



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پروژه درس کنترل فرایند

محمد همانلو

استاد درس: دکتر بزرگمهری

نیمسال اول ۱۴۰۱-۰۲

زمستان ۱۴۰۱

## فهرست مطالب

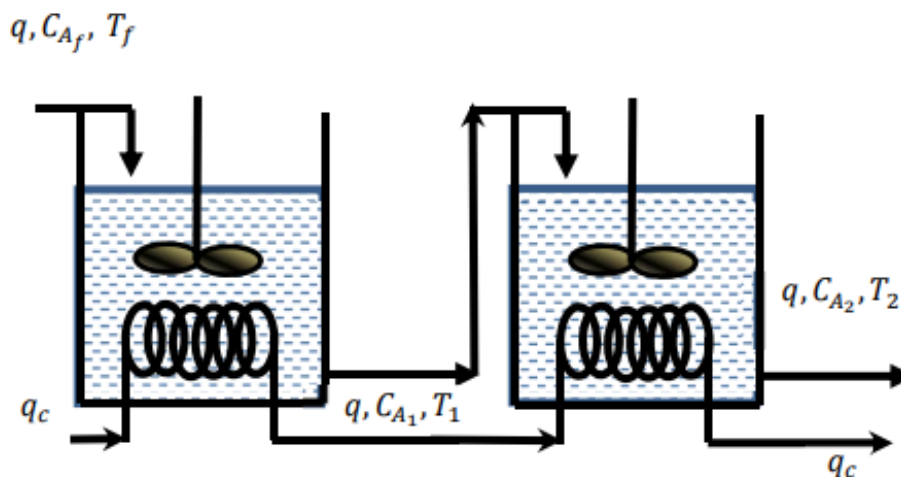
| صفحه | موضوع                 |
|------|-----------------------|
| ۲    | مقدمه                 |
| ۲    | شرح پروژه             |
| ۴    | خواسته ها             |
| ۴    | قسمت اول              |
| ۴    | متغیرهای steady-state |
| ۵    | روش اجرا              |
| ۶    | نتایج                 |
| ۸    | قسمت دوم              |
| ۸    | روش اجرا              |
| ۹    | نتایج                 |
| ۹    | قسمت سوم              |
| ۹    | حالت servo            |
| ۱۱   | حالت regulatory       |
| ۱۴   | فایل های ضمیمه گزارش  |

## مقدمه

راکتور محل انجام واکنش های شیمیایی و یا هسته ای است که در آن مواد خام اولیه به محصولات نهایی تبدیل میشود. راکتورها انواع مختلفی دارند که از جمله آنها میتوان به راکتورهای پیوسته، ناپیوسته، بستر سیال، بستر ثابت، لوله ای و ... اشاره کرد. واکنش های شیمیایی که درون راکتورها رخ میدهد میتوانند حساس به دما، فشار، غلظت و پارامترهای دیگر باشند و به همین جهت کنترل متغیرهای مختلف که بر روی رفتار واکنش درون راکتور تاثیر میگذارند، اهمیت دارد. در این پروژه سعی میشود با استفاده از چند پارامتر، رفتار متغیرهای مختلف راکتور را پیشبینی کرد و در قدم بعدی بصورت servo و یا regulatory متغیرهای مورد نظر را درون راکتور کنترل کرد.

## شرح پروژه

دو راکتور CSTR بصورت موازی به هم متصل هستند و ماده ی A به ماده B در یک واکنش گرمازا و درجه اول تبدیل میشود. متغیرهای حالت مقادیر غلظت و دمای درون هر کدام از راکتورها است که با فرض همزدگی کامل راکتور میتوان دما و غلظت درون راکتور را برابر با خروجی آن گرفت. همچنین ورودی های سیستم مقادیر دبی خوراک، دبی سیال سرویس، غلظت خوراک و دمای خوراک می باشد.



همچنین داده های مسئله در جدول ۱ قابل مشاهده است:

Table 1- Parameters and operating condition of the System

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| $q = 100 \frac{\text{lit.}}{\text{min.}}$     | $V_1 = V_2 = 100 \text{lit.}$   | $\rho = \rho_c = 1000 \frac{\text{g}}{\text{lit.}}$ | $C_{A_{2ss}} = 0.005 \frac{\text{mol.}}{\text{lit.}}$ |
| $C_{A_f} = 1 \frac{\text{mol.}}{\text{lit.}}$ | $hA_1 = hA_2 = 1.67 \times 10^5 \frac{\text{j}}{\text{min.}^\circ\text{K}}$ | $\frac{E}{R} = 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$         |   |
| $T_f = 350^\circ\text{K}$                     | $C_p = C_{p_c} = 0.239 \frac{\text{j}}{\text{g}^\circ\text{K}}$             | $k_0 = 7.2 \times 10^{10} \frac{1}{\text{min.}}$    |   |
| $T_{c_f} = 350^\circ\text{K}$                 | $(-\Delta H) = 4.78 \times 10^4 \frac{\text{j}}{\text{mol.}}$               | $q_{c_{max}} = 500 \frac{\text{lit.}}{\text{min.}}$ |   |

معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم نیز بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{A_1}}{dt} &= \frac{q}{V_1} (C_{A_f} - C_{A_1}) - k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT_1}\right) C_{A_1} \\ \frac{dT_1}{dt} &= \frac{q}{V_1} (T_f - T_1) - \frac{k_0(-\Delta H)C_{A_1}}{\rho C_p} \exp\left(\frac{-E}{RT_1}\right) + \frac{\rho_c C_{p_c}}{\rho C_p V_1} q_c \left[1 - \exp\left(\frac{-hA_1}{\rho_c C_{p_c} q_c}\right)\right] (T_{c_f} - T_1) \\ \frac{dC_{A_2}}{dt} &= \frac{q}{V_1} (C_{A_1} - C_{A_2}) - k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT_2}\right) C_{A_2} \\ \frac{dT_2}{dt} &= \frac{q}{V_2} (T_1 - T_2) - \frac{k_0(-\Delta H)C_{A_2}}{\rho C_p} \exp\left(\frac{-E}{RT_2}\right) + \frac{\rho_c C_{p_c}}{\rho C_p V_2} q_c \left[1 - \exp\left(\frac{-hA_2}{\rho_c C_{p_c} q_c}\right)\right] \left[T_1 - T_2 + \exp\left(\frac{-hA_1}{\rho_c C_{p_c} q_c}\right) (T_{c_f} - T_1)\right] \end{aligned}$$

توجه شود که در معادله ی دوم و چهارم علامت پشت  $k_0$  مثبت است و علامت منفی باید به مثبت تغییر پیدا کند.

## خواسته ها

خواسته های مسئله در سه قسمت تعریف شده است:

۱. پاسخ مدار باز سیستم (یا همان تغییرات در متغیرهای حالت) را برای زمانی که هرکدام از متغیرهای ورودی با یک تابع پله به اندازه ۱۰ درصد کاهش و یا افزایش یابد.
۲. تنظیم کنترلر از نوع تناسبی انتگرالی به نحوی که مقدار غلظت راکتور دوم (که همان غلظت محصول نهایی به حساب می آید) با استفاده از تغییر دبی سیال سرویس در مقدار مورد نظر نگه داشته شود.
۳. استفاده از کنترلر تنظیم شده برای ۲ حالت زیر:  
حالت Servo: تغییر در مقدار مطلوب غلظت راکتور دوم.  
حالت Regulatory: همان حالت قسمت اول خواسته ها.

## قسمت اول

برای حل مسئله از متلب و سیمولینک استفاده خواهیم کرد. برای حل میتوان سه روند را پیش گرفت: ۱. خطی سازی برای استفاده از توابع انتقال ۲. استفاده از s-function ۳. استفاده از MATLAB-function. روند این گزارش بر اساس روش دوم یعنی s-function خواهد بود.

### متغیرهای steady-state

برای حل مسئله به متغیرها در حالت پایا نیاز است و تفاوتی هم بین سه روش ذکر شده وجود ندارد. چرا که برای حل هر کدام از روندهای فوق یا به مقدار اولیه متغیرهای حالت نیاز است و یا متغیرهای انحرافی. در هر دو به معنای نیاز به مقادیر متغیر حالت در وضعیت steady-state است.

برای پیدا کردن مقدار اولیه متغیرهای حالت از معادلات دیفرانسل حاکم بر مسئله در حالت پایا استفاده میشود. مقدار غلظت اولیه در راکتور دوم  $C_{A2,ss}$  داده شده است اما مقدار دبی سیال سرویس  $q_c$  نامشخص است. پس همچنان ۴ معادله و ۴ مجهول وجود دارد که میتوان با استفاده از تابع fsolve در متلب مقادیر را پیدا کرد. تابع fsolve عموماً برای پیدا کردن جواب های دستگاه های معادلات غیرخطی استفاده می شود.

در معادلات دیفرانسیل در حالت پایا ترم های سمت چپ معادله که به فرم  $dx/dt$  هستند همگی صفر میشوند زیرا در حالت پایا تغییر نسبت به زمان نداریم و همچنین متغیرهای حالت یعنی  $T_1, T_2, C_{A1}, C_{A2}, T_{1,ss}, T_{2,ss}, C_{A1,ss}, C_{A2,ss}$  تبدیل میشوند.

از دو فایل StStFun.m و StSt.m برای حل معادلات استفاده میکنیم. نتایج نهایی بصورت زیر است:

$$C_{A1,ss} = 0.0853 \text{ mol/lit}$$

$$T_{1,ss} = 441.94 \text{ K}$$

$$T_{2,ss} = 449.97 \text{ K}$$

$$q_{c,ss} = 99 \text{ lit/min}$$

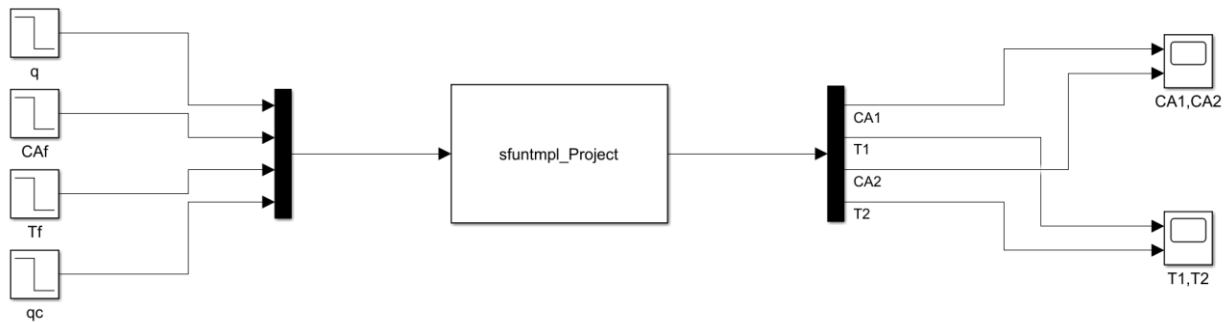
- دمای راکتور به دلیل گرمازا بودن واکنش بیشتر از مقدار دمای خوراک ورودی است.
- غلظت ماده واکنش دهنده در راکتور اول از راکتور دوم بیشتر است.
- مقدار دبی سیال سرویس از ۵۰۰ لیتر بر دقیقه بیشتر نباشد.

مشاهده میشود که موارد فوق همگی در جواب ها رعایت شده اند.

## روش اجرا

معادلات دیفرانسیلی در فایل eqs.m نوشته شده اند و خروجی آن و همچنین مقادیر بدست آمده در فوق در فایل sfuntmpl\_Project.m وارد شده اند تا بتوان در محیط سیمولینک از آن استفاده کرد.

بلوک دیاگرام قسمت اول به شکل زیر خواهد بود:

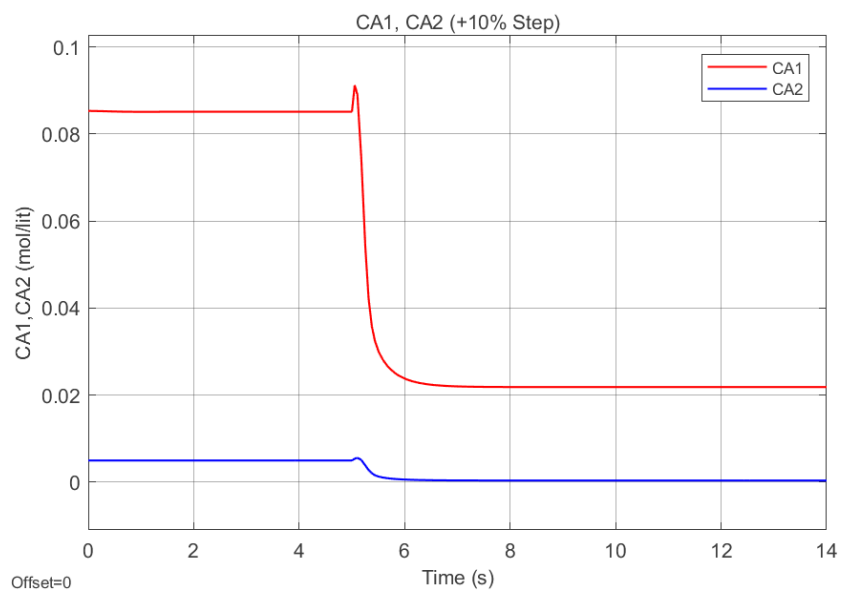


شکل ۱- دیاگرام بخش اول سوال

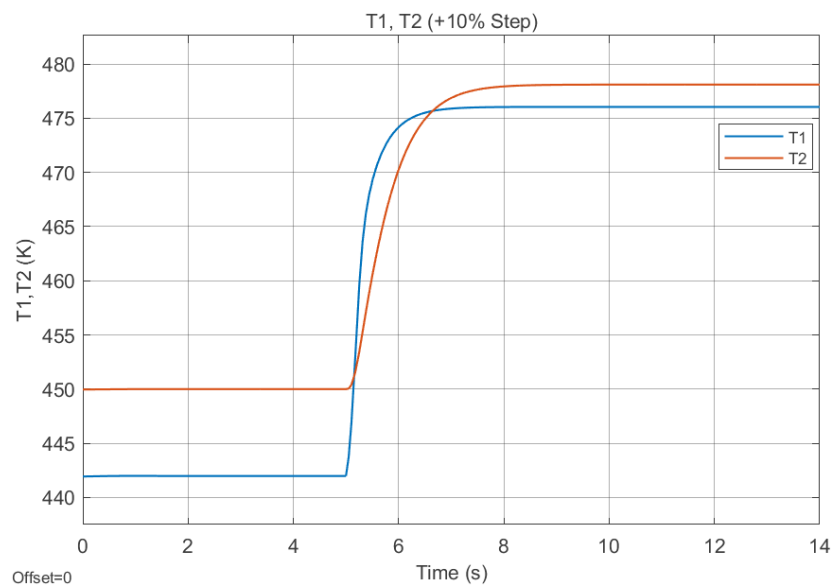
شکل فوق همان نمایشگر سیستم مدار باز است که ورودی های سمت چپ بصورت تابع پله در ثانیه ۵ ام اعمال می شوند. دلیل تاخیر ۵ ثانیه ای اعمال تابع پله این است که محاسبات مربوط به متلب در لحظات ابتدایی کمی خطا داشته که با گذر اندکی زمان رفع میشوند. در صفحه بعد نتایج برای اعمال تابع پله ۱۰+ و ۱۰- درصدی بر روی تمام ورودی آورده شده است، اما میتوان نتایج را با هر جایگشتی از ورودی و مقدار مثبت یا منفی ۱۰ درصد تغییر پله ای انجام داد.

## نتایج

برای پله ۱۰ درصد افزایشی:

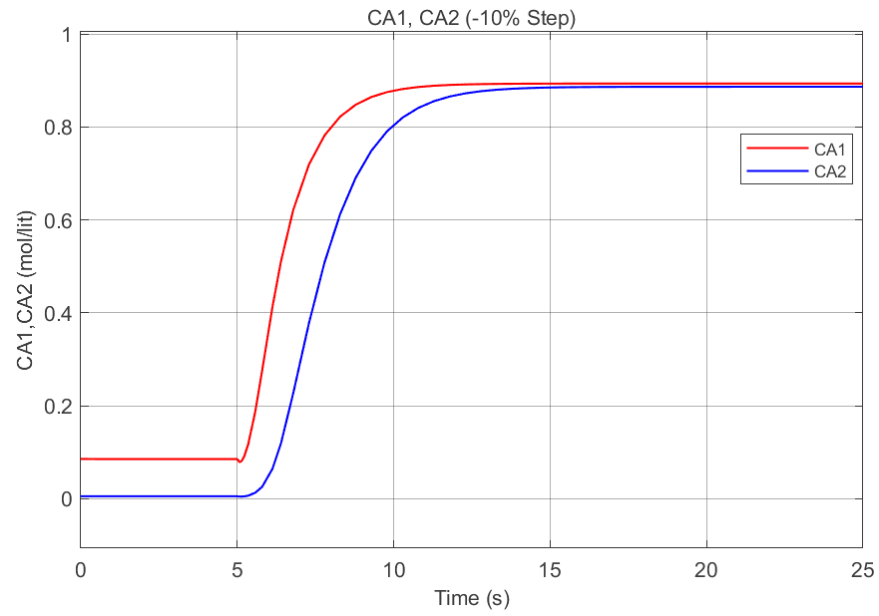


شکل ۲- غلظت خروجی راکتورها با افزایش ۱۰ درصدی مقادیر ورودی

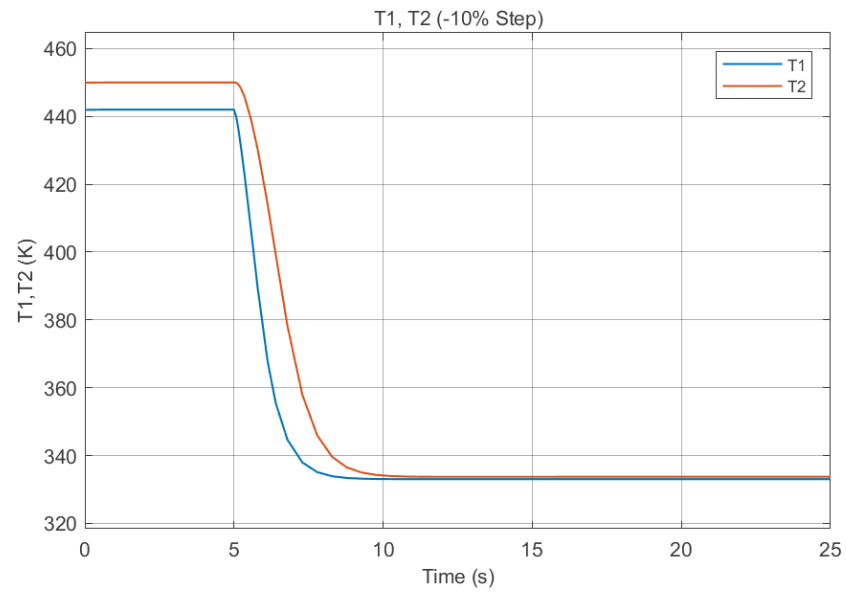


شکل ۳- دمای خروجی راکتورها با افزایش ۱۰ درصدی مقادیر ورودی

برای پله ۱۰ درصدی کاهشی:



شکل ۴- غلظت خروجی راکتورها با کاهش ۱۰ درصدی مقادیر ورودی



شکل ۵- دمای خروجی راکتورها با کاهش ۱۰ درصدی مقادیر ورودی



## قسمت دوم

در قسمت دوم یک کنترلر با مشخصات مناسب برای کنترل سیستم خواسته شده است. روش های تنظیم کنترل متعددی وجود دارد. مانند زیگلر-نیکولز، کوهن-کان و... اما در این پروژه از روش Performance Index برای تنظیم کنترلر استفاده می شود.

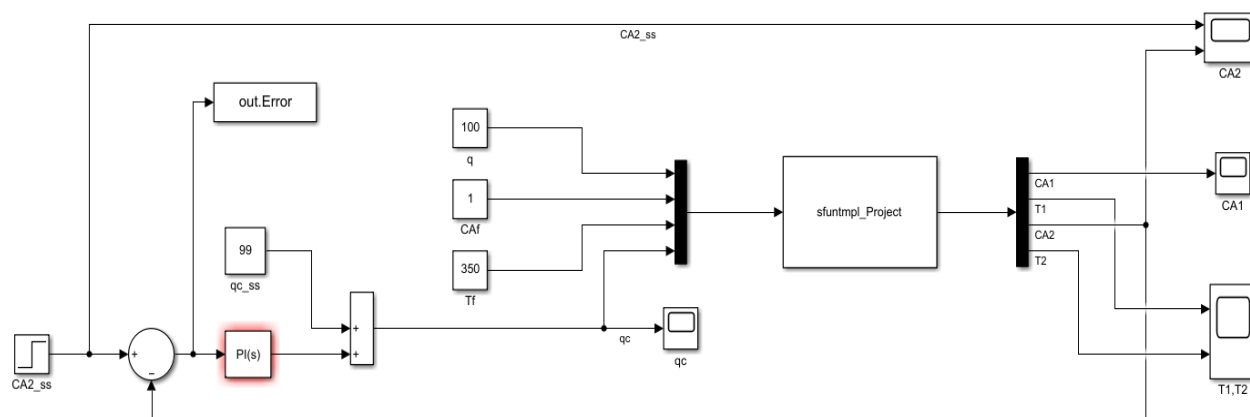
در روش شاخص عملکرد هدف بهینه سازی یک تابع هدف است. توابع هدف در این روش متعدد هستند. از جمله آنها میتوان به انتگرال مربع خطا، انتگرال قدر مطلق خطا و انتگرال زمان در قدر مطلق خطا اشاره کرد. تابع هدف در این پروژه انتگرال مربع خطا خواهد بود.

## روش اجرا

برای این منظور باید مقدار خطا در هر زمان مشخص باشد و سپس بصورت عددی انتگرال مربع خطا نسبت به زمان گرفته شود. این انتگرال گیری با استفاده از تابع trapz صورت میگیرد. سپس با استفاده از تابع fminsearch مقدار این انتگرال را با استفاده از تغییر پارامترهای کنترلر یعنی  $k_p$  و  $k_i$  کمینه میکنیم. در نهایت مقادیری که پس از اجرای این مراحل برای پارامترهای کنترلر بدست می آید را ثبت میکنیم. همچنین خطا هم از فایل سیمولینک بصورت آنلاین وارد فایل اجرایی متلب میشود.

لازم به ذکر است که برای تحریک سیستم از تابع پله ۱۰ درصد افزایش بر روی مقدار مقرر غلظت راکتور دوم در ثانیه ۱۰ استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحریک توانایی مهار کردن اغتشاشات در قسمت سوم مسئله را خواهد داشت.

بلوک دیاگرام مربوط به قسمت دوم بصورت زیر خواهد بود:



شکل ۶- دیاگرام سیستم مدار بسته قسمت دوم

همانطور که در دیاگرام بالا نیز مشاهده میشود، کنترلر به وسیله تغییر دبی سیال سرویس یا همان  $q_c$  صورت میگیرد. مقدار اختلاف غلظت راکتور دوم با مقدار مقرر آن ( $CA_2 - CA_{2,ss}$ ) تحت عنوان خطا به کنترلر داده میشود و سپس مقدار انحرافی خروجی از کنترلر با مقدار اولیه دبی سیال سرویس جمع میشود تا خروجی کنترلر از حالت انحرافی خارج شده و بتواند وارد محاسبات مربوطه در s-function شود.

## نتایج

با اجرای فایل PI\_Tune.m که از تابع تعریف شده در فایل obj\_fun.m استفاده میکند، مقادیر پارامترهای کنترلر تناسبی-انتگرالی بصورت زیر خواهد بود:

$$K_{p,optimal} = 1831$$

$$K_{i,optimal} = 6390$$

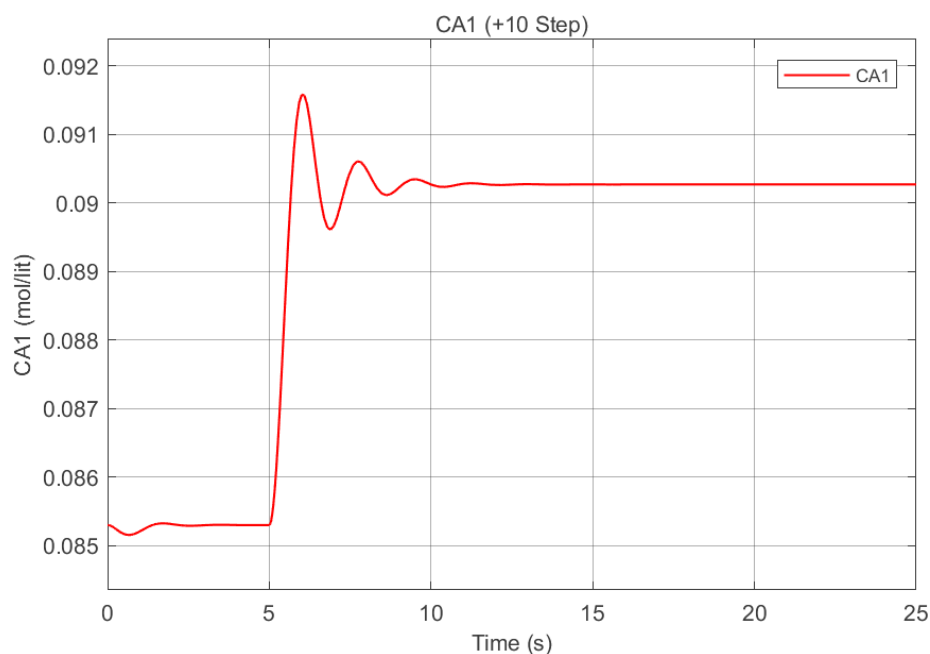
از مقادیر فوق در کنترلر قسمت سوم استفاده خواهیم کرد.

## قسمت سوم

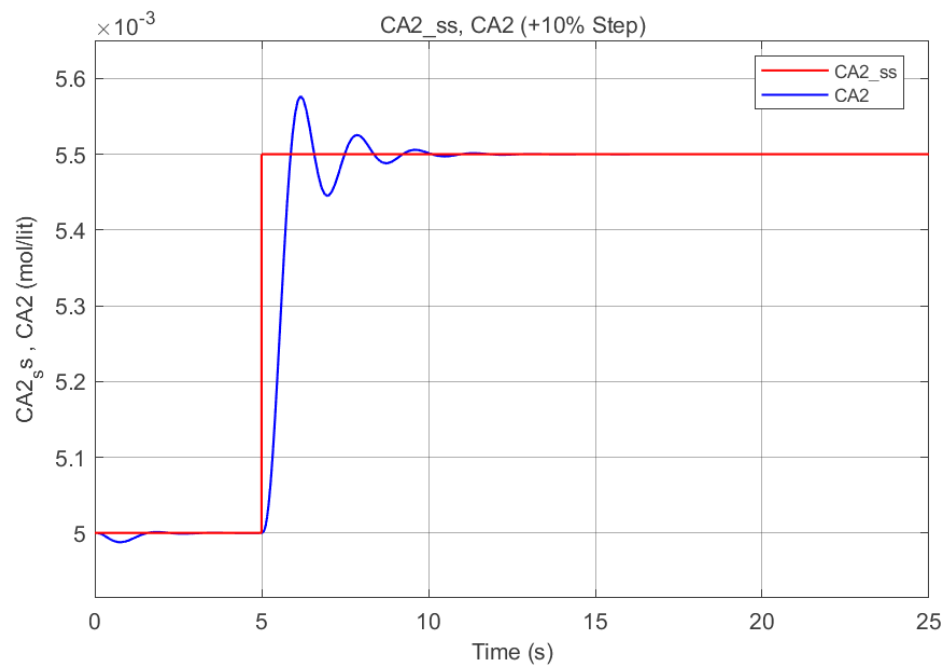
در این قسمت از کنترلر تنظیم شده در قسمت قبل استفاده میشود تا سیستم را در مودهای مختلف قرار داده و نحوه پاسخ سیستم به تحریکات مختلف بررسی شود.

### حالت servo

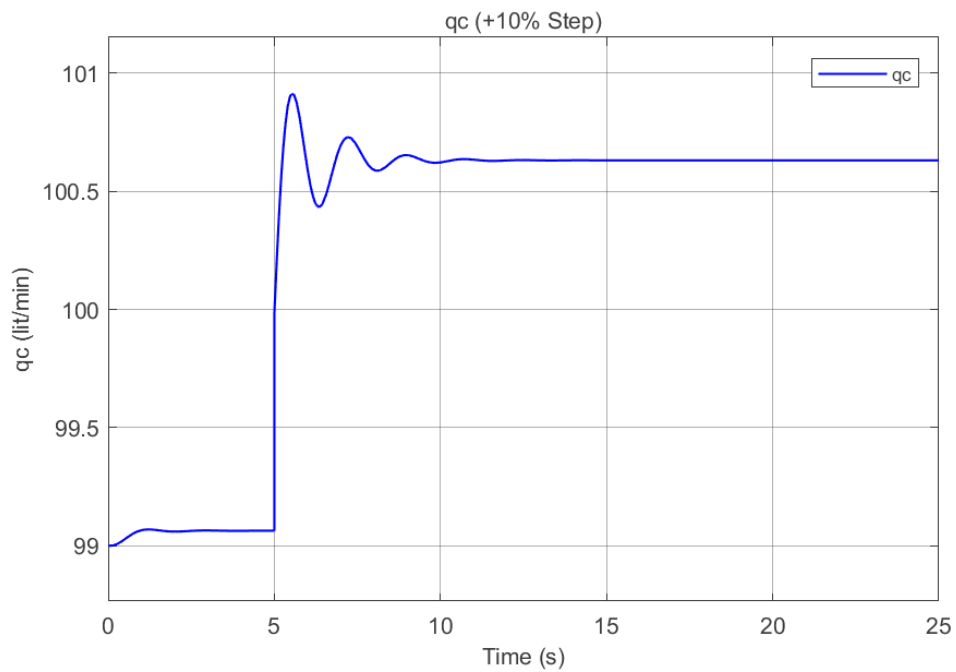
در این حالت مقادیر ورودی دچار تحریک نمیشوند و در مقدار مقرر یا همان set point تغییر ایجاد میشود. در اینجا بر روی  $C_{A2,ss}$  تغییر پله ۱۰ درصدی رخ میدهد. نتایج مربوط به پله ۱۰ درصد افزایشی بصورت زیر است:



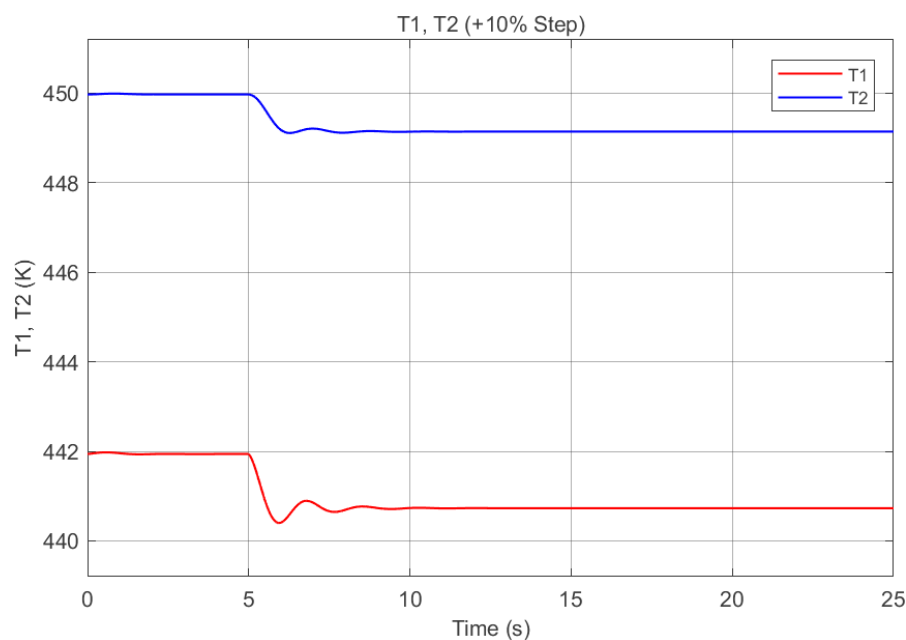
شکل ۷- غلظت راکتور اول در حالت servo



شکل ۸- غلظت راکتور دوم در حالت servo



شکل ۹- دبی سیال سرویس در حالت servo



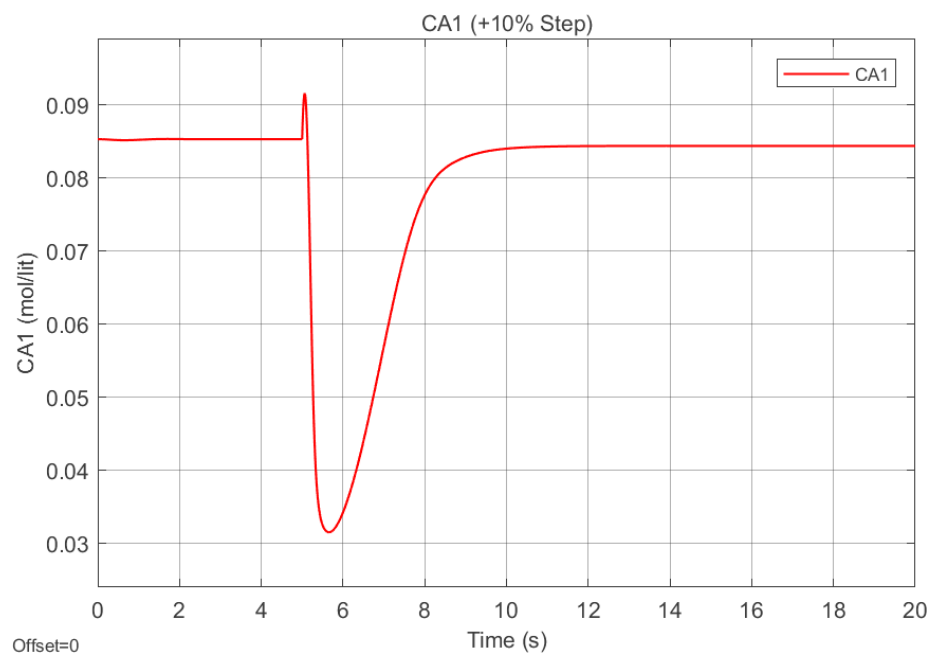
شکل ۱۰- دمای دو راکتور در حالت servo

برای تمام موارد بالا میتوان از پله ۱۰ درصد کاهشی نیز استفاده کرد که نتایج آن در این گزارش آورده نشده است اما داخل فایل سیمولینک Part3\_servo.slx قابل دسترسی هستند.

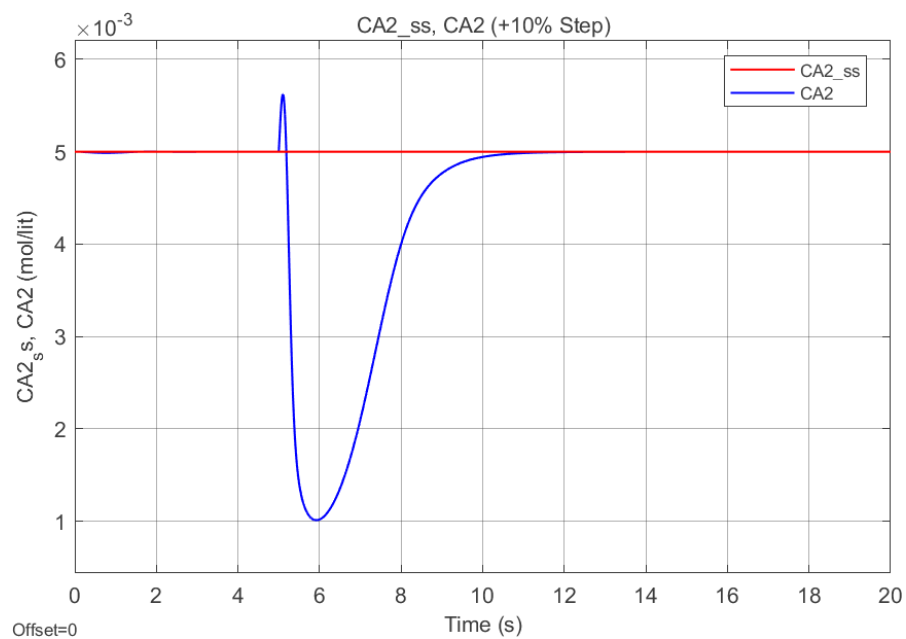
## حالت regulatory

در این حالت مقدار مقرر ثابت می ماند و این ورودی های سیستم هستند که دچار تحریک میشوند. برای شکل های ۱۱ تا ۱۴ رفتار سیستم برای افزایش مقادیر ورودی به اندازه ۱۰ درصد با استفاده از تابع پله آورده شده است.

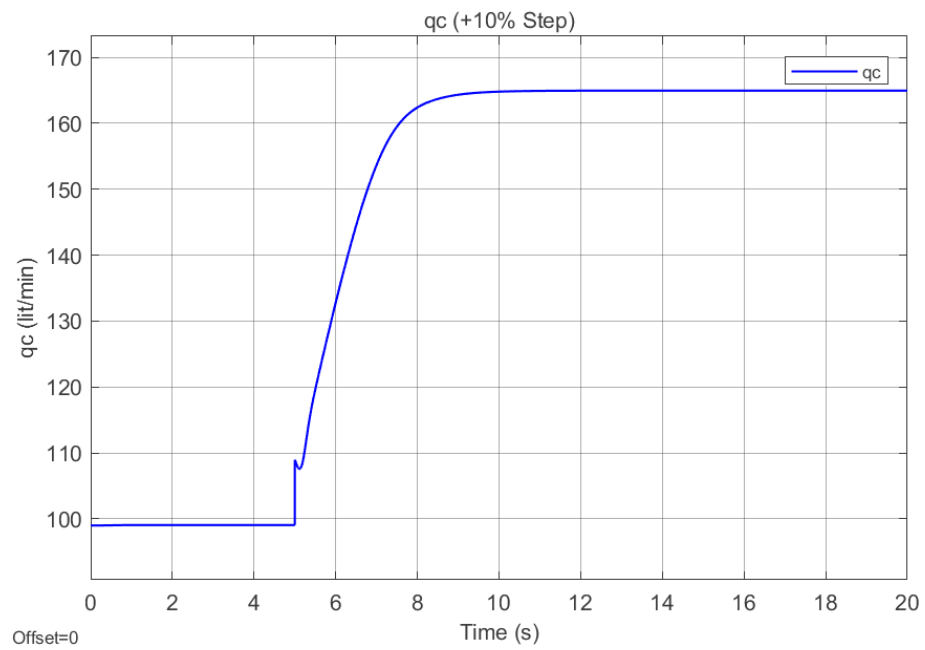
برای تمام موارد زیر میتوان از پله ۱۰ درصد کاهشی نیز استفاده کرد که نتایج آن صرفا در گزارش آورده نشده است ولی در فایل سیمولینک Part3\_regulatory.slx در دسترس هستند.



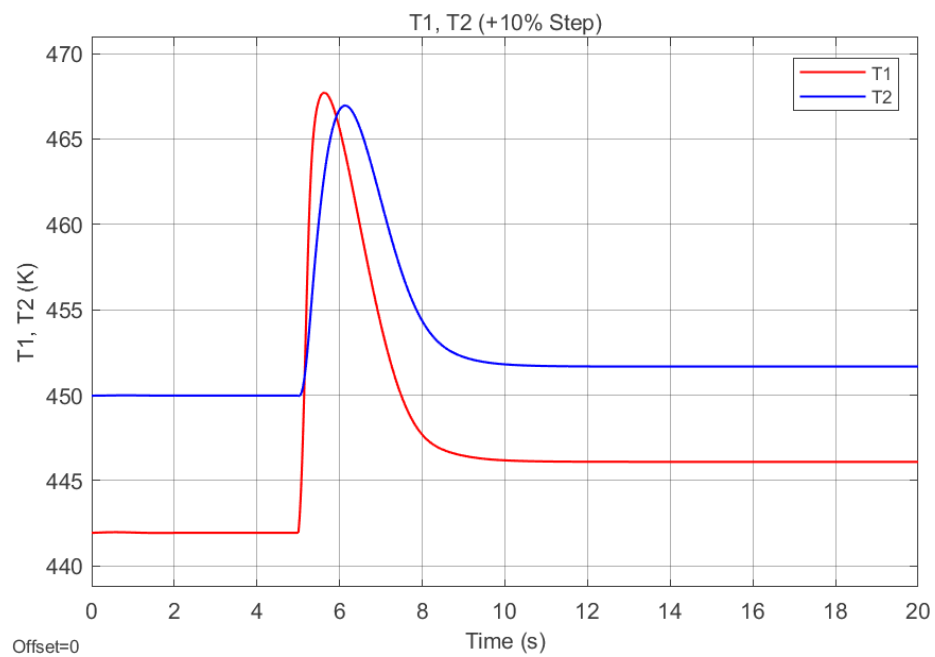
شکل ۱۱- غلظت راکتور اول در حالت regulatory



شکل ۱۲- غلظت راکتور دوم در حالت regulatory



شکل ۱۳- دبی سیال سرویس در حالت regulatory



شکل ۱۴- دمای دو راکتور در حالت regulatory

مشاهده میشود که در همه حالات و هر دو مود سیستم به پایداری میرسد که این به معنی مناسب بودن کنترلر تنظیم شده برای تغییرات اعمال شده روی سیستم است.

## فایل های ضمیمه گزارش

راهنمای محتوای فایل های اجرایی سیمولینک و متلب

| نام فایل           | قسمت<br>مربوطه | توضیحات   |
|--------------------|----------------|---|
| sfuntmpl_Project.m | اول            | تمپلیت اس-فانکشن. معادلات مربوطه در فایل eqs.m قرار دارد.   |
| eqs.m              | اول            | شامل تابع که خروجی آن دستگاه معادلات دیفرانسیل است و برای حل وارد اس-فانکشن میشود.                        |
| StStFun.m          | اول            | شامل تابع که خروجی آن معادلات حالت پایا است و برای پیدا کردن مقادیر اولیه در فایل StSt.m فراخوانده میشود. |
| StSt               | اول            | محاسبه ی مقادیر اولیه متغیرهای حالت با استفاده از تابع StStFun.m  |
| Part1.slx          | اول            | فایل سیمولینک قسمت اول.   |
| PI_Tune.m          | دوم            | بهینه سازی تابع هدف و پیدا کردن پارامترهای کنترلر.  |
| obj_fun.m          | دوم            | تابع هدف.   |
| Part2.slx          | دوم            | فایل سیمولینک قسمت دوم که داده های آن به فایل متلب منتقل شده و پردازش میشوند.                             |
| Part3_servo        | سوم            | حالت servo به همراه کنترلر تنظیم شده.   |
| Part3_regulatory   | سوم            | حالت regulatory به همراه کنترلر تنظیم شده.  |