

به نام خدا



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پروژه درس کنترل فرایندها

عنوان پروژه:

بررسی و تحلیل کنترلی یک راکتور تحت کنترل پسخور از طریق متلب و سیمولینک

اعضای گروه:

مجتبی چهاربرجی (۹۹۱۰۲۹۰۴)

پوریا مطهری (۹۹۱۷۱۰۹۹)

استاد درس:

دکتر محمودرضا پیشوائی

بهمن ۱۴۰۲

چکیده

کنترل راکتورها در فرایندهای شیمیایی امری بسیار بسیار مهم در صنعت دارد، از آنجایی که راکتورها در هر واحد شیمیایی، قلب آن واحد محسوب می‌شوند، با تغییرات خوراک و یا دما در راکتور، خروجی واحد می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. در این پروژه از دانشجویان درس خواسته شده که کنترل راکتوری فرضی تحت کنترل پسخور^۱ با شرایط مشخص شده را بررسی و تحلیل کنند.

واژگان کلیدی:

مدلسازی، مخزن همزده، طراحی کنترلر، کنترلر PI، سیمولینک^۲، متلب^۳

¹ Feedback

² Simulink

³ MATLAB

فهرست

۱. مقدمه	6
۲. خواسته‌ها	7
۱.۲ خواسته ۱	7
۱.۱.۲ روابط اولیه به منظور ساده‌سازی و کوتاه‌سازی مدل	7
۲.۱.۲ معادله موازنه جرم کلی برای سیال فرایند	7
۳.۱.۲ معادله موازنه جرم کلی برای سیال سرویس	7
۴.۱.۲ معادله موازنه جرم جزئی برای سیال فرایند برای جزء A	8
۵.۱.۲ معادله موازنه جرم جزئی برای سیال فرایند برای جزء B	8
۶.۱.۲ معادله موازنه انرژی برای سیال فرایند	8
۷.۱.۲ معادله موازنه انرژی برای سیال سرویس	8
۲.۲ خواسته ۲	8
۳.۲ خواسته ۳	9
۴.۲ خواسته ۴	12
۱.۴.۲ تفسیر نتایج	14
۵.۲ خواسته ۵	15
۱.۵.۲ حالت servo	16
۲.۵.۲ حالت regulator	18
۶.۲ خواسته ۶	19
۳. نتیجه‌گیری	24
۴. منابع	25

فهرست اشکال

- شکل (۱): نمای P&ID صورت پروژه 6
- شکل (۲) - نمودار جعبه‌ای اثر ورودی‌ها بر خروجی‌ها 9
- شکل (۳) - اثر افزایش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر غلظت‌های اجزاء A و B (پله مثبت ۱۰ درصد در ورودی) 10
- شکل (۴) - اثر کاهش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده (پله مثبت ۱۰ درصد در ورودی) 11
- شکل (۵) - اثر کاهش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر غلظت‌های اجزاء A و B (پله منفی ۱۰ درصد در ورودی) 11
- شکل (۶) - اثر افزایش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده (پله منفی ۱۰ درصد در ورودی) 12
- شکل (۷) - کد خطی‌سازی سیستم 12
- شکل (۷) - تابع انتقال نتیجه خطی‌سازی سیستم 13
- شکل (۸) - شماتیک تابع انتقال و تابع S-FUNCTION برای تغییر پله ۱۰+ درصد 13
- شکل (۹) - مقایسه نتیجه دو تابع با ورودی پله ۱۰+ درصد - سمت راست) تابع انتقال - سمت چپ) تابع S-FUNCTION 13
- شکل (۱۰) - شماتیک تابع انتقال و تابع S-FUNCTION برای تغییر پله ۱۰- درصد 14
- شکل (۱۱) - مقایسه نتیجه دو تابع با ورودی پله ۱۰- درصد - راست) تابع انتقال - چپ) تابع S-FUNCTION 14
- شکل (۱۲) - تابع S-FUNCTION جدید با ورودی متفاوت غلظت 15
- شکل (۱۳) - معیارهای مختلف برای اندازه‌گیری مقدار خطای پسخور 16
- شکل (۱۴) - شمای حالت SERVO 17
- شکل (۱۴) - نتیجه اجرای برنامه حالت SERVO 17
- شکل (۱۵) - حداقل سازی مقدار خطای پسخور بوسیله طراحی بهینه کنترلر 18
- شکل (۱۶) - شمای حالت SERVO 18

- 19 شکل (۱۷) - کنترل اثر اغتشاش را در خروجی توسط کنترلر
- 19 شکل (۱۸) - حداقل سازی مقدار خطای پسخور بوسیله طراحی بهینه کنترلر در حالت REGULATOR
- 20 شکل (۱۹) - پاسخ نوسانی و بهره کنترلر بحرانی
- 20 شکل (۲۰) - پاسخ نوسانی، زمان دوره دائمی و بهره کنترلر بحرانی
- 21 شکل (۲۱) - بهره تناسبی 0.1 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 21 شکل (۲۲) - بهره تناسبی 0.3 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 21 شکل (۲۳) - بهره تناسبی 0.6 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 22 شکل (۲۴) - بهره تناسبی 0.8 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 22 شکل (۲۵) - بهره تناسبی 0.9235 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 22 شکل (۲۵) - بهره تناسبی 1 برای حالت REGULATOR و SERVO
- 23 شکل (۲۶) - زمان تناوب دائم در مقدار بهره بحرانی
- 23 شکل (۲۷) - جدول زیگلر-نیکولز و پارامترهای مربوطه جهت طراحی کنترلر
- 24 شکل (۲۸) - واگرایی سیستم و دور شدن از مقدار مقرر با استفاده از روش زیگلر-نیکولز

فهرست جداول

- جدول (۱) - داده‌های نقاط کاری سیستم در حالت پایا 8

فهرست علائم اختصاری

علائم لاتین

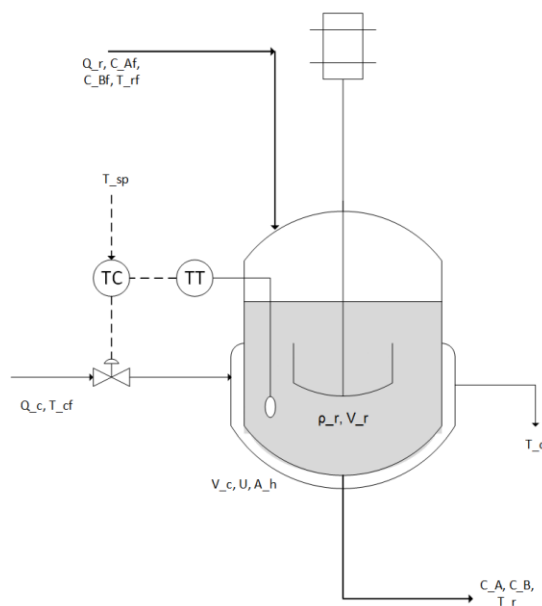
k_i	ثابت تعادل واکنش $[min^{-1}]$
$k_{0,i}$	ثابت تعادل اولیه آرنیوس $[min^{-1}]$
h_i	گرمای واکنش $[kJ/kmol]$
E_i/R	دمای اکتیویشن واکنش $[K]$
V	حجم $[m^3]$
ρ	چگالی $[kg/m^3]$
C	غلظت $[kmol/m^3]$
T	دما $[K]$
Q	دبی حجمی $[m^3/min]$
A_h	مساحت انتقال حرارت ژاکت و مخزن $[m^2]$
U	ثابت کلی انتقال حرارت ژاکت و مخزن $[kJ/m^2.min.K]$

زیرنویس‌ها

r	سیال راکتور
c	سیال خنک‌کننده
f	خاصیت ورودی
A	جزء A
B	جزء B
1	واکنش اول
2	واکنش دوم

۱. مقدمه

همانطور که در چکیده گفته شد، کنترل راکتورها اهمیت ویژه‌ای در صنعت دارد. در اکثر مواقع بدلیل تاخیر بالا در ابزار دقیق‌های اندازه‌گیری غلظت، دمای خروجی راکتور متغیر کنترل شونده است. در این مسئله این متغیر با دبی سیال خنک کننده کنترل می‌شود. هدف خواسته‌های پروژه حول رابطه و کنترل دمای خروجی راکتور با دبی سیال خنک کننده در ژاکت راکتور می‌باشد. در شکل (۱) شمای کلی این راکتور به صورت کلی رسم و تهیه شده است.



شکل (۱): نمای P&ID صورت پروژه

ابزار مورد استفاده در شبیه‌سازی این پروژه، نرم افزار متلب به همراه برنامه کمکی سیمولینک بوده و محیط محاسبات در این برنامه می‌باشد. برای شبیه‌سازی، این گروه از نسخه R2021b نرم افزار استفاده کرده است.

توصیه می‌شود که در صورت هرگونه ابهام و شبهه در محاسبات گزارش، خواهشا به فایل‌های شبیه‌سازی متلب کد و سیمولینک مراجعه شود.

۲. خواسته‌ها

اهداف خواسته‌شده در این پروژه در ادامه محاسبه شده و گزارش داده می‌شوند. سپس در نهایت در بخش نتیجه‌گیری به صورت کلی تفسیر و بررسی می‌شوند.

۱.۲ خواسته ۱

با مدل‌سازی راکتور با توجه به شکل (۱)، یک معادله موازنه جرم کلی برای سیال فرایند، یک معادله موازنه جرم کلی برای سیال سرویس، دو معادله موازنه جرم جزئی برای سیال فرایند و دو معادله موازنه انرژی یکی برای سیال فرایند و دیگری برای سیال سرویس حاصل می‌شود. فرض‌های مدل‌سازی فرایند به صورت زیر است:

- ۱- خواص ترموفیزیکی سیال سرویس و سیال فرایند ثابت است.
- ۲- همزدگی در راکتور به صورت کامل بوده و سیال فرایند در هر مکان از راکتور همگن می‌باشد.
- ۳- تابعیت سرعت واکنش‌ها برحسب دما از رابطه آرنیوس^۴ پیروی می‌کند.
- ۴- ضریب کلی انتقال حرارت با تغییرات دبی سیالات سرویس و فرایند، تغییری نمی‌کند.
- ۵- زمان ماند و ارتفاع بخش داخلی راکتور و نیز بخش ژاکت همواره ثابت و بدون تغییر می‌باشد

بدین ترتیب با فرض‌های بالا و داده‌های گزارش شده، روابط زیر نوشته می‌شود:

۱.۱.۲ روابط اولیه به منظور ساده‌سازی و کوتاه‌سازی مدل

$$\begin{cases} k_1 = k_{0,1} \times \exp\left(-\frac{E_1}{RT_r}\right) \\ k_2 = k_{0,2} \times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_r}\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$h_r = h_1 k_1 C_A + h_2 k_2 C_B \quad (2)$$

۲.۱.۲ معادله موازنه جرم کلی برای سیال فرایند

$$Q_r \rho_r - Q_{r,out} \rho_r = \rho_r \times \frac{dV_r}{dt} = 0 \rightarrow Q_r = Q_{r,out} \quad (3)$$

۳.۱.۲ معادله موازنه جرم کلی برای سیال سرویس

$$Q_c \rho_c - Q_{c,out} \rho_c = \rho_c \times \frac{dV_r}{dt} = 0 \rightarrow Q_c = Q_{c,out} \quad (4)$$

⁴ Arrhenius Equation

۴.۱.۲ معادله موازنه جرم جزئی برای سیال فرایند برای جزء A

$$Q_r C_{Af} - Q_r C_A - V_r k_1 C_A = V_r \times \frac{dC_A}{dt} \rightarrow \frac{dC_A}{dt} = -\left(\frac{Q_r}{V_r} + k_1\right) C_A + \frac{Q_r}{V_r} C_{Af} \quad (5)$$

۵.۱.۲ معادله موازنه جرم جزئی برای سیال فرایند برای جزء B

$$Q_r C_{Bf} - Q_r C_B + V_r k_1 C_A - V_r k_2 C_B = V_r \times \frac{dC_B}{dt} \rightarrow \frac{dC_B}{dt} = -\left(\frac{Q_r}{V_r} + k_2\right) C_B + k_1 C_A + \frac{Q_r}{V_r} C_{Bf} \quad (6)$$

۶.۱.۲ معادله موازنه انرژی برای سیال فرایند

$$\rho_r Q_r C_{p_r} T_{rf} - \rho_r Q_r C_{p_r} T_r - UA_h (T_r - T_c) + V_r h_r = V_r \rho_r C_{p_r} \times \frac{dT_r}{dt} \rightarrow$$

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{h_r}{\rho_r C_{p_r}} + \frac{Q_r}{V_r} (T_{rf} - T_r) + \frac{UA_h}{V_r \rho_r C_{p_r}} (T_c - T_r) \quad (7)$$

۷.۱.۲ معادله موازنه انرژی برای سیال سرویس

$$\rho_c Q_c C_{p_c} T_{cf} - \rho_c Q_c C_{p_c} T_c + UA_h (T_r - T_c) = V_c \rho_c C_{p_c} \times \frac{dT_c}{dt} \rightarrow$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{Q_c}{V_c} (T_{cf} - T_c) + \frac{UA_h}{V_c \rho_c C_{p_c}} (T_r - T_c) \quad (8)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، روابط ۵ تا ۸ خواسته سوال می‌باشند. در کد خواسته دوم، به منظور کوتاه شدن معادلات، از روابط ۹ استفاده می‌شود:

$$Q_R = \frac{Q_r}{V_r}; \quad Q_C = \frac{Q_c}{V_c} \quad (9)$$

۲.۲ خواسته ۲

در این خواسته برای نوشتن معادلات در حالت پایا تنها کافیست که جمله گذرا در معادلات خواسته اول برابر صفر قرار داده شود. پیرو آن نتایج و نقاط کاری حالات سیستم بدست می‌آیند:

جدول (۱) - داده‌های نقاط کاری سیستم در حالت پایا

C_A [kmol/m ³]	C_B [kmol/m ³]	T_r [K]	T_c [K]
0.1649	0.9437	350.1873	330.5469

۳.۲ خواسته ۳

برای مدل کردن سیستم با S-Function نیاز است که ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم مشخص شود. پارامتری به عنوان ورودی قرار داده می‌شود که بتوان با آن سایر مشخصات سیستم را کنترل نمود. همانطور که در صورت مسئله بیان شده، هدف این است که بوسیله تغییر دبی سیال خنک کننده دمای محتویات راکتور کنترل شود.

بنابراین دبی سیال خنک کننده (متغیر کنترل کننده) را به عنوان ورودی در نظر گرفته و از آنجایی که نیاز است دمای محتویات راکتور کنترل شود (متغیر کنترل شونده)، این پارامتر به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود.

از آنجایی که مقدار پارامترهای خوراک اولیه داده شده است (Q_{ef} , T_{ef} , T_{rf} , C_{Bf} , C_{Af} , Q_r) می‌توان این پارامترها را به عنوان ورودی نیز در نظر گرفت و اثر تغییر این پارامترها را در خروجی یافت اما از آنجا که خواسته مسئله چنین چیزی نیست تنها به بررسی اثر تغییر دبی سیال خنک کننده (ورودی) به دمای محتویات درون راکتور (خروجی) بسنده می‌شود.

برای دانستن این که چه پارامترهای دیگری از تغییر دبی سیال خنک کننده اثر می‌پذیرند، می‌توان آنها را به عنوان خروجی نیز در نظر گرفت به شرطی که معادله دینامیکی برای آنها از قبل مدل شده باشد. چون در این مسئله ۴ معادله دینامیکی مشخص شده است، این مقادیر به عنوان خروجی در نظر گرفته شده و به بررسی اثرپذیری این مقادیر در برابر تغییر دبی سیال خنک کننده پرداخته می‌شود.

با توجه به معادلات دینامیکی ۵ تا ۸، نمودار جعبه‌ای^۵ اثر ورودی را بر خروجی‌ها می‌توان رسم نمود:



شکل (۲)- نمودار جعبه‌ای اثر ورودی‌ها بر خروجی‌ها

پس از مشخص شدن ورودی‌ها و خروجی‌ها و دانستن نحوه اثرپذیری این مقادیر از هم (با توجه به معادلات دینامیکی)، سیستم با استفاده از تابع S-Function مدل می‌شود.

از فایل قرار داده شده در سامانه درس‌افزار برای نوشتن تابع S-Function به عنوان الگو استفاده خواهد شد.

با توجه به مسئله مورد حل نیاز است برخی مقادیر در این تابع الگو اصلاح شوند:

۱- در خط ۱۶۸ تعداد معادلات را باید قرار داد (۴ معادله)

⁵ Flowchart

۲- در خط ۱۷۰ تعداد خروجی ها را باید قرار داد (۴ خروجی)

۳- در خط ۱۷۱ تعداد ورودی ها را باید قرار داد (۱ ورودی)

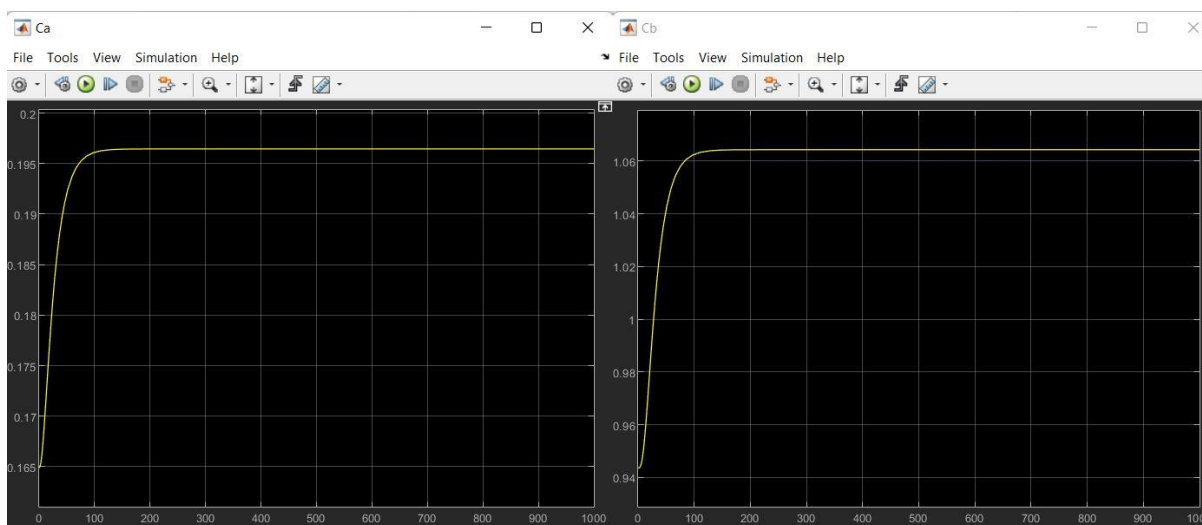
۴- در خط ۱۸۰ مقادیر اولیه حالات با توجه به ترتیب تعریف خروجی ها در فایل معادلات قرار داده می شوند

۵- در خط ۲۰۹ باید توجه نمود که نام تابعی که در آن معادلات تعریف شده است با نام تابع قرار داده شده در این خط مطابقت داشته باشد.

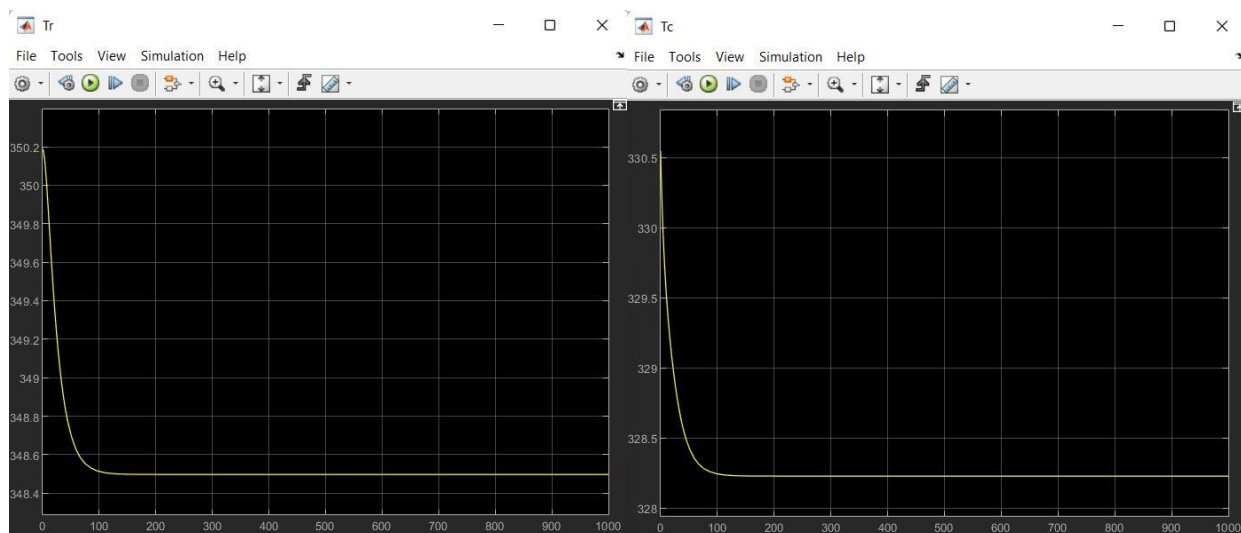
پس از تعریف مشخصات لازم مسئله در تابع S-Function شبیه سازی در Simulink انجام می شود.

در Simulink تابع S-Function فرا خوانده می شود و یک ورودی پله ۱۰ درصدی مثبت و منفی برای دبی سیال خنک کننده در نظر گرفته می شود. با بلوک mux این ورودی برای تابع S-Function تعریف می شود و با بلوک demux 4 خروجی از تابع SFunction گرفته می شود.

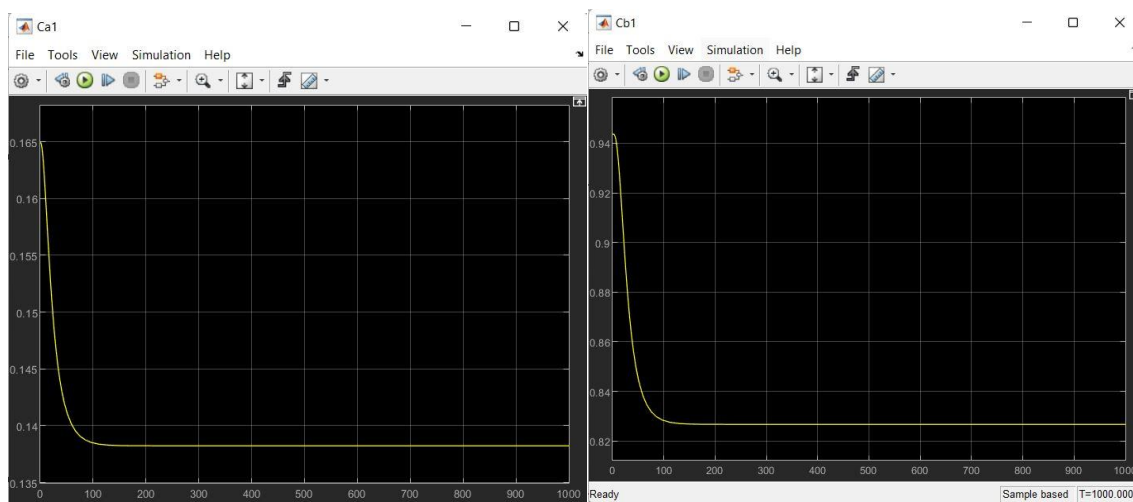
به وسیله دستور scope می توان در نموداری نحوه اثر ورودی بر خروجی ها را مشاهده کرد، به این منظور فایل شبیه سازی Simulink اجرا می شود.



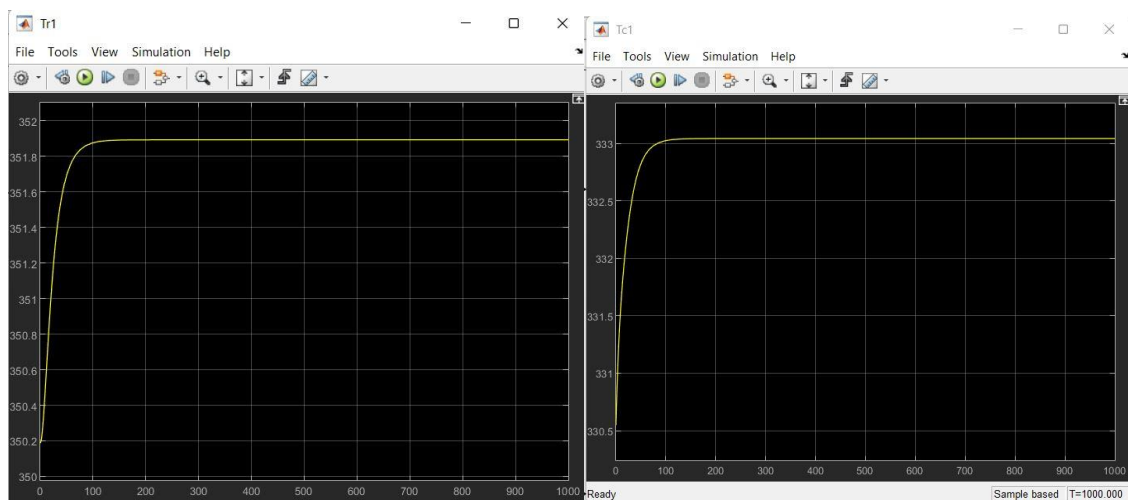
شکل (۳)- اثر افزایش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر غلظت های اجزاء A و B (پله مثبت ۱۰ درصد در ورودی)



شکل (۴)- اثر کاهنده افزایش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده (پله مثبت ۱۰ درصد در ورودی)



شکل (۵)- اثر کاهنده کاهش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر غلظت های اجزاء A و B (پله منفی ۱۰ درصد در ورودی)



شکل(۶)- اثر افزایش دبی سیال خنک کننده بر مقادیر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده (پله منفی ۱۰ درصد در ورودی)

۴.۲ خواسته ۴

پس از مدل کردن سیستم با تابع S-Function در خواسته سوم خطی‌سازی این سیستم به منظور یافتن تابع انتقال انجام می‌شود. هدف از خطی‌سازی، تجزیه و تحلیل آسان‌تر رفتار سیستم است. در خطی‌سازی از سری‌هایی چون سری تیلور استفاده می‌شود و مقادیر مورد نیاز تابع به این وسیله به صورت تقریبی بدست می‌آیند. به این منظور باید برای هر خروجی نسبت به ورودی خطی‌سازی انجام شود.

از آنجایی که هدف بدست آوردن تابع انتقال فرایندی است، و خروجی اصلی سیستم که اهمیت و قابلیت اندازه‌گیری را دارد دمای محتویات درون راکتور است، خطی‌سازی بر این مبنا انجام می‌شود، یعنی دمای T_r نسبت به دبی سیال خنک کننده خطی‌سازی می‌شود. همانطور که در صورت سوال گفته شده، اندازه‌گیری غلظت و ثابت نگه داشتن آن کار آسانی نیست. بنابراین نمی‌توان مستقیماً این پارامتر را کنترل کرد، همچنین کنترل دمای T_r از اهمیت بالاتری نسبت به کنترل دمای T_c دارد.

بنابراین با مشخص کردن ورودی و خروجی مورد نیاز برای خطی‌سازی به وسیله گزینه‌های `linear analysis points>>input perturbation` برای ورودی سیستم (Qc) و `linear analysis points>>output measurement` برای خروجی سیستم (Tr) خطی‌سازی در بخش `Model APPS>>linearizer` انجام می‌شود.

سپس این مدل در محیط Simulink خطی‌سازی می‌شود و داده‌های خروجی (`linsys1`) به workspace برنامه MATLAB انتقال داده می‌شود. با تعریف شدن این داده‌ها و فایل شبیه‌سازی شده Simulink در workspace می‌توان با دستور زیر تابع انتقال دبی سیال خنک کننده و دمای محتویات راکتور خواسته سوال را بدست آورد.

```
clc
A = linsys1.a;
B = linsys1.b;
C = linsys1.c;
D = linsys1.d;
Gss = ss(A,B,C,D);
Gtf = tf(Gss);
display(Gtf)
```

شکل(۷)- کد خطی‌سازی سیستم

Gtf =

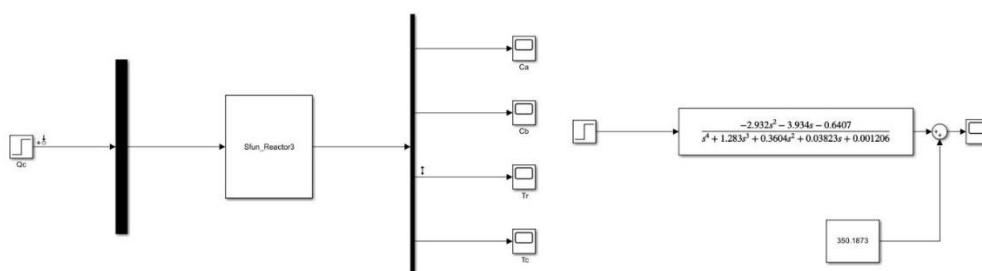
From input 1 to output...

$$-2.932 s^2 - 3.934 s - 0.6407$$

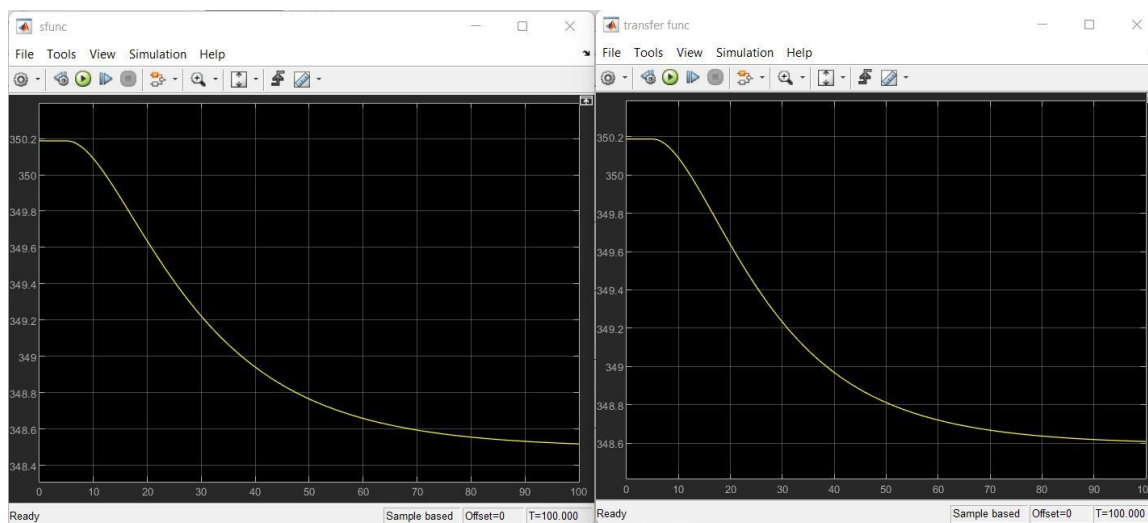
$$1: \frac{-2.932 s^2 - 3.934 s - 0.6407}{s^4 + 1.283 s^3 + 0.3604 s^2 + 0.03823 s + 0.001206}$$

شکل (۷) - تابع انتقال نتیجه خطی سازی سیستم

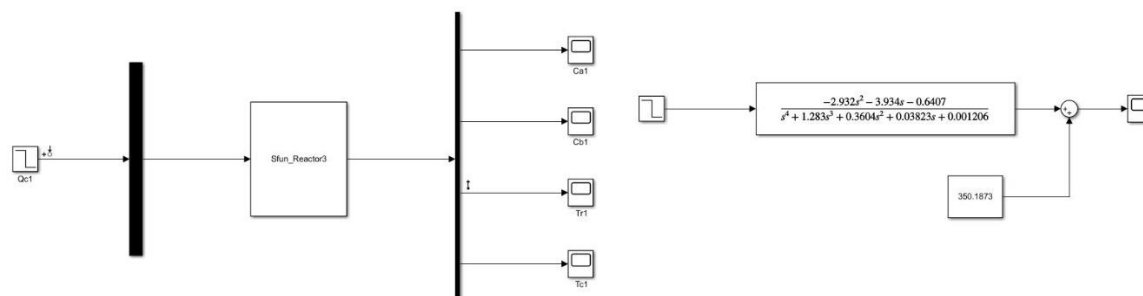
همانطور که مشاهده می شود صورت تابع انتقال مقداری منفی دارد که نشان دهنده این است که بهره فرایند منفی است که نتیجه ای منطقی است زیرا با افزایش دبی سیال خنک کننده دمای محتویات راکتور کاهش می یابد (اثر معکوس).
حال نتایج حاصله از S-Function و تابع انتقال بدست آمده برای فرایند با همدیگر مقایسه می شوند.



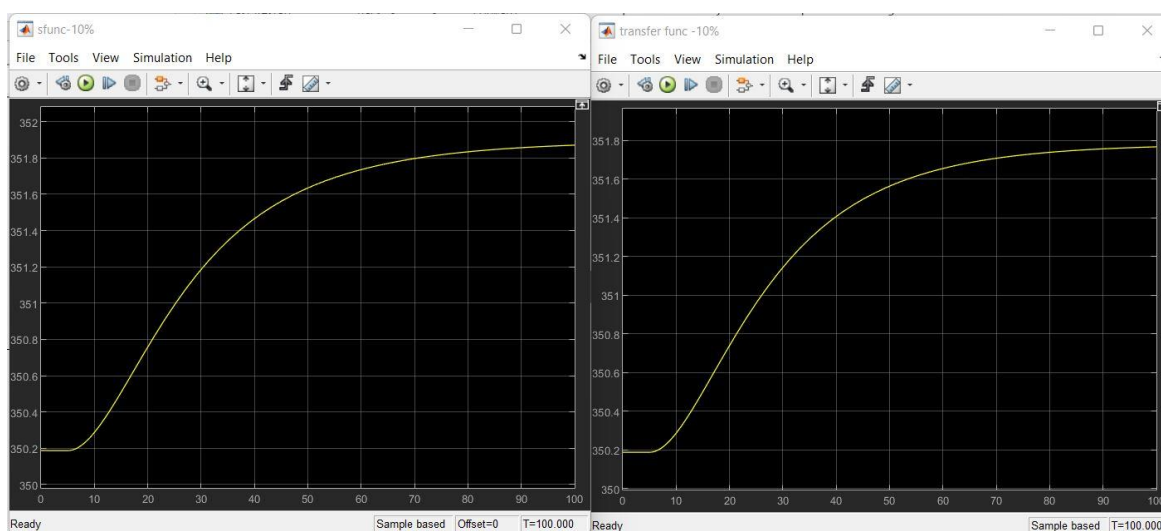
شکل (۸) - شماتیک تابع انتقال و تابع S-Function برای تغییر پله ۱۰ درصد



شکل (۹) - مقایسه نتیجه دو تابع با ورودی پله ۱۰ درصد - سمت راست) تابع انتقال - سمت چپ) تابع S-Function



شکل (۱۰) - شماتیک تابع انتقال و تابع S-Function برای تغییر پله ۱۰- درصد



شکل (۱۱) - مقایسه نتیجه دو تابع با ورودی پله ۱۰- درصد - راست - تابع انتقال - چپ - تابع S-Function

۱.۴.۲ تفسیر نتایج

همانطور که در خواسته قسمت قبل نشان داده شد افزایش دبی سیال خنک کننده اثر کاهنده بر دمای محتویات راکتور دارد و کاهش دبی سیال اثر افزایش دمای T_r دارد.

در اشکال نشان داده شده برای ورودی پله ۱۰- درصد و ۱۰+ درصد در حالت تابع انتقال و تابع S-Function مقدار کمی اختلاف مشاهده می‌شود که به دلایل زیر ممکن است رخ داده باشد:

1- خطی سازی برای بدست آوردن تابع انتقال: در خطی سازی کمی تقریب وارد عمل خواهد شد (مثلا استفاده از سری تیلور سه جمله‌ای برای خطی سازی)

2- استفاده از مدل های مختلف حل معادله دیفرانسیلی ($ode15s, ode25s, ode45, \dots$)

3- تقریب در محاسبات عددی و نمایش اعداد

ولی به صورت کلی در خطی سازی ها هر چه فاصله از نقطه کاری کمتر باشد، خطای شبیه سازی و محاسبات کمتر می‌شود.

۵.۲ خواسته ۵

در این قسمت از توابع انتقال بدست آمده از قسمت قبل (تابع انتقال فرایند) برای حالت servo استفاده خواهد شد. البته نیاز است که تابع انتقال اغتشاش نیز برای حالت regulator نیز بدست آید. بدین منظور با استفاده از فایل‌های شبیه‌سازی قسمت قبل با تغییر متغیر ورودی بجای دبی سیال خنک کننده با یکی از پارامترهای اغتشاش، محاسبات انجام خواهد شد.

۱- C_{Af} : غلظت جزء A در خوراک

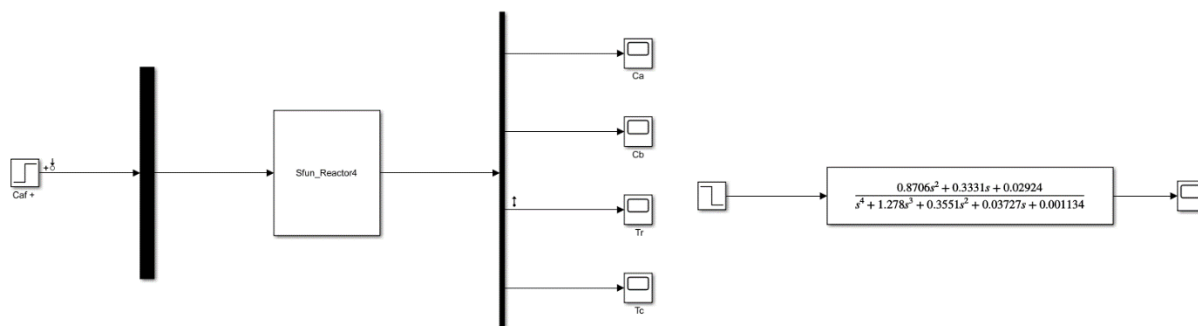
۲- T_{rf} : دمای اولیه خوراک ورودی به راکتور

۳- T_{cf} : دمای اولیه سیال خنک کننده

از آنجایی که اندازه گیری غلظت کار آسانی نیست این پارامتر می‌تواند مهمترین متغیر در اغتشاش باشد. بنابراین باید تابع انتقال اغتشاش برای بررسی اثر تغییر غلظت جزء A (واکنش دهنده اولیه) بر دمای محتویات راکتور بدست آید.

بنابراین ورودی سیستم C_{Af} تعریف شده و اثر این پارامتر در خروجی (دمای محتویات راکتور) بررسی می‌شود.

بدین منظور مشابه خواسته ۳، تابع S-Function و تابع معادلات دینامیکی تعریف می‌شود. با این تفاوت که در این حالت ورودی تغییر کرده است، سپس در محیط Simulink تابع S-Function را فراخوانده و برنامه اجرا می‌شود. در ادامه برای یافتن تابع انتقال خطی سازی انجام خواهد شد.



شکل (۱۲) - تابع S-Function جدید با ورودی متفاوت غلظت

پس از بدست آمدن توابع انتقال، به منظور طراحی بهینه کنترلر PI باید بهره تناسبی (K_p) و بهره انتگرالی (K_i) طوری بهینه‌سازی شود که مقدار خطای پسخور^۶ به حداقل مقدار ممکن برسد و علاوه بر این در حالت servo متغیر کنترل شونده را به میزان مقدار مقرر تا حد ممکن نزدیک کند (به عبارتی دیگر مقدار offset را به حداقل برساند) و همچنین در حالت regulator کنترلر باید در طی زمان اثر تغییر در متغیر اغتشاش را بر روی متغیر کنترل شونده خنثی سازد و دوباره این متغیر را به حالت اولیه برساند.

⁶ Feedback

$$\begin{aligned}
 ISE &= \int_0^{\infty} e_{(t)}^2 dt \\
 IAE &= \int_0^{\infty} |e_{(t)}| dt \\
 ITSE &= \int_0^{\infty} t \cdot e_{(t)}^2 dt \\
 ITAE &= \int_0^{\infty} t \cdot |e_{(t)}| dt
 \end{aligned}$$

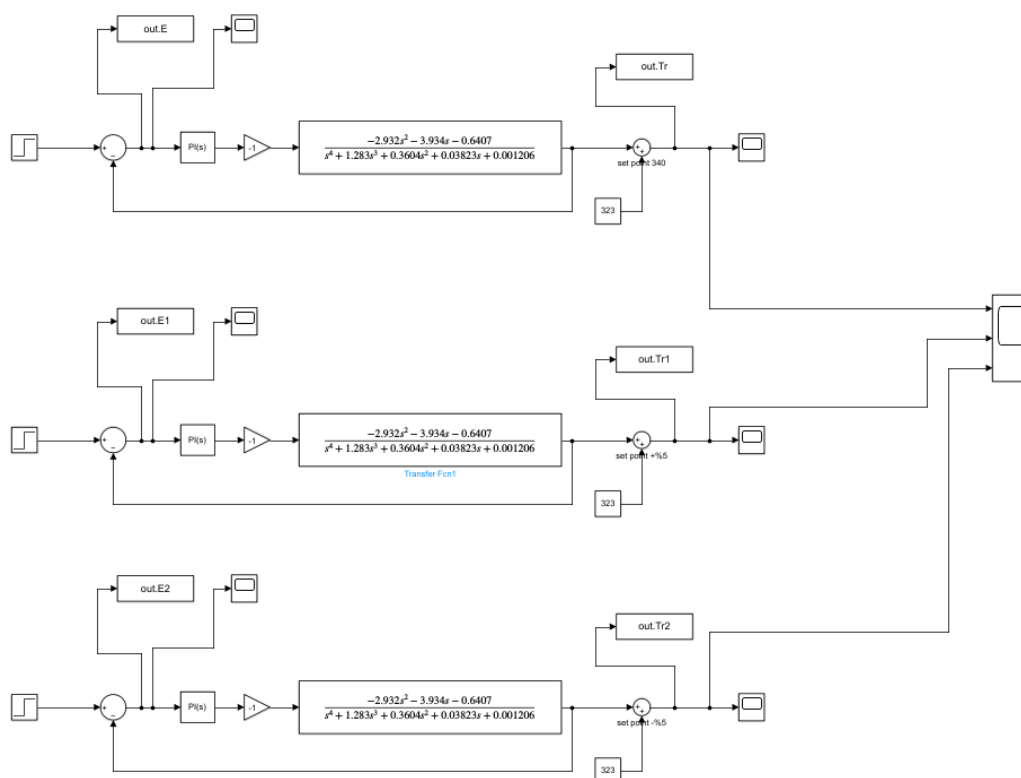
شکل (۱۳) - معیارهای مختلف برای اندازه‌گیری مقدار خطای پسخور

با استفاده از دستور `fminsearch` مقادیر مطلوب بهره تناسبی و بهره انتگرالی طوری بدست می‌آید که مقدار خطای پسخور حداقل شود. در این روش نیاز است حدس اولیه‌ای به منظور شروع محاسبه برای تابع تعریف شود. مقادیر حدس اولیه را باید طوری انتخاب نمود که در انتها خطای پسخور به حداقل برسد. پس از چند مرتبه اعمال حدس اولیه و مشاهده خروجی نتیجه می‌شود که برای رسیدن به مقدار مطلوب خطای پسخور نیاز است بهره کنترلر منفی باشد. (راه دیگر این است بجای منفی قرار دادن بهره کنترلر از یک کنترلر تناسبی با بهره ۱- به همراه کنترلر PI با مقادیر بهره مثبت استفاده نمود).

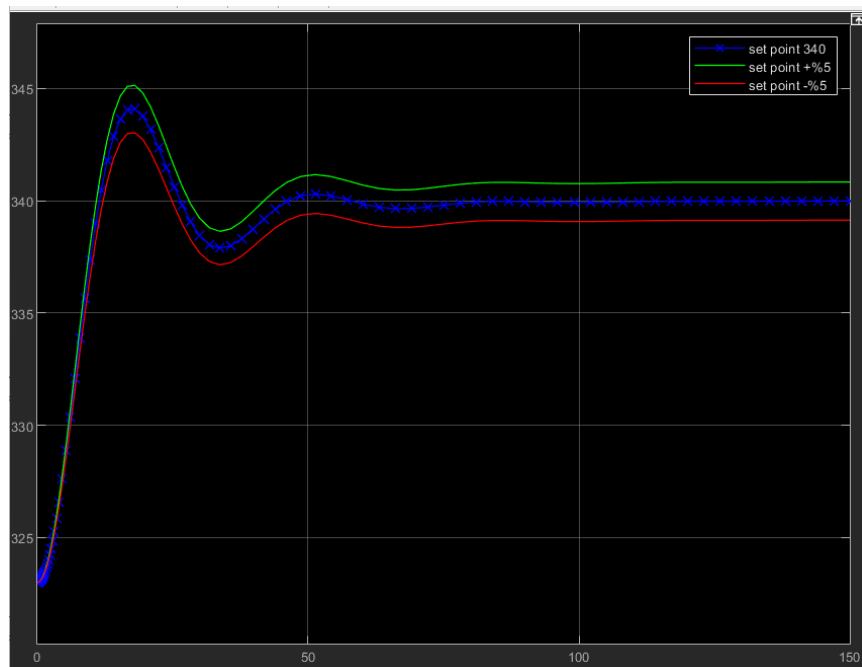
علت منفی بودن بهره کنترلر به این خاطر است که در قسمت‌های قبل بهره فرایند مقداری منفی بدست آمد بنابراین در صورتی که لازم باشد که سیستمی با پسخور منفی اجرا شود نیاز است کنترلری با بهره منفی تعبیه شود.

۱.۵.۲ حالت `servo`

در این حالت در محیط `Simulink` مطابق شکل زیر ورودی پله ۵+ درصد و ۵- درصد روی مقدار مقرر اعمال می‌شود. (مقدار اولیه `setpoint` برابر 340 قرار داده شده است).

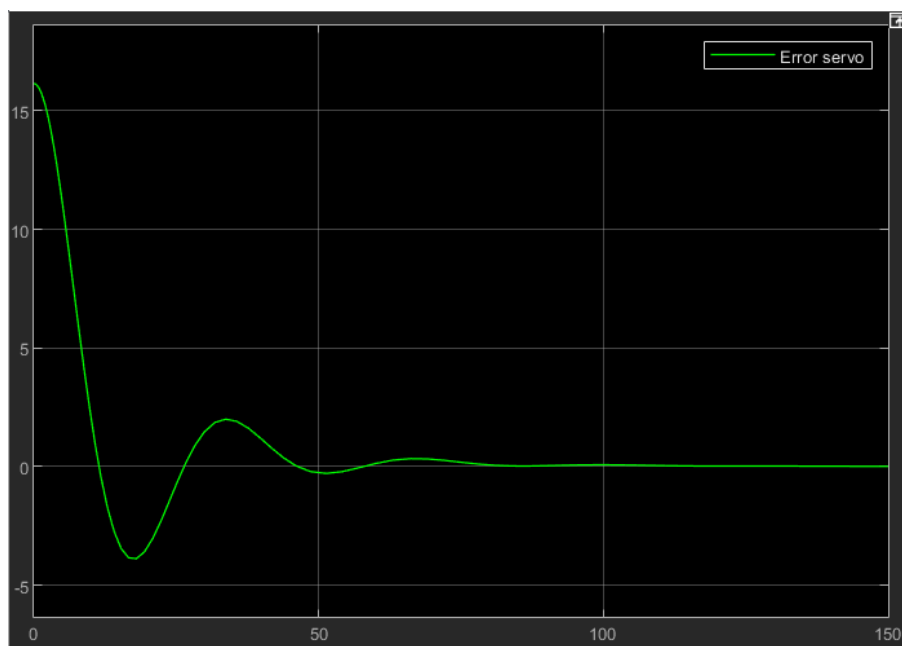


شکل (۱۴) - شمای حالت servo



شکل (۱۴) - نتیجه اجرای برنامه حالت servo

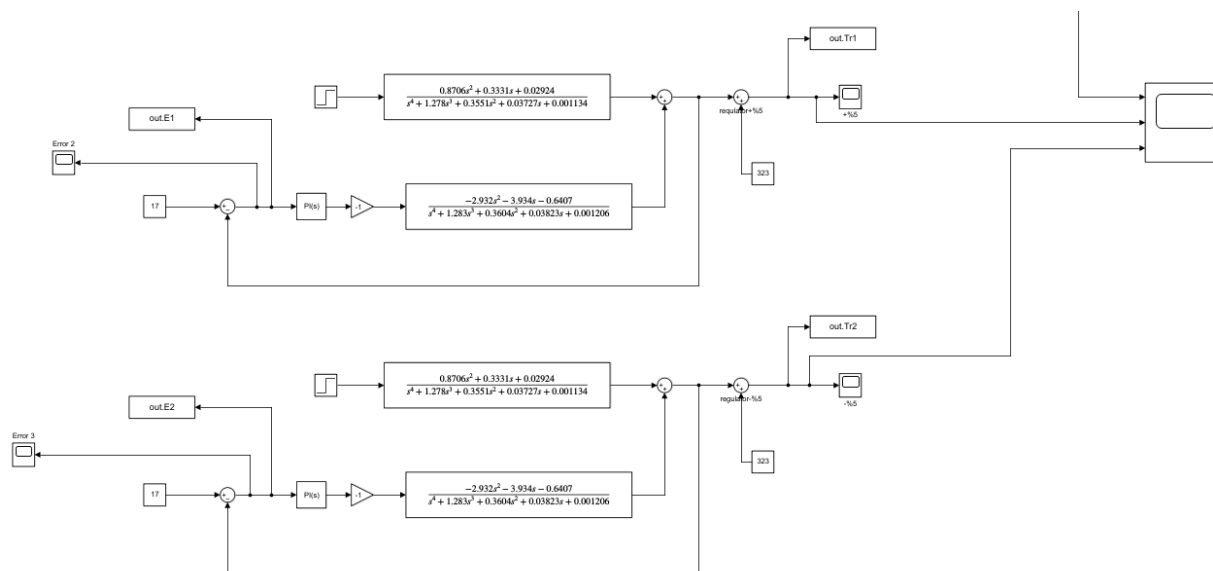
همانطور که قابل مشاهده است، کنترلر با مقادیر مطلوب بهره تناسبی و انتگرالی با تغییر مقدار setpoint مقدار خروجی را به این مقدار نزدیک می‌کند.



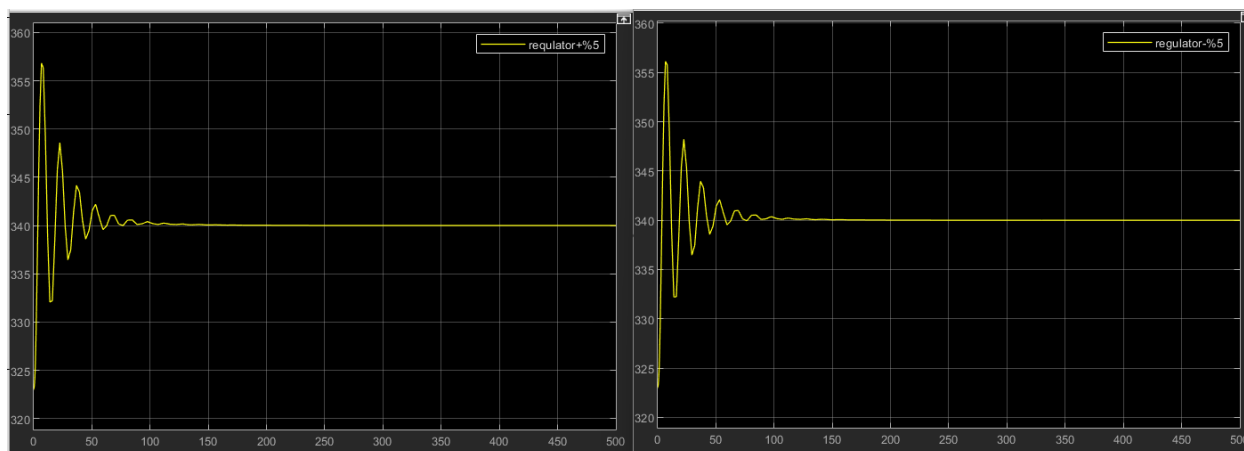
شکل (۱۵) - حداقل سازی مقدار خطای پسخور بوسیله طراحی بهینه کنترلر

۲.۵.۲ حالت regulator

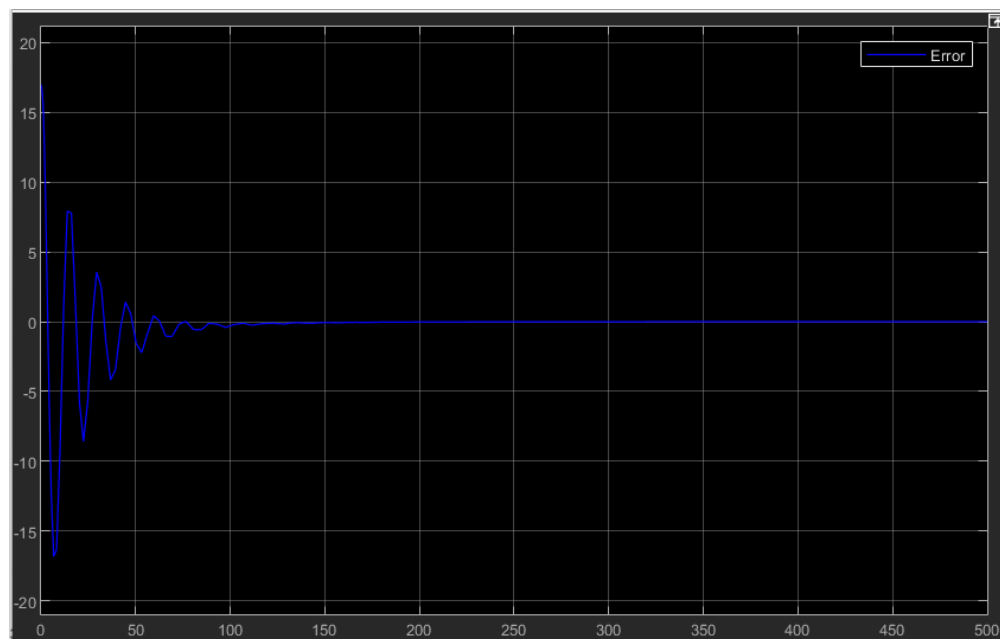
در این حالت در محیط Simulink مطابق شکل (۱۶) ورودی پله ۵+ درصد و ۵- درصد در متغیر اغتشاش اعمال می‌شود. (مقدار setpoint برابر ۳۴۰ قرار داده شده است و تغییری در setpoint اعمال نشده است).



شکل (۱۶) - شمای حالت servo



شکل (۱۷)- کنترل اثر اغتشاش را در خروجی توسط کنترلر

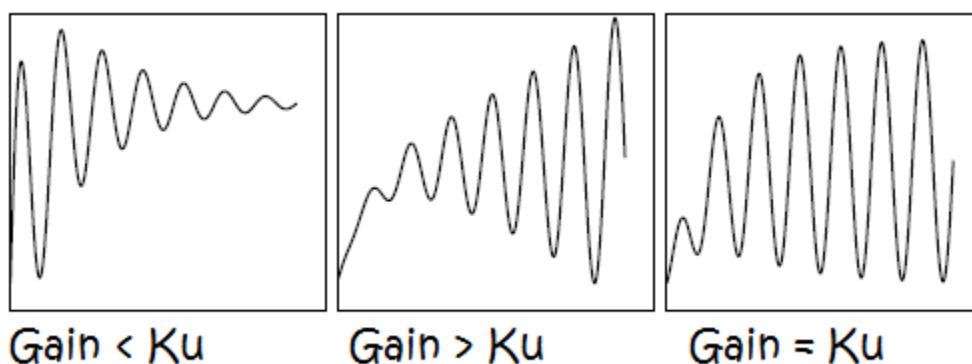


شکل (۱۸)- حداقل سازی مقدار خطای پسخور بوسیله طراحی بهینه کنترلر در حالت regulator

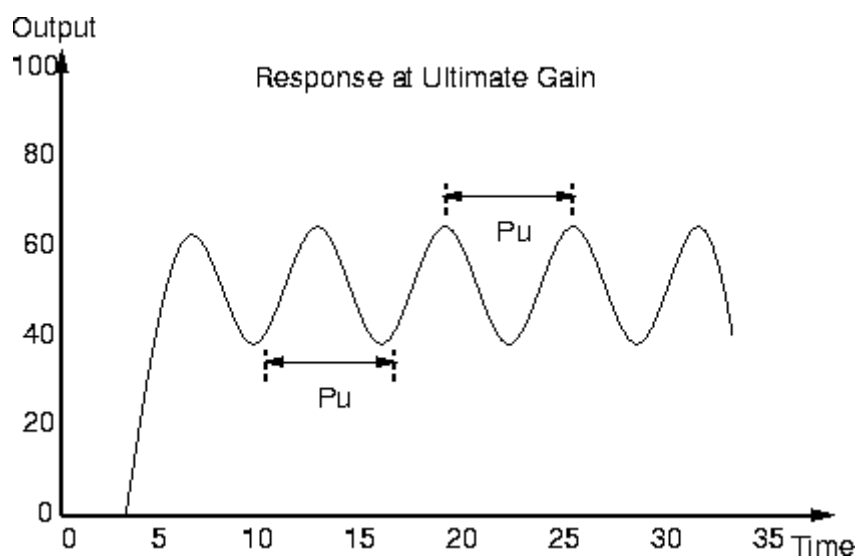
۶.۲ خواسته ۶

قسمت مشابه قسمت قبل در حالت servo و regulator انجام می‌شود. با این تفاوت که به جای کنترلر PI از کنترلر تناسبی استفاده خواهد شد و مقدار اولیه بهره تناسبی برابر مقدار بهینه بدست آمده از قسمت قبل قرار داده خواهد شد. سپس مقدار بهره را به آرامی

زیاد کرده تا جایی که سیستم در خروجی به نوسان دائم برسد. در این حالت بهره تناسبی برابر با بهره نهایی خواهد شد. از روی مشخصات این حالت نیز می‌توان مقدار زمان تناوب^۷ دائمی را یافت که برابر فاصله دو نقطه مشابه در دو تناوب متوالی است.

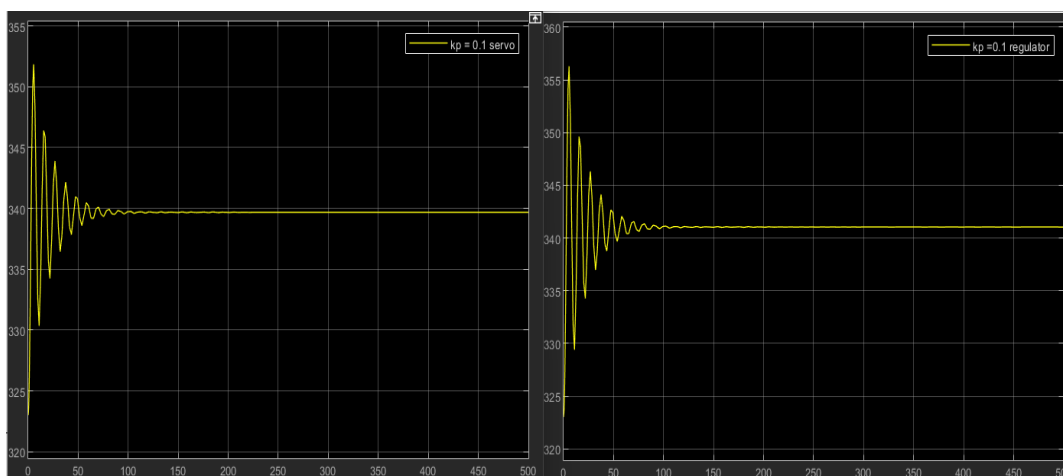


شکل (۱۹) - پاسخ نوسانی و بهره کنترلر بحرانی

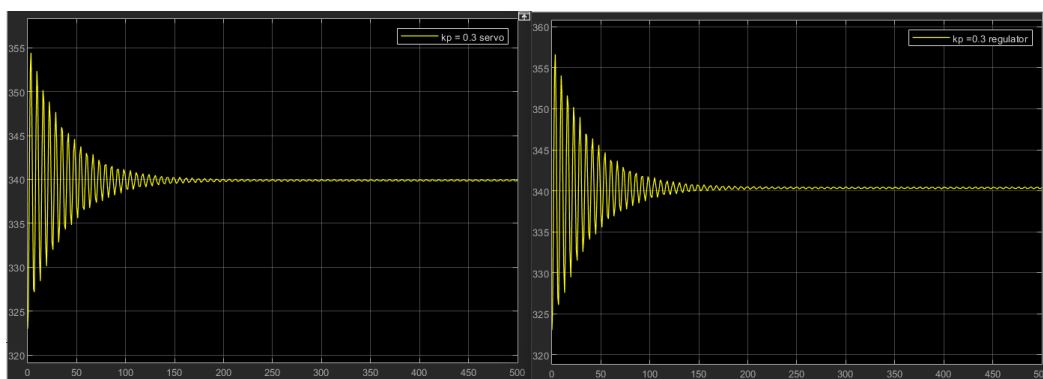


شکل (۲۰) - پاسخ نوسانی، زمان دوره دائمی و بهره کنترلر بحرانی

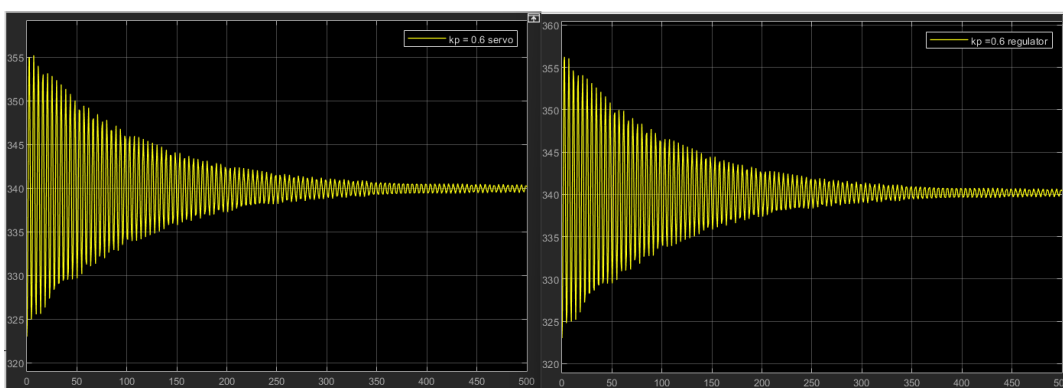
^۷ Period



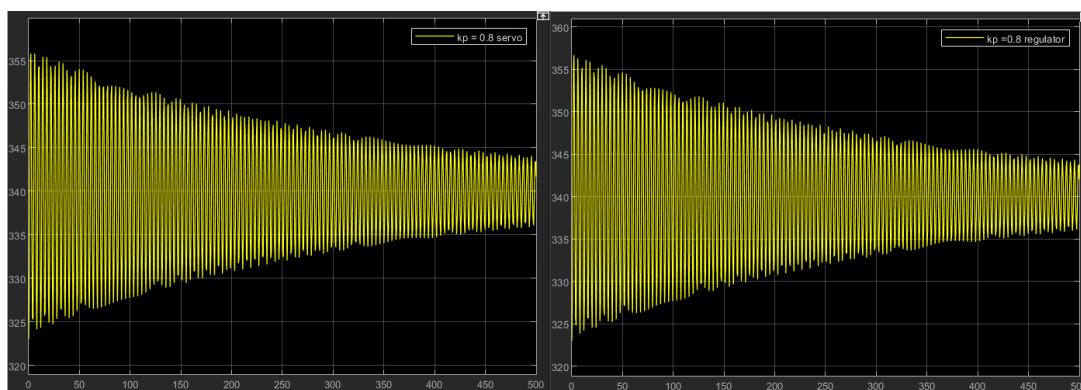
شکل (۲۱)- بهره تناسبی 0.1 برای حالت servo و regulator



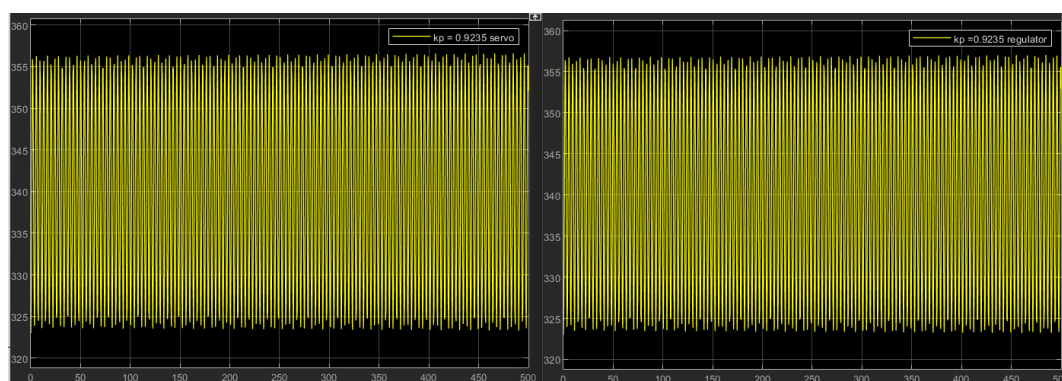
شکل (۲۲)- بهره تناسبی 0.3 برای حالت servo و regulator



شکل (۲۳)- بهره تناسبی 0.6 برای حالت servo و regulator

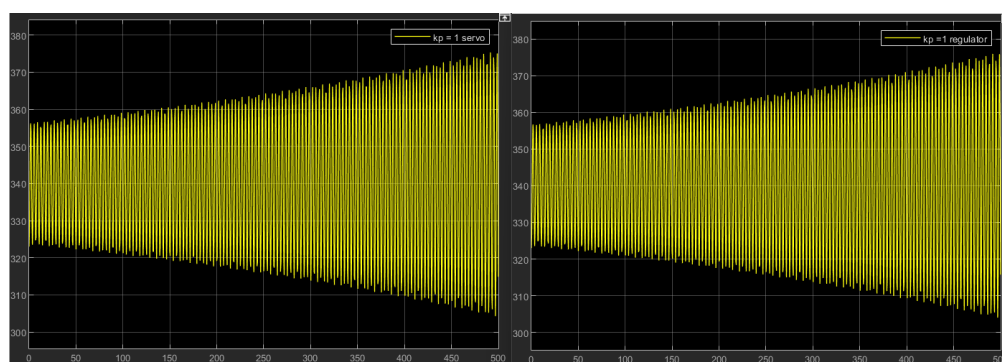


شکل (۲۴) - بهره تناسبی 0.8 برای حالت servo و regulator



شکل (۲۵) - بهره تناسبی 0.9235 برای حالت servo و regulator

همانطور که در شکل (۲۵) مشاهده می‌شود، خروجی به نوسان دائمی رسیده است و این بهره برابر بهره نهایی^۸ است.

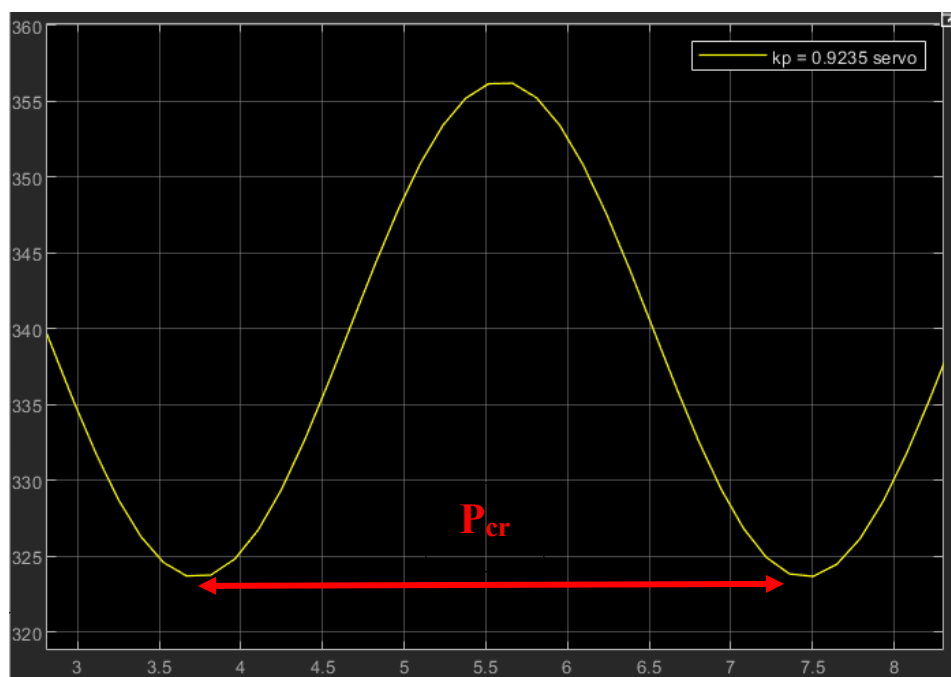


شکل (۲۶) - بهره تناسبی 1 برای حالت servo و regulator

در این حالت خروجی سیستم واگرا شده و از مقدار مقرر دور می‌شود.

⁸ Ultimate gain

حال در حالت نوسان دائم مقادیر بهره نهایی و زمان تناوب دائم محاسبه می‌شود تا با استفاده از روش زیگلر-نیکولز^۹ کنترلر را طراحی کنیم.



$$K_u = 0.9235 \quad , \quad P_{cr} = 7.45 - 3.7 = 3.75 \text{ s}$$

شکل (۲۶)- زمان تناوب دائم در مقدار بهره بحرانی

Controller type	K_P	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$1/1.2 P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

شکل (۲۷)- جدول زیگلر-نیکولز و پارامترهای مربوطه جهت طراحی کنترلر

بنابراین با توجه به شکل (۲۷)، برای کنترلر PI داریم:

$$K_p = 0.45 * 0.9235 = 0.415575 \quad (10)$$

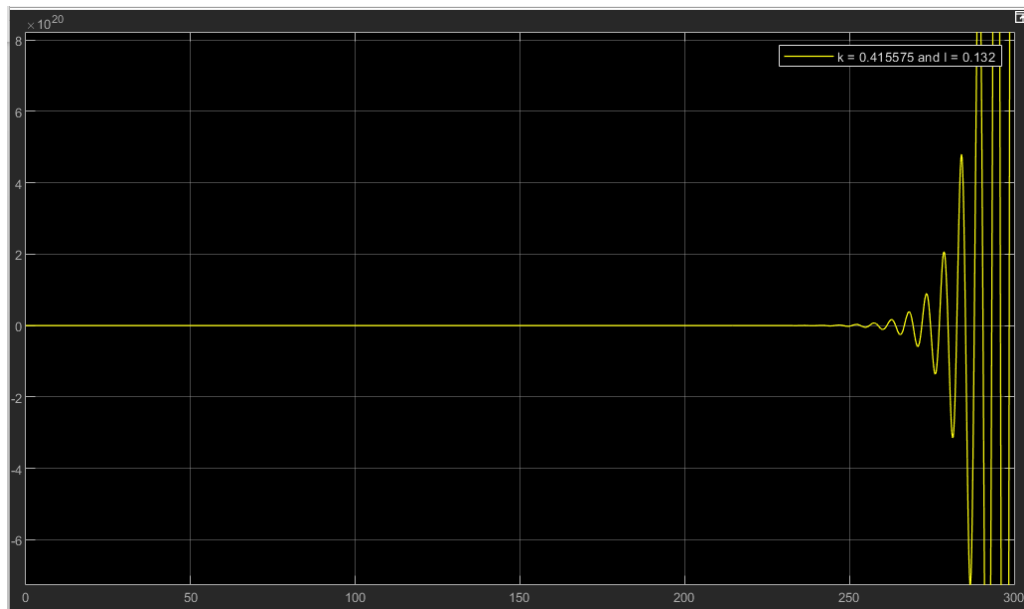
$$\tau_I = \frac{3.75}{1.2} = 3.125 \quad (11)$$

در محیط سیمولیک به جای زمان انتگرال از بهره انتگرالی استفاده شده است که از طریق زیر می‌توان آن را بدست آورد

^۹ Ziegler-Nichols

$$K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_{IS}}\right) = K_p + \frac{K_c}{\tau_{IS}} \rightarrow I = \frac{K_p}{\tau_{IS}} \rightarrow I = \frac{0.415575}{3.125} = 0.132984 \quad (12)$$

بنابراین برای کنترلر PI به روش زیگلر-نیکولز، پارامترهای بدست آمده فوق استفاده خواهد شد و نتیجه آن در شکل (۲۸) گزارش شده است.



شکل (۲۸) - واگرایی سیستم و دور شدن از مقدار مقرر^{۱۰} با استفاده از روش زیگلر-نیکولز

۳. نتیجه گیری

از قسمت سوم بخش نتیجه شد که افزایش دبی سیال خنک کننده اثر افزایش بر غلظت اجزاء A و B داشته و اثر کاهنده بر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده دارد.

همچنین در این بخش مشاهده شد کاهش دبی سیال خنک کننده اثر کاهنده بر غلظت اجزاء A و B داشته و اثر افزایش بر دمای محتویات راکتور و دمای سیال خنک کننده دارد.

در بخش چهارم مشاهده گردید که تابع انتقال فرایند دارای بهره‌ی منفی می‌باشد که به این خاطر است که تغییر دبی سیال خنک کننده اثر معکوس بر دمای محتویات راکتور دارد.

همچنین در این بخش بعد از مدل کردن سیستم با S-Function و تابع انتقال اندکی مشاهده شد که به علت خطا در طی عمل خطی‌سازی می‌باشد.

¹⁰ Set-Point

در بخش پنجم به منظور باقی ماندن سیستم در حالت پاسخور نتیجه شد که کنترلر باید دارای بهره منفی باشد. همچنین جهت طراحی بهینه کنترلر باید مقادیر بهره تناسبی و انتگرالی در حالت بهینه خود باشند تا میزان خطای پاسخور به حداقل ممکن برسد. نهایتاً در بخش ششم با توجه به مدل و توابع انتقال بدست آمده در بخش‌های سابق و نیز با بدست آوردن بهره نهایی کنترلر و زمان تناوب دائمی نتیجه گیری شد که در صورت استفاده از روش زیگلر- نیکولز جهت طراحی کنترلر PI سیستم از مقدار مقرر دور می‌شود و پایداری صورت نمی‌گیرد.

۴. منابع

[1]: George Ellis, *"Control system design guide"*, Chapter 6, 4th Edition.

[2]: دکتر احسان وفا، جزوه درس کنترل فرایندها، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۴۰۰.