاسخ سیستم مدار بسته به ازای ورودی مرجع پله واحد با دو کنترل کننده طراحی شده در این قسمت نیز به صورت زیر است:



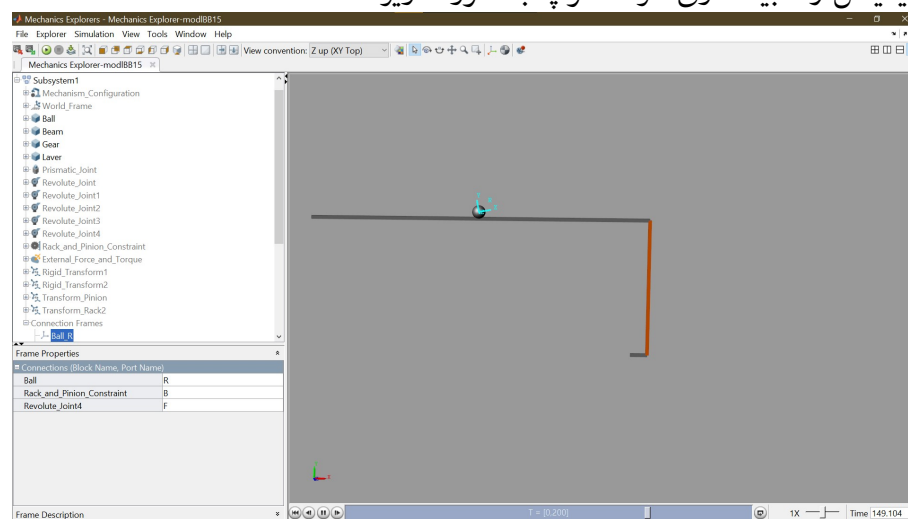
شکل ۲-۲: خروجی سیستم به ازای پله واحد با کنترل‌کننده PIDF و PI طراحی شده در برنامه PID tuner متلب

همانطور که ملاحظه می شود مقدار اورشوت و زمان نشست کمتر از مقادیر موجود در خواسته های مسئله می باشد. هم چنین با پیاده سازی کنترل‌کننده بالا در محیط سیمولینک همراه/بدون اشباع بر روی مدل غیر خطی شبیه سازی شده به صورت زیر:

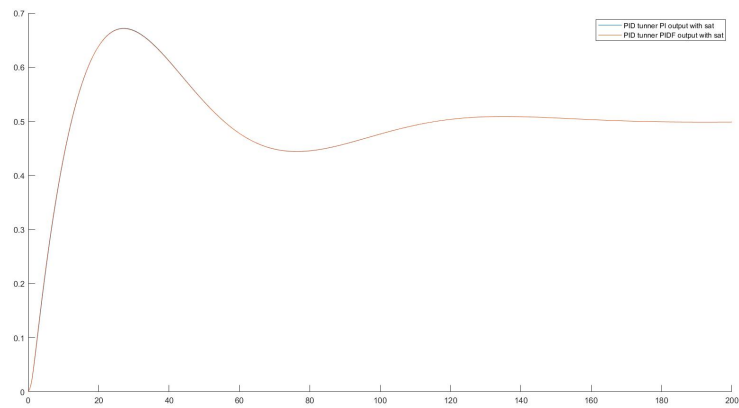


شکل ۲-۳: پیاده سازی کنترل کننده طراحی شده به وسیله PID tuner متلب بر روی مدل غیر خطی شبیه سازی شده

و پس از اجرای فایل سیمولینک برای هر کنترل کننده با اشباع، خروجی به ازای ورودی مرجع  $۵۰^{\circ}$  متر و نمایی از انیمیشن و شبیه سازی حرکت توپ به صورت زیر است:



شکل ۲-۴: نمایی از انیمیشن شبیه سازی حرکت توپ با کنترل کننده طراحی شده به وسیله PID tuner و همراه با بلوک اشباع



شکل ۲-۵: یاده سازی کنترل کننده طراحی شده به وسیله PID tuner متلب بر روی مدل غیر خطی شبیه سازی شده

همانطور که مشاهده می شود در مدل غیر خطی به دلیل اعمال بلوک اشباع عملگر، زمان نشست به حدود ۱۵۰ ثانیه و اور شوت به حدود ۳۵ درصد رسیده است.

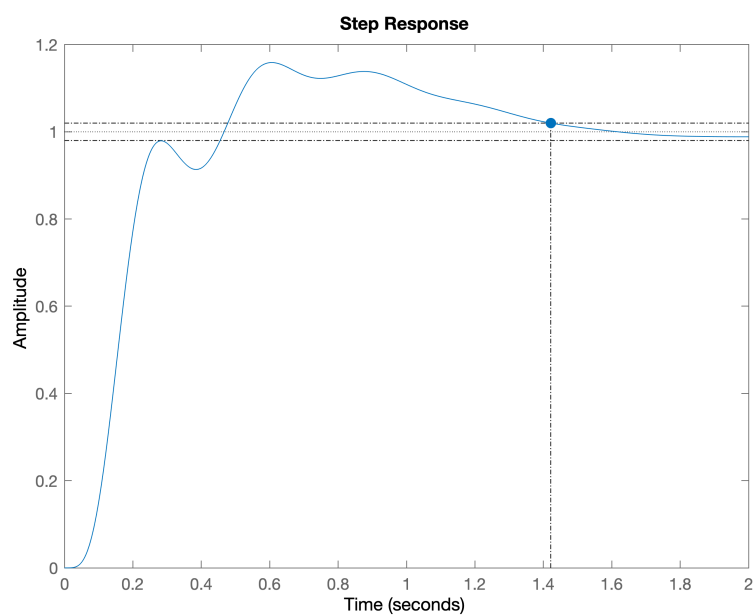
## فصل ۳

### بخش سوم

در این بخش برای سیستم بر اساس روش‌های درس داده شده کنترل‌کننده طراحی شده است که ادامه آورده شده است.

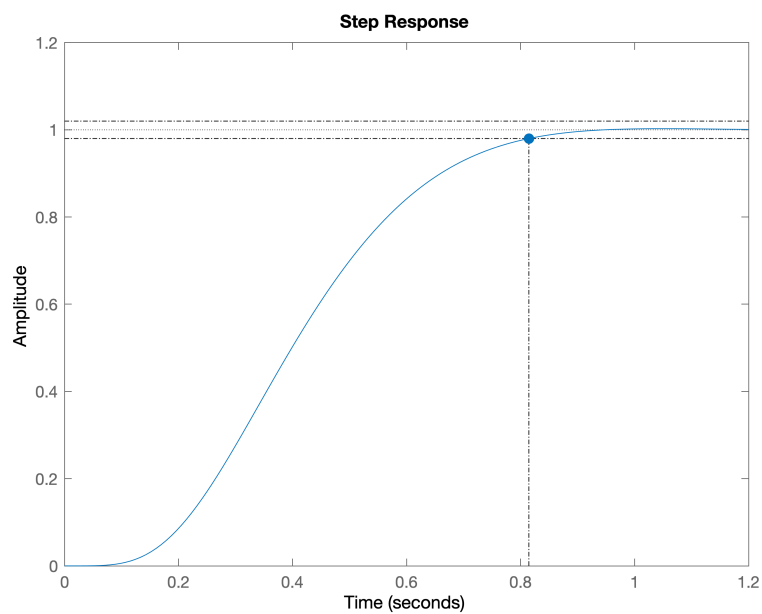


• ziegler nichols



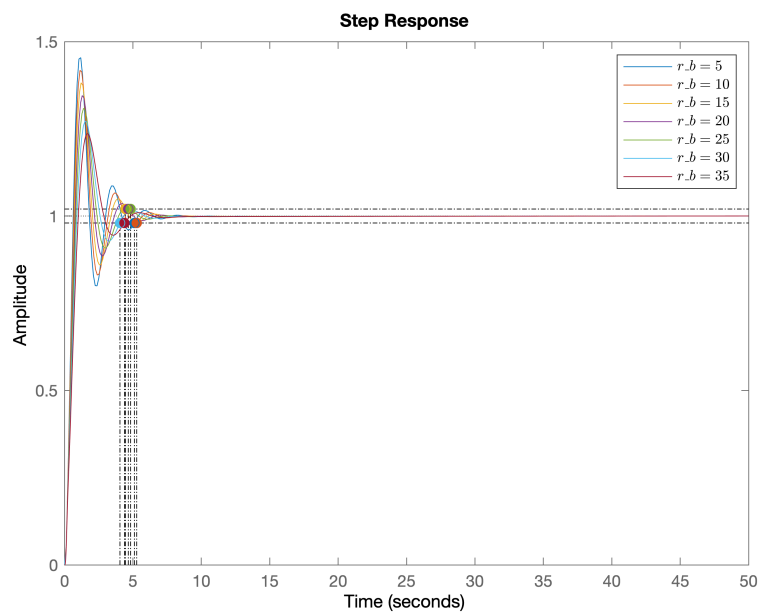
شکل ۳-۱: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده ziegler nichols

• refined ziegler nichols



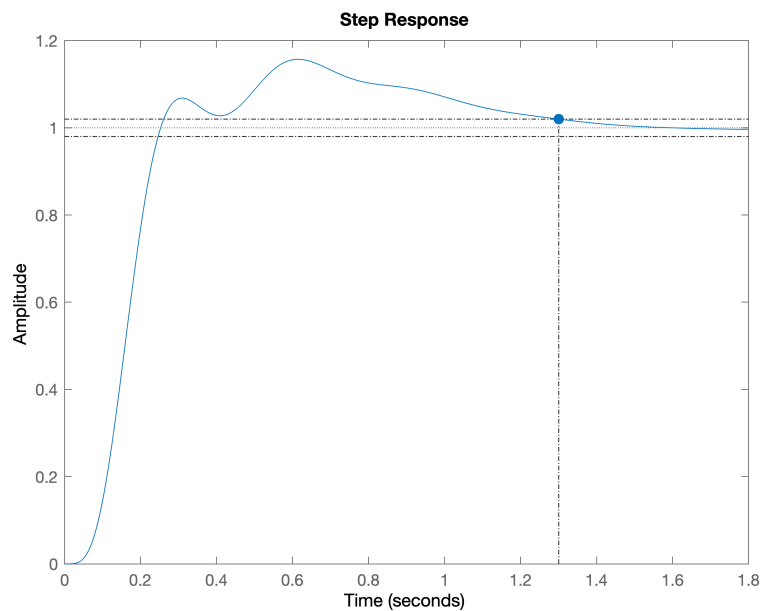
شکل ۳-۲: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده refined ziegler nichols

• modified ziegler nichols



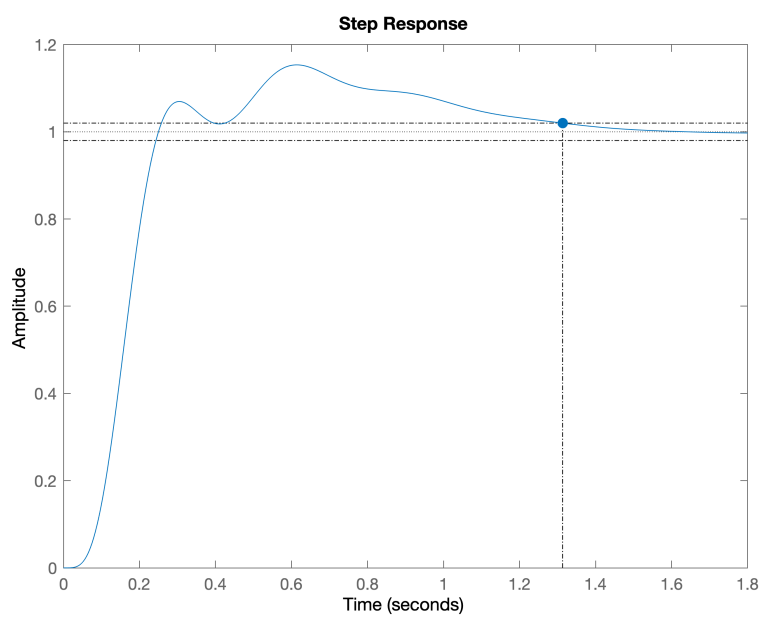
شکل ۳-۳: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده modified ziegler nichols

• Cohen Coon



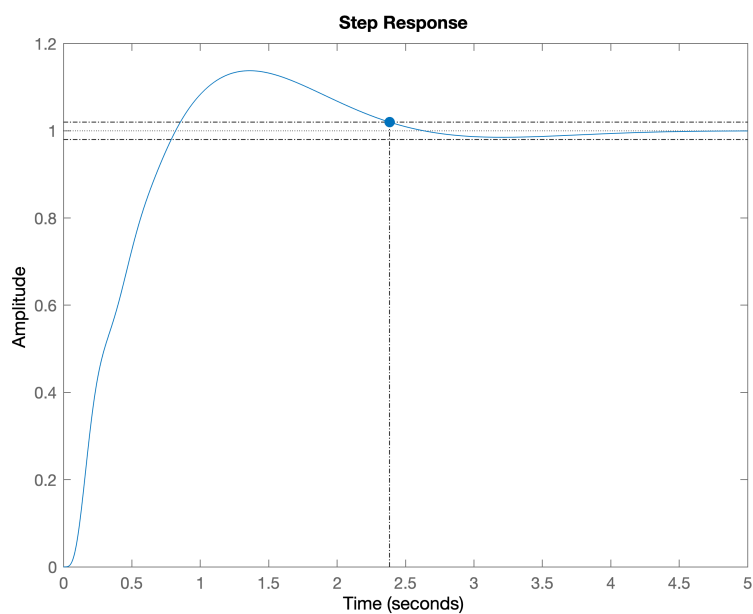
شکل ۳-۴: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده Cohen Coon

## Cohen Coon revisited •



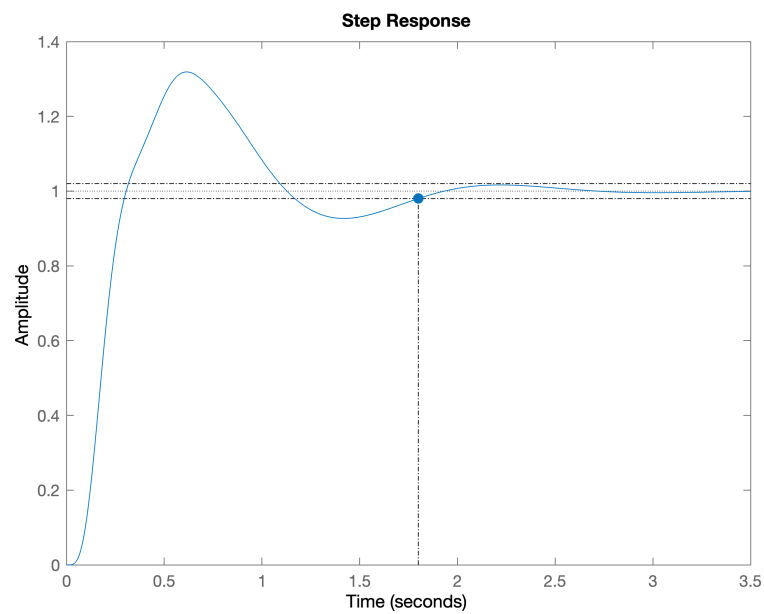
شکل ۳-۵: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده Cohen Coon revisited

## Astrom Hagglund •



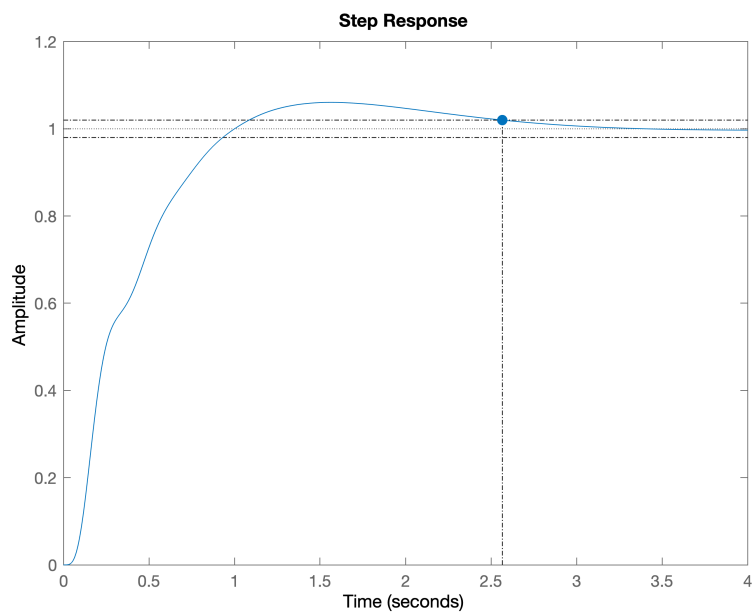
شکل ۳-۶: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده Astrom Hagglund

### ● Frequency based Astrom Hagglund



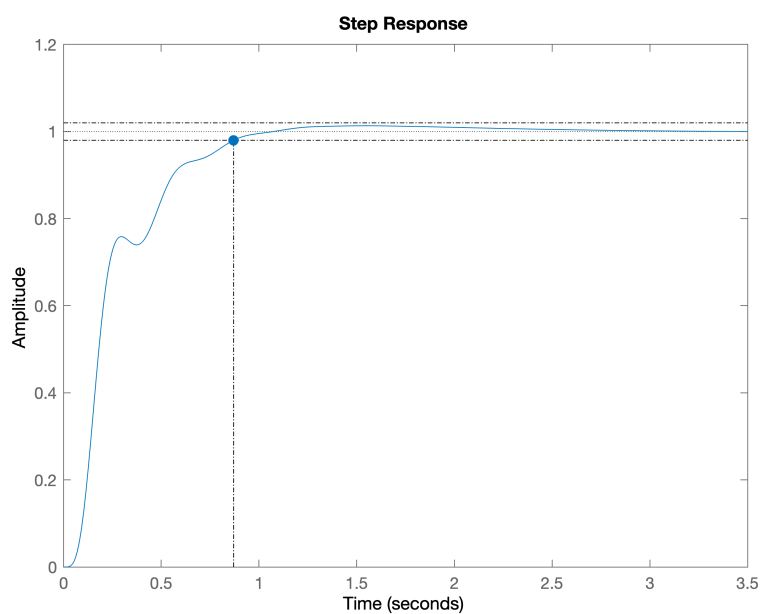
شکل ۳-۷: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده Frequency based Astrom Hagglund

● CHR set point 0% overshoot



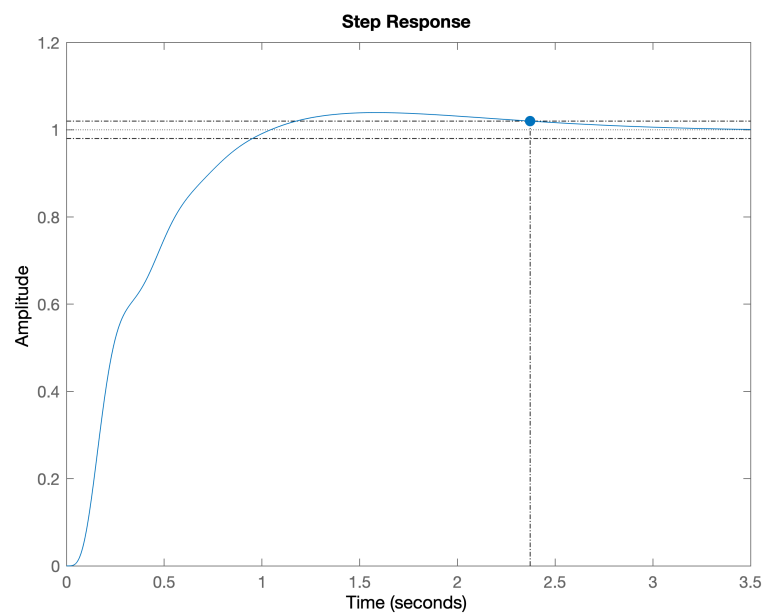
شکل ۳-۸: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده CHR set point 0% overshoot

• CHR set point 20% overshoot



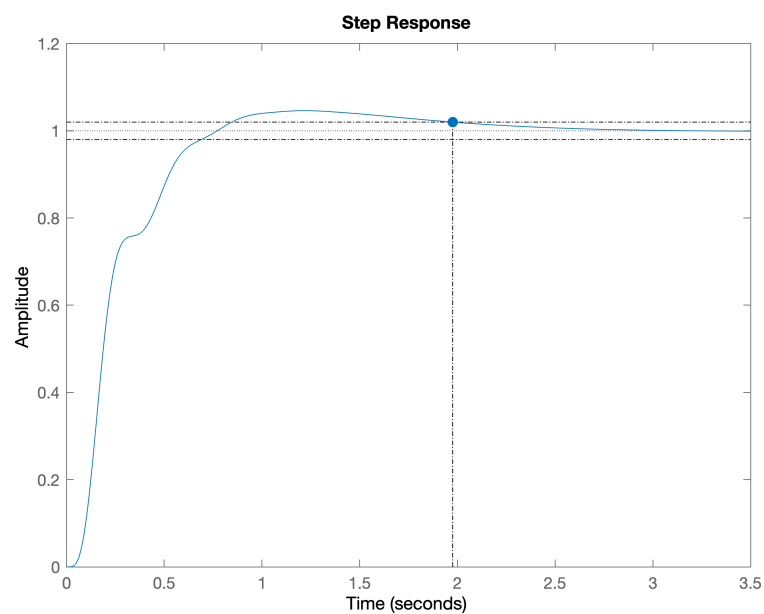
شکل ۳-۹: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده CHR set point 20% overshoot

WJC •



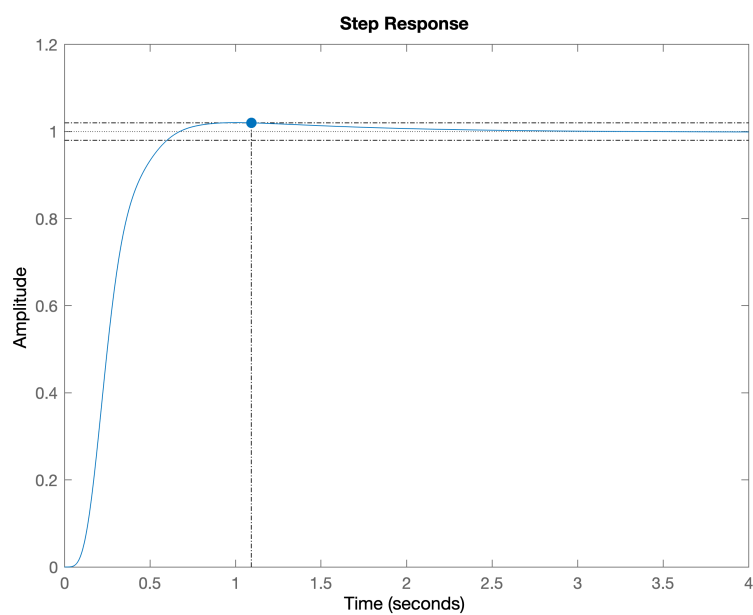
شکل ۳-۱۰: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده WJC

optimum set point PID ISTE •



شکل ۳-۱۱: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID طراحی شده optimum set point PID ISTE

● optimum set point PI-D ISTE

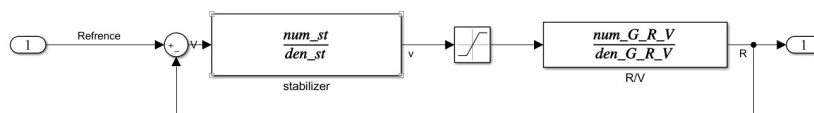


شکل ۳-۱۲: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID طراحی شده optimum set point PI-D ISTE

## فصل ۴

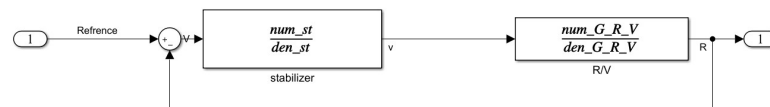
### بخش چهارم

در این بخش به طراحی کنترل‌کننده از خانواده PID به کمک برنامه optimPID متلب پرداخته شده است که در آن کنترل‌کننده PIDF به روش‌های مختلف بهینه‌سازی امتحان و طراحی شده است که برای طراحی نیز دو حالت با بلوک اشباع و بدون بلوک اشباع در نظر گرفته شده و برای هر دو حالت کنترل‌کننده طراحی شده است که شکل مدار باز سیستم مورد استفاده در این برنامه برای هر یک از حالت‌های با / بدون اشباع به صورت زیر است:

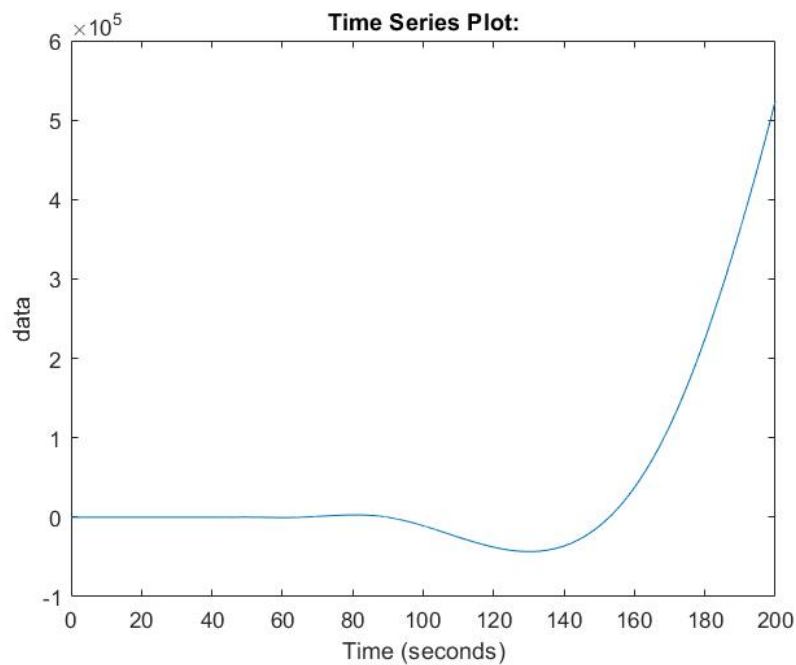


شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام مدار باز سیستم استفاده شده در optimpid در حالت با اشباع

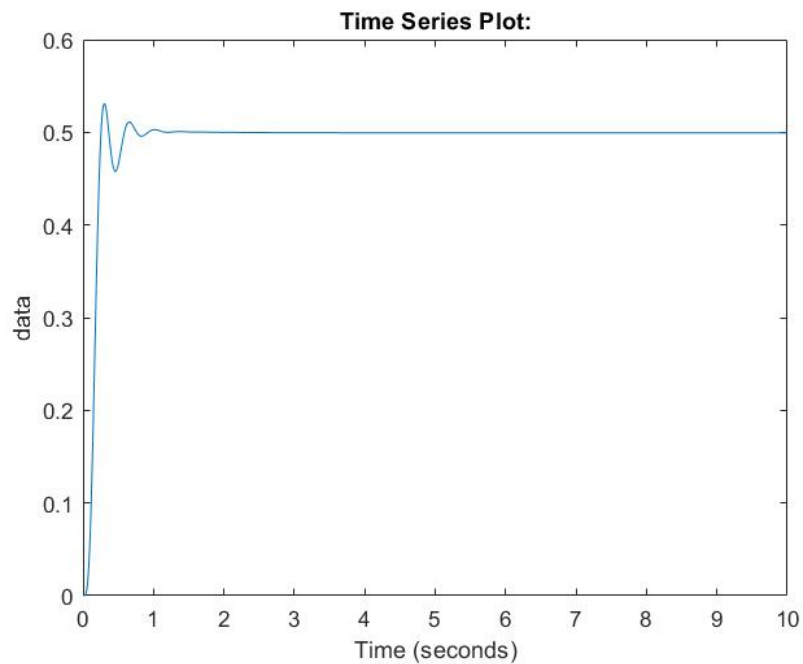




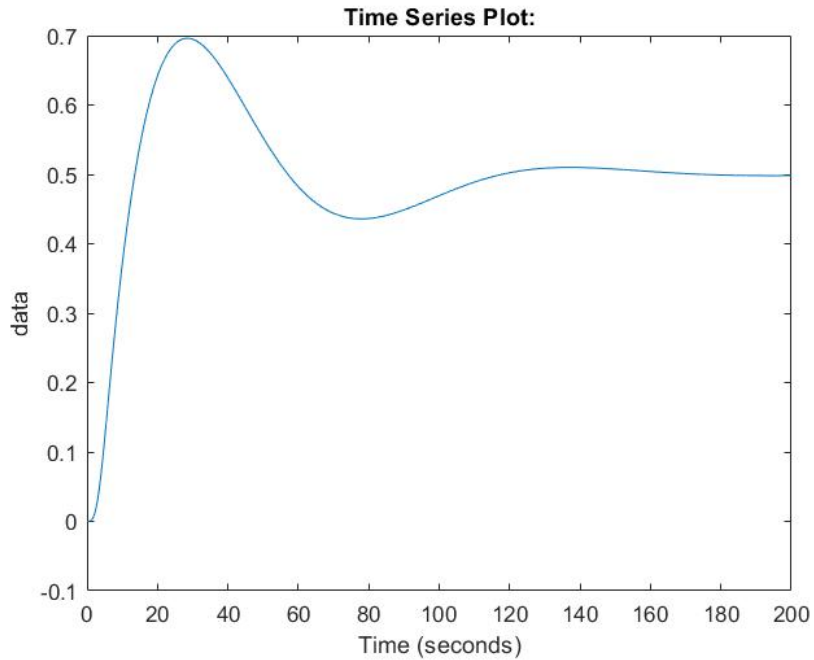
شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام مدار باز سیستم استفاده شده در `optimpid` در حالت بدون اشباع  
 نمودار مربوط به ورودی مرجع  $50^\circ$  متر برای هر کدام از کنترل‌کننده‌های طراحی شده به صورت زیر است:



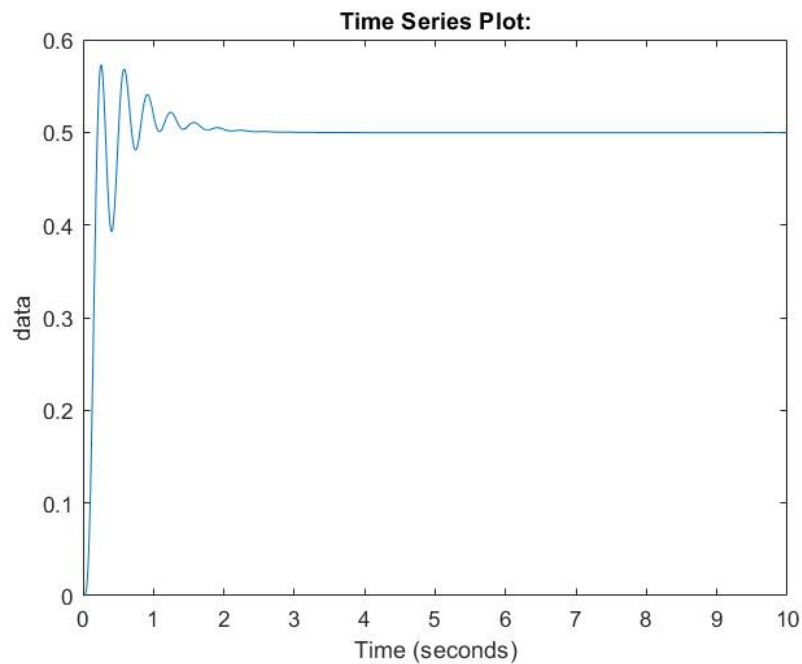
شکل ۴-۳: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IAE



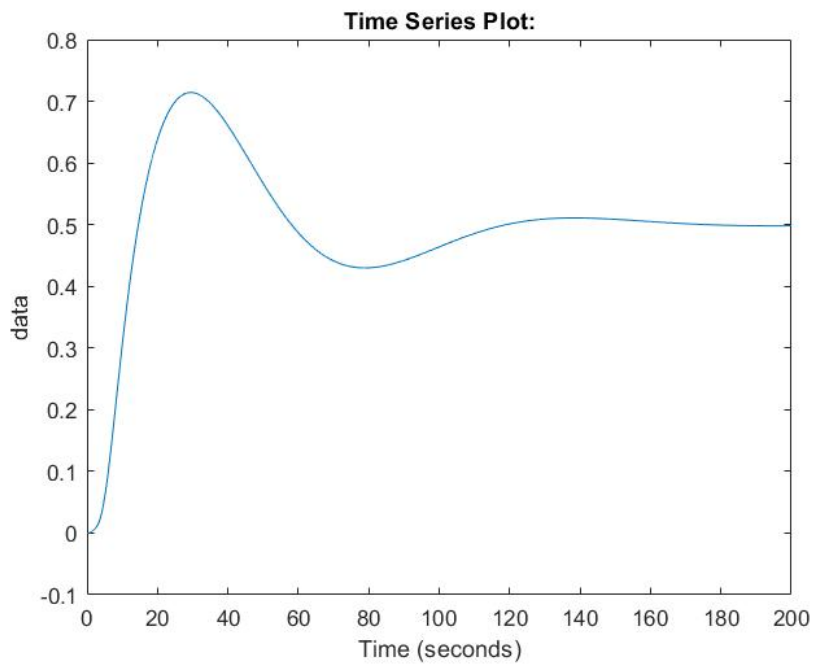
شکل ۴-۴: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IAE



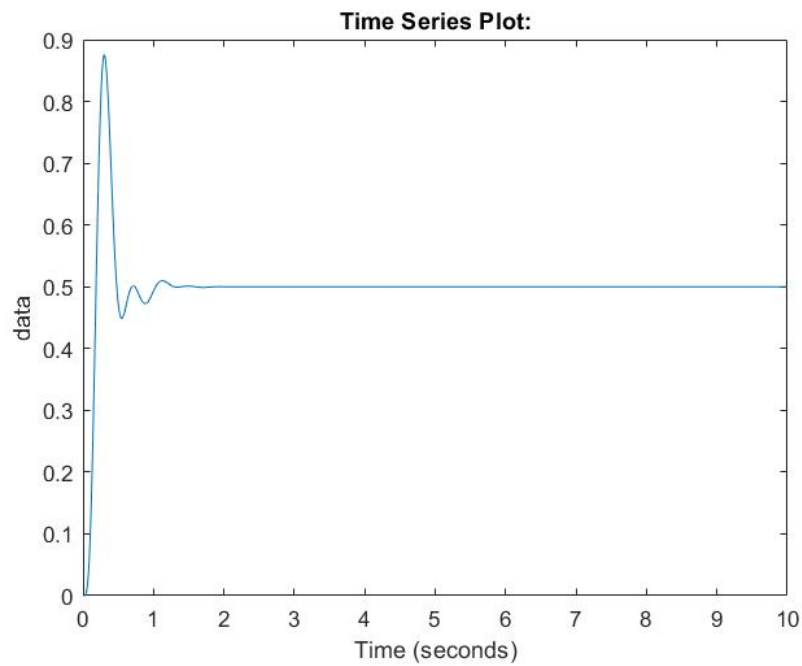
شکل ۴-۵: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ISE



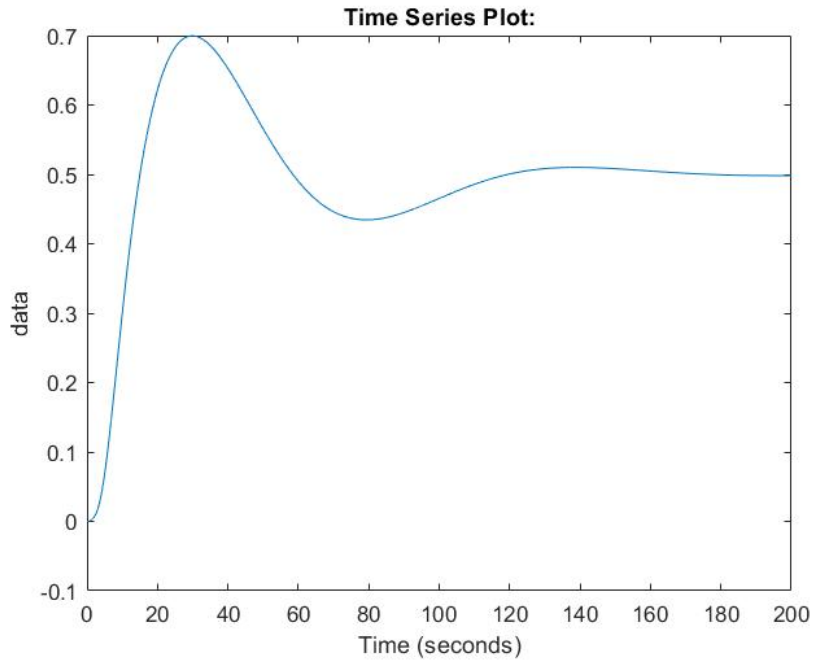
شکل ۴-۶: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ISE



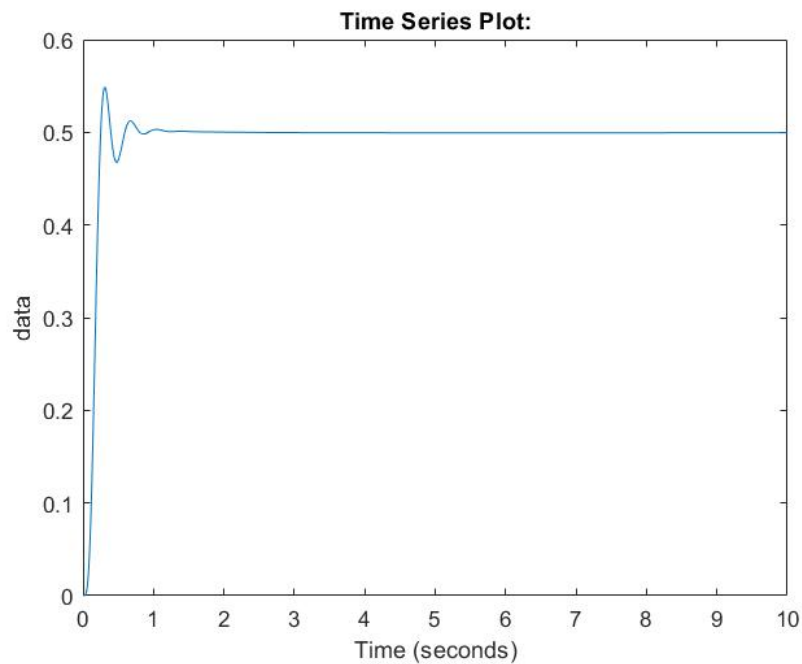
شکل ۴-۷: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IT2AE



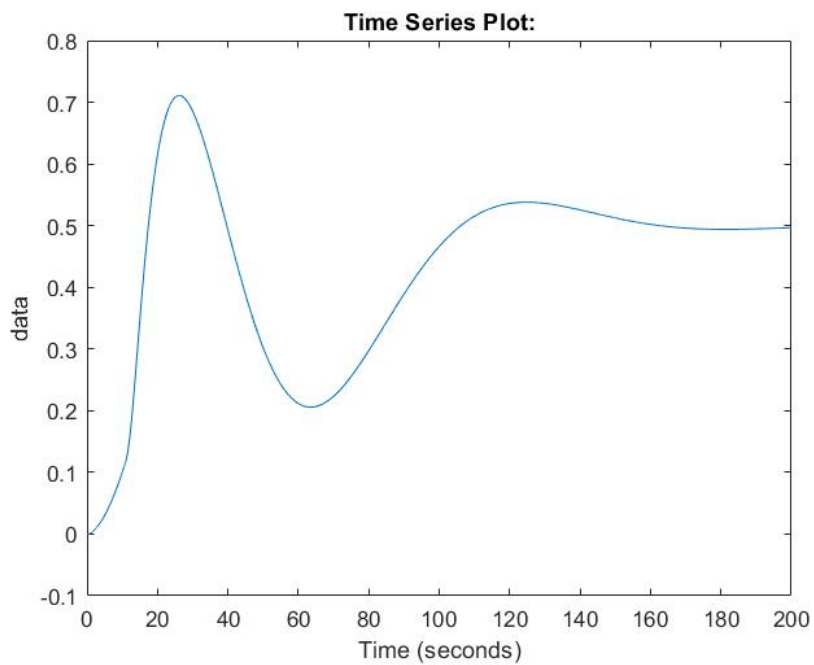
شکل ۴-۸: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IT2AE



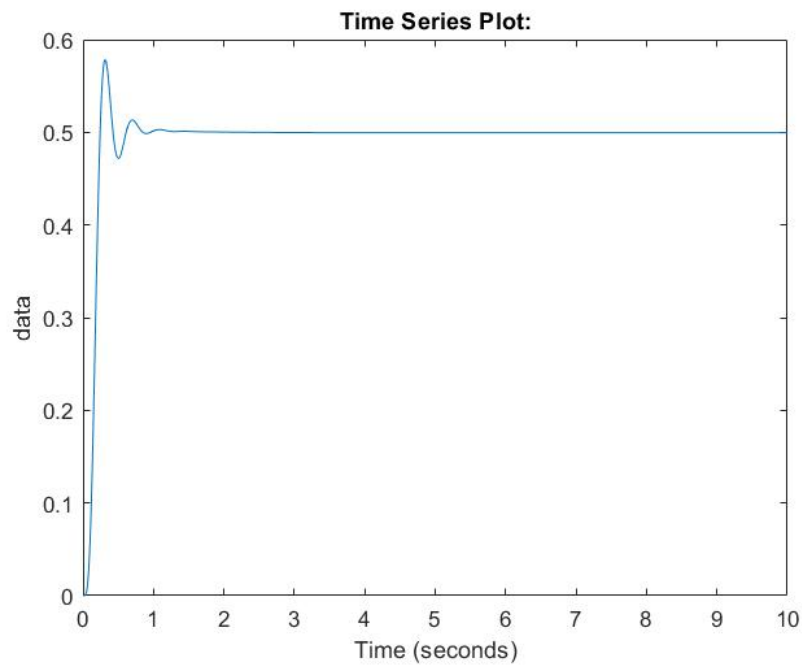
شکل ۴-۹: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IT2SE



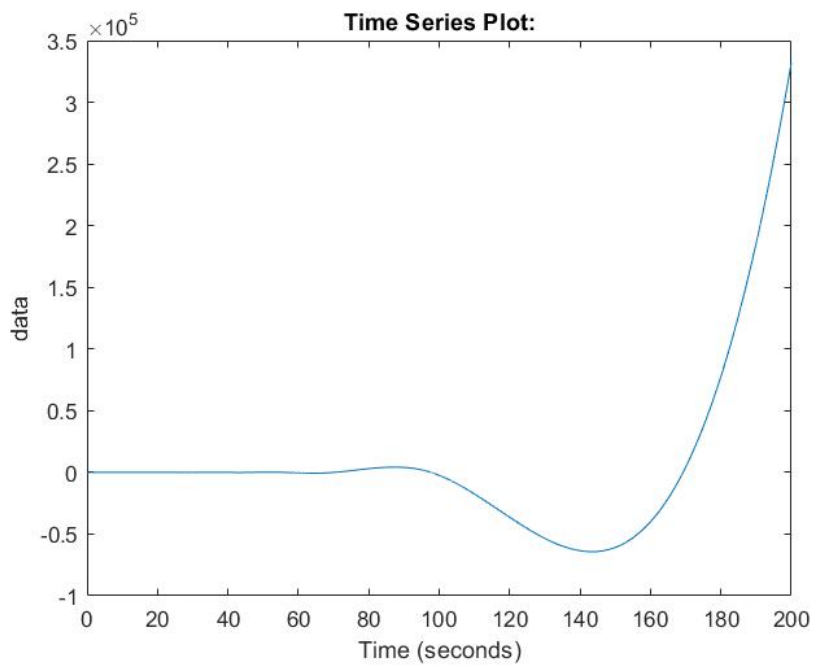
شکل ۴-۱۰: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی IT2SE



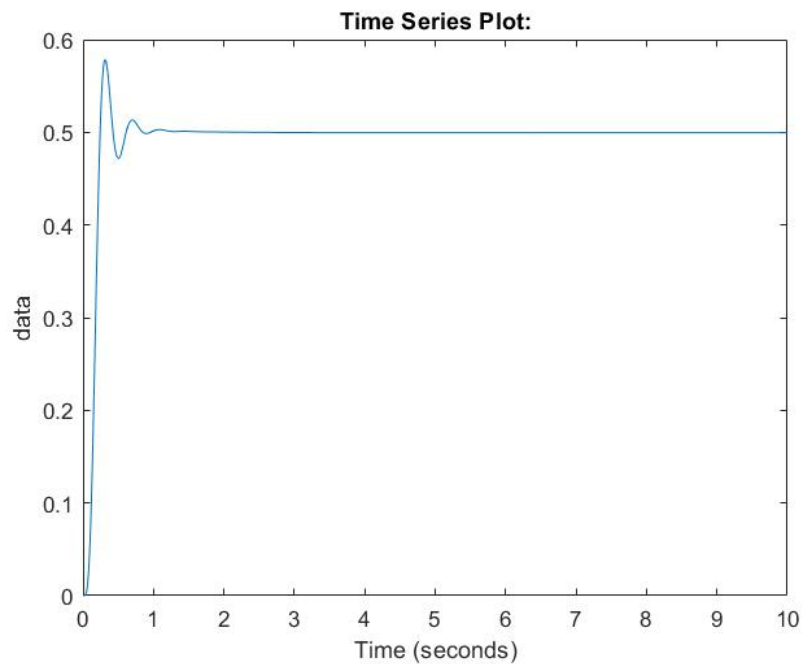
شکل ۴-۱۱: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ITAE



شکل ۴-۱۲: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ITAE



شکل ۴-۱۳: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه `optimpid` متلب برای حالت همراه با بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ITAE



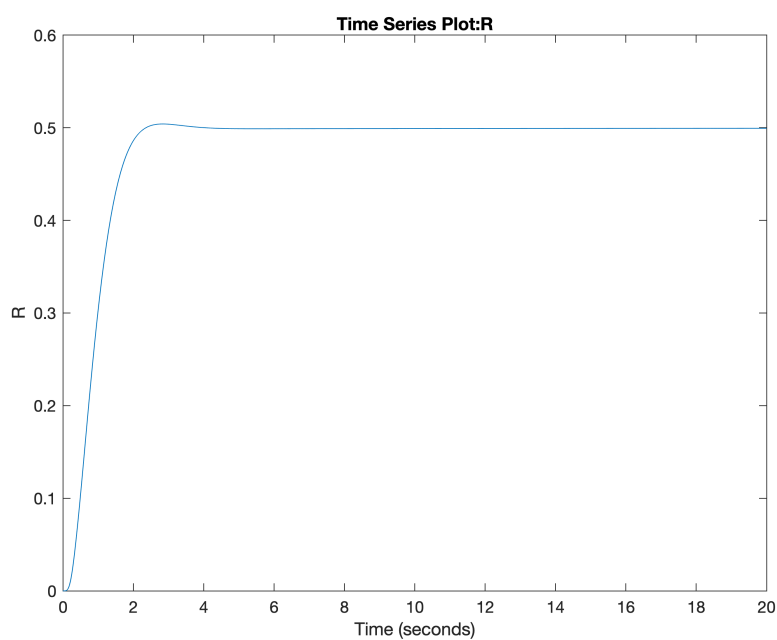
شکل ۴-۱۴: کنترل‌کننده PIDF طراحی شده در برنامه optimpid متلب برای حالت همراه بدون بلوک اشباع و با روش بهینه سازی ITSE

همانطور که ملاحظه می شود با اضافه شدن بلوک اشباع به سیستم مدار باز برنامه قادر به طراحی کنترل‌کننده‌ی که زمان نشست آن کمتر از ۶ ثانیه باشد نمی باشد و بهترین کنترل‌کننده های طراحی شده توسط برنامه برای سیستم با بلوک اشباع دارای زمان نشست بیشتر از ۱۰۰ ثانیه می باشند.

## فصل ۵

### بخش پنجم

در این قسمت یک کنترل‌کننده PID دو درجه آزادی برای سیستم طراحی شد که خروجی خطی و غیرخطی آورده شده است.

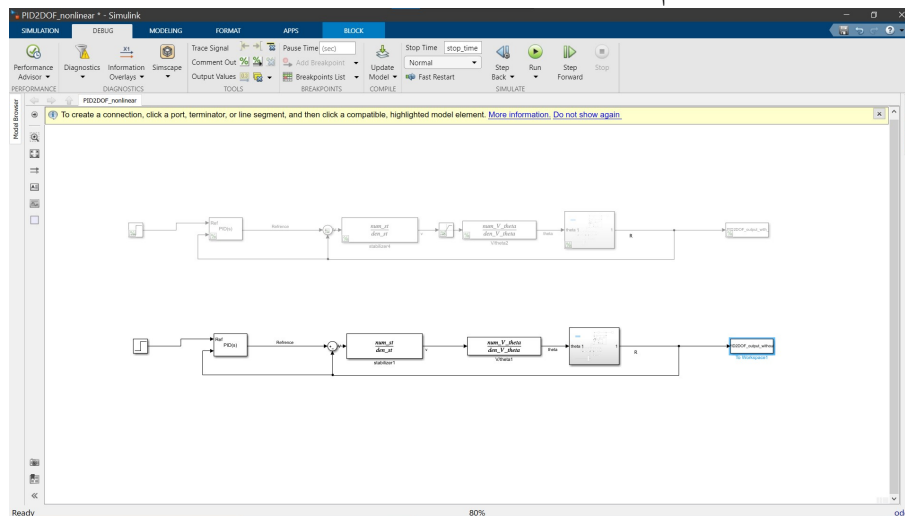


شکل ۵-۱: پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده دو درجه آزادی PID طراحی شده

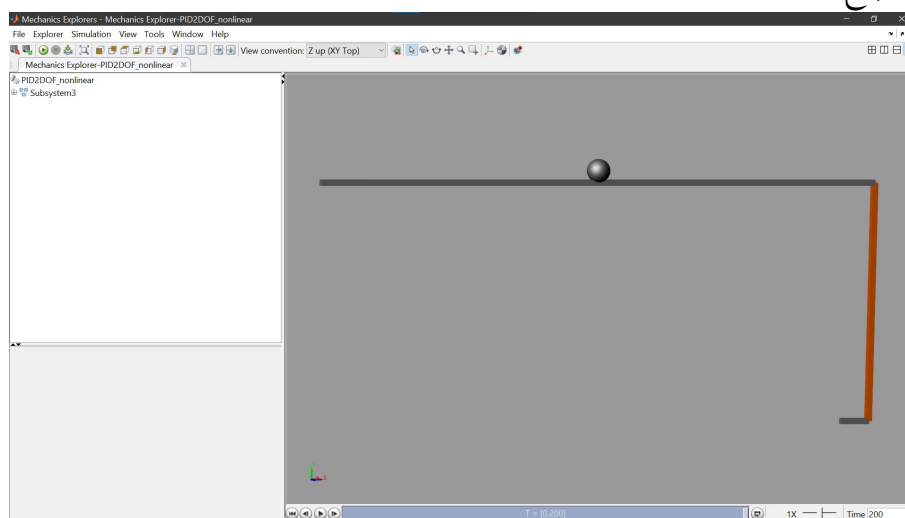
در ادامه به پیاده سازی کنترل‌کننده دو درجه آزادی طراحی شده در این بخش بر روی مدل غیر خطی پرداخته می شود که در این مورد نیز کنترلر را در دو حالت با / بدون بلوک اشباع به مدل غیر خطی اعمال



شده است که نمایی از بلوک دیاگرام این دو حالت در سیمولینک و انیمیشن حرکت توپ به صورت زیر است:

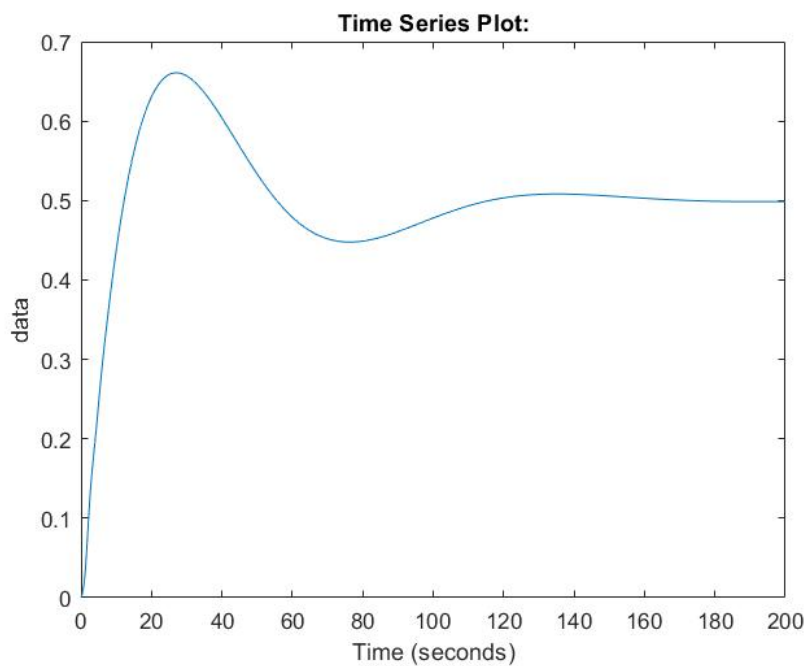


شکل ۵-۲: بلوک دیاگرام پیاده سازی کنترل کننده دو درجه آزادی بر روی مدل غیر خطی در دو حالت با / بدون بلوک اشباع

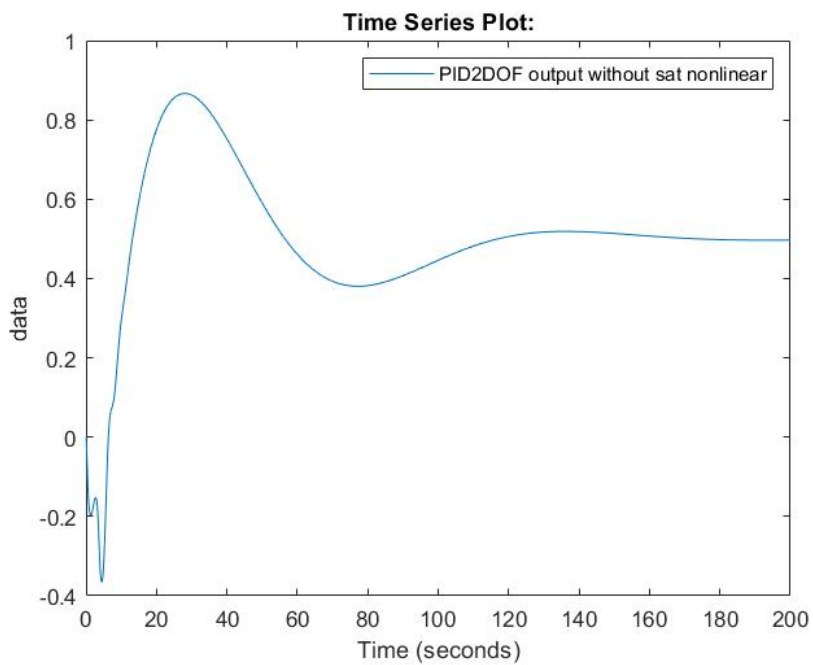


شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام پیاده سازی کنترل کننده دو درجه آزادی بر روی مدل غیر خطی در دو حالت با / بدون بلوک اشباع

که خروجی آنها در هر یک از دو حالت بالا به صورت زیر است:



شکل ۵-۴: خروجی سیستم با کنترل‌کننده دو درجه آزادی پیاده سازی شده بر روی سیستم غیر خطی با بلوک اشباع



شکل ۵-۵: خروجی سیستم با کنترل‌کننده دو درجه آزادی پیاده سازی شده بر روی سیستم غیر خطی بدون بلوک اشباع

همانطور که ملاحظه می شود در هر دو حالت بالا با پیاده سازی کنترل کننده بر روی مدل غیر خطی زمان نشست به بیشتر از ۱۰۰ ثانیه افزایش یافته است

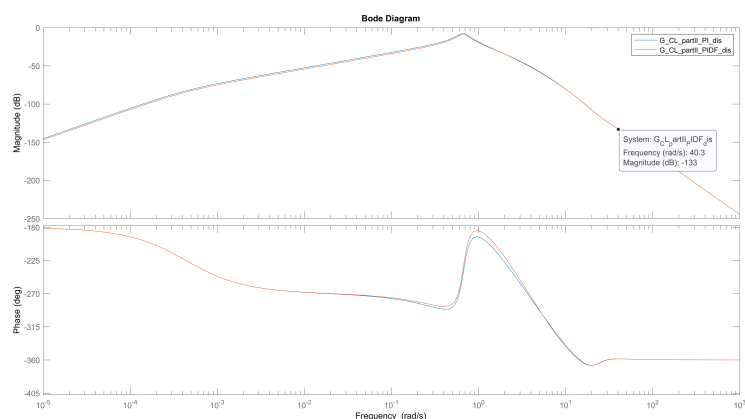
## فصل ۶

### بخش ششم

در این بخش به بررسی توانایی حذف اغتشاش ۴۰ هرتز توسط برخی از کنترل‌کننده‌های منتخب از قسمت قبلی پرداخته می‌شود که بدین منظور نیز از نمودار bode تابع تبدیل مدار بسته خروجی به ازای ورودی اغتشاش استفاده می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

$$G_{d_i}^R = \frac{G}{1 + K_{PIDF}G(1 + K_{stabilizer})}$$

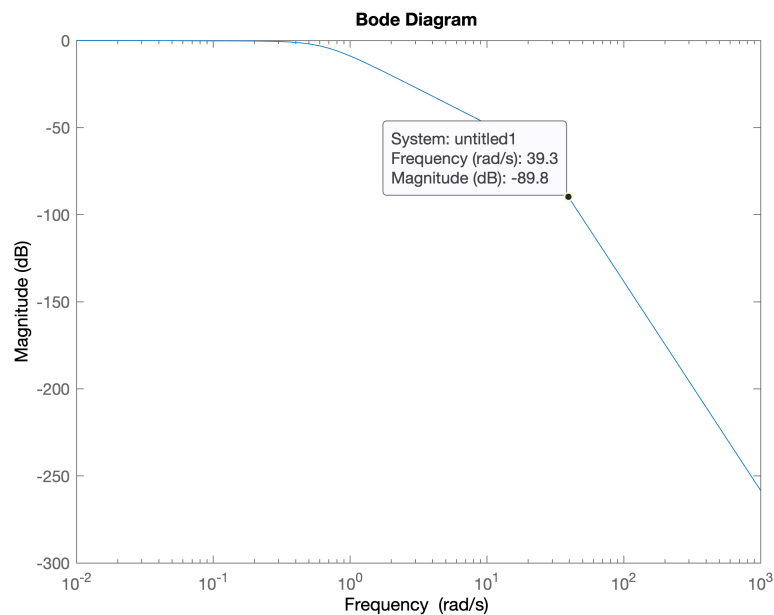
عنوان نمونه نمودار bode تابع تبدیل معرفی شده در بالا به ازای کنترل‌کننده‌های طراحی شده در فصل ۲ به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۶-۱: دیاگرام bode تابع تبدیل خروجی به ورودی اغتشاش به ازای کنترل‌کننده‌های طراحی شده به وسیله PID tuner در بخش ۲

همانطور که ملاحظه می شود دیاگرام بود در اغتشاش در این کنترل کننده ها در فرکانس  $40$  هرتز دارای اندازه  $133$  دسی بل می باشد که بیانگر این است که دامنه نواسانت در خروجی  $2.2 \times 10^{-7}$  برابر شده است که به معنی حذف کامل اغتشاش در فرکانس  $40$  هرتز می باشد.

برای کنترل کننده بخش ۱ نیز نمودار bode حلقه بسته کشیده شد که بر مانند کنترل کننده کاملاً خواسته سوال را ارضا می کند.



شکل ۶-۲: دیاگرام bode تابع تبدیل خروجی به ورودی اغتشاش به ازای کنترل کننده های طراحی شده به وسیله SISO tool PID در بخش ۱

## فصل ۷

### نتیجه‌گیری

با توجه به غیر خطی بودن سیستم وضعف سیستم پلنت از لحاظ پایداری که امکان طراحی کنترل‌کننده PID مناسب را غیرممکن میکرد، نیاز بر آن شد تا کنترل‌کننده پایداری به سیستم اضافه یه مرحله حلقه برای افزایش سیستم بسته شده و سپس کنترل‌کننده PID برای سیستم جدید که پایداری آن بهبود بخشیده شده است به روش های مختلف خواسته شده طراحی شد که خواسته های مسیله را بدون در نظر گرفتن اشباع به خوبی در همه کنترل‌کننده ها ارضا می کند اما مشکل اصلی در حد اشباع عملگر می باشد که با توجه به تابع تبدیل نه چندان مناسب پلنت ،تابع تبدیل پایداری طراحی باعث افزایش بیش از حد سیگنال کنترلی می شود که این خود موجب اشباع عملگر در حقیقت می شود و باعث می شود که با افزودن بلوک اشباع به سیستم پاسخ آن تغییر کرده و مقدار زمان نشست آن بسیار افزایش یابد. بدین سبب امکان دست یابی به مقدار زمان نشست مطلوب در هیچ یک از کنترل‌کننده های طراحی شده در صورت استفاده از بلوک اشباع عملگر نمی باشد.



Sharif University of Technology  
Department of Mechanical Engineering

Controller Design Project

## **Ball and Beam PID Controller**

By:

**Ali BaniAsad and Reza Rezaie**

Supervisor:

**Dr. Alasti**

February 2022