

به نام خدا



عنوان گزارش: تحلیل سیستم غیر خطی زیستی و طراحی کنترلر با استفاده از “MATLAB”

استاد:

دکتر سید محمود رضا پیشوایی

گردآورنده:

محمد ده بزرگی

403204831

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

نمیسال اول 1403

**چکیده:** در این گزارش، فرآیند مدل سازی یک سیستم زیستی غیرخطی و طراحی کنترلرهای مختلف برای کنترل آن بررسی شده است. ابتدا معادلات دیفرانسیل غیرخطی سیستم مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از نرم افزار **MATLAB** خطی سازی حول نقطه تعادلی انجام شد. سپس تحلیل فضای حالت، محاسبه ماتریس های  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  و تبدیل مدل به تابع انتقال به منظور درک بهتر دینامیک سیستم صورت گرفت. در ادامه، شبیه سازی سیستم و طراحی کنترلرهای پس خور و پیش خور در محیط **Simulink** به منظور بررسی پاسخ سیستم به ورودی های مختلف انجام شد. عملکرد کنترلر دو درجه آزادی نیز شبیه سازی و با کنترلر فیدبک مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از کنترلرهای پیش خور-پس خور باعث بهبود عملکرد سیستم در حذف اغتشاشات و کاهش زمان نشست می شود.

**مقدمه:** سیستم های زیستی و فرآیندهای بیوشیمیایی نقش حیاتی در صنایع مختلف از جمله داروسازی، تولید مواد غذایی، و فرآیندهای زیست فناوری دارند. این سیستم ها به دلیل واکنش های پیچیده بیوشیمیایی و ماهیت غیرخطی خود، با چالش های خاصی در مدل سازی، شبیه سازی و طراحی سیستم های کنترلی مواجه هستند. یکی از مثال های بارز این سیستم ها، راکتورهای تخمیری است که در تولید محصولات مهمی مانند آنتی بیوتیک ها، هورمون های انسانی و سایر ترکیبات مفید استفاده می شوند. این فرآیندها نه تنها به دلیل تعاملات پیچیده میان میکروارگانیسم ها و محیط شان، بلکه به دلیل شرایط عملیاتی متغیر و عدم قطعیت های ذاتی، نیاز به کنترل پیشرفته دارند.

در طراحی سیستم های کنترلی برای فرآیندهای زیستی، خطی سازی مدل های غیرخطی حول نقطه تعادلی، یک گام اساسی برای تحلیل و طراحی کنترلرهای کلاسیک و مدرن محسوب می شود. این روش امکان بررسی پاسخ سیستم به تغییرات کوچک و طراحی کنترلرهای مناسب برای کنترل دقیق و پایدار سیستم را فراهم می کند. در این گزارش، ابتدا یک مدل غیرخطی از سیستم زیستی مورد بررسی تعریف شده و سپس با استفاده از تحلیل فضای حالت، خطی سازی حول نقطه تعادلی انجام می شود. تبدیل این مدل خطی شده به تابع انتقال نیز به درک بهتر دینامیک سیستم کمک می کند.

پس از تحلیل دینامیک سیستم، طراحی کنترلرهای پس خور و پیش خور مورد بررسی قرار می گیرد. کنترلرهای پس خور برای حفظ پایداری سیستم و کنترل تغییرات خروجی استفاده می شوند، در حالی که کنترلرهای پیش خور به منظور پیش بینی و جبران تأثیر اغتشاشات خارجی طراحی شده اند. ترکیب این دو نوع کنترلر به ایجاد سیستم های کنترلی با دو درجه آزادی منجر می شود که می تواند در کاهش زمان نشست و بهبود پاسخ

سیستم به اغتشاشات موثر باشد. در این مطالعه، شبیه‌سازی پاسخ سیستم به تغییرات ورودی و اغتشاشات با استفاده از MATLAB و Simulink انجام شده و نتایج به دست آمده برای ارزیابی عملکرد کنترلرهای طراحی شده تحلیل شده‌اند.

در نهایت، برای مقایسه عملکرد کنترلرهای مختلف، از ورودی‌های پله‌ای و تغییرات نرخ رقیق‌سازی استفاده شده و پاسخ‌های مختلف سیستم در شرایط کنترل حلقه‌بسته بررسی شده است. این تحلیل‌ها نشان‌دهنده بهبود پاسخ سیستم با استفاده از کنترلرهای با دو درجه آزادی و تأثیر مثبت آن‌ها بر زمان نشست و پایداری سیستم می‌باشد.

### خطی سازی دینامیک سیستم :

در خطی‌سازی سیستم‌های غیرخطی بیولوژیکی، هدف به دست آوردن تقریب خطی معادلات غیرخطی حول نقطه تعادلی است. این روش به ما امکان تحلیل پایدار و طراحی کنترلر برای سیستم‌های پیچیده‌ای مانند راکتورهای زیستی را می‌دهد که دینامیک‌های غیرخطی دارند. در این گزارش، به منظور تحلیل سیستم و طراحی کنترلر مناسب، از ماتریس ژاکوبین برای خطی‌سازی سیستم غیرخطی استفاده شده است. این خطی‌سازی در نقطه کار مشخص انجام شده و مقادیر آن برای طراحی و شبیه‌سازی سیستم به کار گرفته شده است.

### 1. تعریف سیستم غیر خطی

فرض کنید سیستم مورد نظر با معادلات دیفرانسیلی زیر توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = f_1(X, S, P, D, S_f)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = f_2(X, S, P, D, S_f)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = f_3(X, S, P, D, S_f)$$

که در آن غلظت بیومس ( $X$ )، (غلظت سوبسترا) ( $S$ )،  $P$  (غلظت محصول) متغیرهای حالت سیستم هستند و  $D$  (نرخ رقیق‌سازی) و  $S_f$  (غلظت سوبسترا در جریان ورودی) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

**2. خطی سازی سیستم حول نقطه تعادلی**  $(X_{eq}, S_{eq}, P_{eq}, D_0, S_f)$  از ماتریس ژاکوبین استفاده می شود

که شامل مشتقات جزئی معادلات غیرخطی نسبت به متغیرهای حالت و ورودی ها است:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\frac{dX}{dt})}{\partial X} & \frac{\partial(\frac{dX}{dt})}{\partial S} & \frac{\partial(\frac{dX}{dt})}{\partial P} \\ \frac{\partial(\frac{dS}{dt})}{\partial X} & \frac{\partial(\frac{dS}{dt})}{\partial S} & \frac{\partial(\frac{dS}{dt})}{\partial P} \\ \frac{\partial(\frac{dP}{dt})}{\partial X} & \frac{\partial(\frac{dP}{dt})}{\partial S} & \frac{\partial(\frac{dP}{dt})}{\partial P} \end{bmatrix}$$

سپس برای متغیرهای ورودی نیز باید ماتریس  $B$  را تشکیل داده که به فرم زیر میباشد:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\frac{dX}{dt})}{\partial D} & \frac{\partial(\frac{dX}{dt})}{\partial S_f} \\ \frac{\partial(\frac{dS}{dt})}{\partial D} & \frac{\partial(\frac{dS}{dt})}{\partial S_f} \\ \frac{\partial(\frac{dP}{dt})}{\partial D} & \frac{\partial(\frac{dP}{dt})}{\partial S_f} \end{bmatrix}$$

**3. فرمول های مشتقات جزئی**

برای محاسبه مقادیر درون ماتریس های  $A$  و  $B$ ، مشتقات جزئی هر یک از توابع  $f_1, f_2$ ، و  $f_3$  نسبت به متغیرهای حالت و ورودی ها محاسبه می شود. به عنوان مثال:

$$\frac{dX}{dt} = -D \cdot X + \mu \cdot X$$

$$\frac{dS}{dt} = D \cdot (S_f - S) - \frac{1}{Y_{XS}} \cdot \mu \cdot X$$

$$\frac{dP}{dt} = -D \cdot P + (\alpha \cdot \mu + \beta) \cdot X$$

که در اینجا  $\mu$  تابع رشد ویژه است که به غلظت سوبسترا و محصول وابسته است و به صورت غیر خطی تعریف شده است:

$$\mu = \mu_m \cdot \left(1 - \frac{P}{P_m}\right) \cdot \frac{S}{K_m + S + \frac{S^2}{K_i}}$$

#### 4. جایگذاری مقادیر نقطه تعادلی

برای محاسبه نهایی ماتریس‌های  $A$  و  $B$ ، مقادیر نقطه تعادلی به دست آمده برای متغیرهای حالت و ورودی‌ها جایگذاری می‌شود. این مقادیر به تعیین پایداری سیستم در نقطه کار و طراحی کنترلرهای مناسب کمک می‌کند.

#### 5. تحلیل و شبیه‌سازی

با استفاده از مقادیر محاسبه شده، سیستم به صورت خطی در MATLAB شبیه‌سازی شده و پاسخ به ورودی‌های مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این تحلیل‌ها شامل بررسی پایداری، پاسخ پله و طراحی کنترلر فیدبک برای بهبود عملکرد سیستم است.

این روش، ابزاری قدرتمند برای درک و کنترل سیستم‌های غیر خطی پیچیده را فراهم می‌آورد و نقش کلیدی در طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل مدرن در صنایع مهندسی شیمی و زیست‌فناوری دارد.

در ادامه کدهای نوشته برای خطی سازی سیستم مورد مطالعه را در متلب پیاده سازی میکنیم :

```

% Define symbolic variables

syms X S P D S_feed real
mu_m = 0.48; % 1/h, maximum specific growth rate
P_m = 50; % g/L, product inhibition constant
K_m = 1.2; % g/L, Monod constant
K_i = 22; % g/L, inhibition constant for substrate
alpha = 2.2; % g/g, product yield coefficient
beta = 0.2; % 1/h, maintenance rate
Y_XS = 0.4; % g/g, yield coefficient

% Define mu function
mu = mu_m * (1 - P / P_m) * (S / (K_m + S + (S^2) / K_i));

% Define the system of ODEs
dXd_t = -D * X + mu * X;
dSd_t = D * (S_feed - S) - (1 / Y_XS) * mu * X;
dPd_t = -D * P + (alpha * mu + beta) * X;

% State vector and input vector
state_vars = [X; S; P];
input_vars = [D; S_feed];

% Compute Jacobians
A = jacobian([dXd_t; dSd_t; dPd_t], state_vars);
B = jacobian([dXd_t; dSd_t; dPd_t], input_vars);

% Substitute the equilibrium point (X=6, S=5, P=19.14, D=0.2, S_feed=20)
A = double(subs(A, {X, S, P, D, S_feed}, {6, 5, 44.04, 0.0389, 20}));
B = double(subs(B, {X, S, P, D, S_feed}, {6, 5, 44.04, 0.0389, 20}));

% Define C and D matrices for output y = X
C = [1 0 0]; % Output is the third state (X)
D = [0 0]; % No direct influence of D or S_feed on output

% Create state-space system and compute transfer function
sys = ss(A, B, C, D);
%Discrete Time Transfer function
Ts1 = 0.5;
Ts2 = 1.5;

sys_tf = tf(sys)
sys_d1 = c2d(tf(sys), Ts1, 'zoh')
sys_d2 = c2d(tf(sys), Ts2, 'zoh')

% Display the results

```

```

disp('A matrix:');
disp(A);
disp('B matrix:');
disp(B);
disp('C matrix:');
disp(C);
disp('D matrix:');
disp(D);
disp('Transfer function:');
disp(sys_tf);

```

کد فوق برای خطی سازی معادلات دیفرانسیل به کمک تابع ماتریس ژاکوبین در متلب است ، سپس به کمک فضای حالت فرم تابع مدار باز سیستم را در یک بار بر حسب دبی های (بالا و پایین) و یک بار تابع مدار باز سیستم بر حسب میزان غلظت ورودی سیستم بررسی می شود.

همچنین تابع تبدیل سیستم به فرم های گسسته زمانی نیز انجام شده که در سمپل تایم های 0.5 ساعت و 1.5 انجام شده است که نتایج این کد را میتوانیم در زیر برای دبی (0.0389hr) و محصول  $P=44.04$  به شرح زیر است :

```

sys_tf =

From input 1 to output:
-6 s^2 + 0.7439 s + 0.03802
-----
s^3 + 0.1651 s^2 + 0.01616 s + 0.0004375

From input 2 to output:
1.579e-05 s + 6.142e-07
-----
s^3 + 0.1651 s^2 + 0.01616 s + 0.0004375

Continuous-time transfer function.
Model Properties
sys_d1 =

From input 1 to output:
-2.786 z^2 + 5.756 z - 2.965
-----
z^3 - 2.917 z^2 + 2.838 z - 0.9208

From input 2 to output:
1.932e-06 z^2 - 2.996e-09 z - 1.856e-06
-----
z^3 - 2.917 z^2 + 2.838 z - 0.9208

```

```

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
Model Properties
sys_d2 =

From input 1 to output:
-7.134 z^2 + 15.86 z - 8.615
-----
z^3 - 2.748 z^2 + 2.53 z - 0.7807

From input 2 to output:
1.666e-05 z^2 - 7.491e-08 z - 1.475e-05
-----
z^3 - 2.748 z^2 + 2.53 z - 0.7807

Sample time: 1.5 seconds
Discrete-time transfer function.
Model Properties
A matrix:
0.0001    0.0004   -0.0393
-0.0975   -0.0399    0.0981
0.2858    0.0009   -0.1253
B matrix:
-6.0000    0
15.0000    0.0389
-44.0400    0
C matrix:
1    0    0
D matrix:
0    0

```

## 2. مقدمه:

در این بخش از گزارش، هدف بررسی تغییرات بهره یکنواخت (Yield) در فرایندهای بیوشیمیایی در پاسخ به تغییرات نرخ رقیق سازی (D) است. به طور خاص، برای شبیه سازی و تحلیل عملکرد سیستم از مدل های دینامیکی که شامل معادلات حاکم بر رفتار زیست توده، سوبسترا و محصول هستند، استفاده شده است. این مدل ها به صورت سیستم معادلات دیفرانسیل با استفاده از حلگر ode45 در MATLAB پیاده سازی شده اند.



در ابتدا معادلات دینامیکی سیستم را برای زیست توده ( $X$ )، سوبسترا ( $S$ ) و محصول ( $P$ ) به صورت زیر در نظر گرفتیم:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -D \cdot X + \mu \cdot X \\ \frac{dS}{dt} &= D \cdot (S_f - S) - \frac{1}{Y_{XS}} \cdot \mu \cdot X \\ \frac{dP}{dt} &= -D \cdot P + (\alpha \cdot \mu + \beta) \cdot X\end{aligned}$$

در اینجا،  $D$  نرخ رقیق سازی است،  $S_f$  غلظت ورودی سوبسترا، و  $\mu(S, P)$  نرخ رشد زیستی است که به صورت تابعی از غلظت سوبسترا و محصول تعریف می شود.

برای بررسی اثر تغییرات نرخ رقیق سازی بر بهره یکنواخت فرایند، نرخ رقیق سازی را در دو حالت مختلف با 10٪ تغییر افزایش و کاهش داده و پاسخ سیستم را شبیه سازی کرده ایم. این تغییرات در نرخ رقیق سازی در دو مقدار رقیق و غلظت بالا شبیه سازی کرده ایم:

```
% Define parameters for the fermentation model
mu_m = 0.48; % 1/h, maximum specific growth rate
P_m = 50; % g/L, product inhibition constant
K_m = 1.2; % g/L, Monod constant
K_i = 22; % g/L, inhibition constant for substrate
alpha = 2.2; % g/g, product yield coefficient
beta = 0.2; % 1/h, maintenance rate
Y_XS = 0.4; % g/g, yield coefficient

% Nominal dilution rate for the operating point
D_nominal = 0.202; % hr^-1
perturbation = 0.1; % 10% change

% New dilution rates for testing
D_high = D_nominal * (1 + perturbation);
D_low = D_nominal * (1 - perturbation);

% Time span for simulation
time_span = [0, 50]; % hours
```

```

% Initial conditions for the state variables [X, S, P]
initial_conditions = [6, 5, 19.14]; % Initial steady-state values for [X, S, P]

% Define the mu function as a nested function within the script
mu_function = @(S, P) mu_m * (1 - P / P_m) * (S / (K_m + S + (S^2) / K_i));

% Define the system of ODEs as a function of time, state vector, and dilution rate
system_ode = @(t, Y, D) [
    -D * Y(1) + mu_function(Y(2), Y(3)) * Y(1); % dX/dt: Biomass concentration
    D * (20 - Y(2)) - (1 / Y_XS) * mu_function(Y(2), Y(3)) * Y(1); % dS/dt: Substrate
    concentration
    -D * Y(3) + (alpha * mu_function(Y(2), Y(3)) + beta) * Y(1) % dP/dt: Product concentration
];

% Simulate the system for D_high
[t_high, Y_high] = ode45(@(t, Y) system_ode(t, Y, D_high), time_span, initial_conditions);

% Simulate the system for D_low
[t_low, Y_low] = ode45(@(t, Y) system_ode(t, Y, D_low), time_span, initial_conditions);

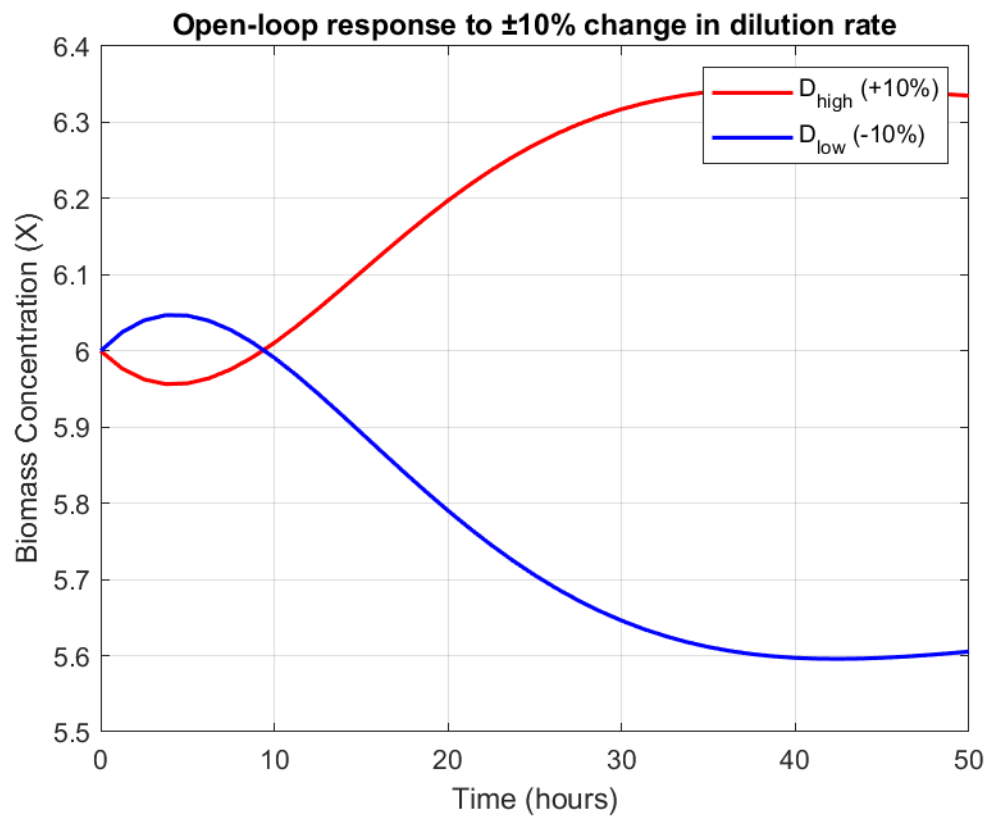
% Plot the results for biomass concentration (X) over time
figure;
plot(t_high, Y_high(:, 1), 'r', 'LineWidth', 1.5); % Red line for D_high
hold on;
plot(t_low, Y_low(:, 1), 'b', 'LineWidth', 1.5); % Blue line for D_low
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Biomass Concentration (X)');
legend('D_{high} (+10%)', 'D_{low} (-10%)');
title('Open-loop response to ±10% change in dilution rate');
grid on;

% Additional plots for substrate (S) and product (P) concentrations
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(t_high, Y_high(:, 2), 'r', 'LineWidth', 1.5); % Substrate (S) for D_high
hold on;
plot(t_low, Y_low(:, 2), 'b', 'LineWidth', 1.5); % Substrate (S) for D_low
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Substrate Concentration (S)');
legend('D_{high} (+10%)', 'D_{low} (-10%)');
title('Substrate Concentration Response');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(t_high, Y_high(:, 3), 'r', 'LineWidth', 1.5); % Product (P) for D_high
hold on;
plot(t_low, Y_low(:, 3), 'b', 'LineWidth', 1.5); % Product (P) for D_low
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Product Concentration (P)');
legend('D_{high} (+10%)', 'D_{low} (-10%)');
title('Product Concentration Response');
grid on;

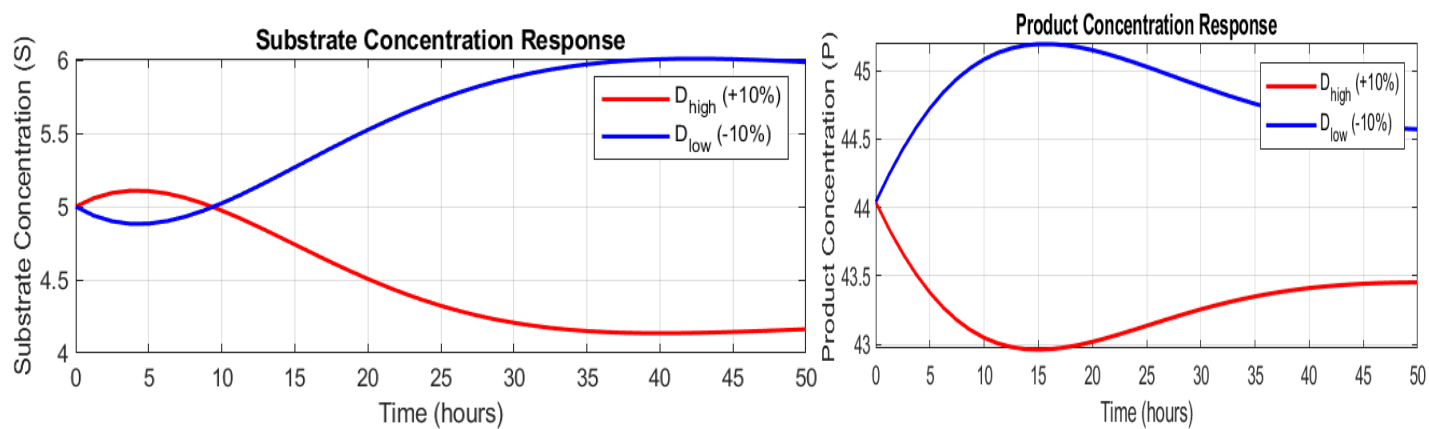
```

نتایج و نمودار ها برای غلظت 0.0389 به شرح زیر است :

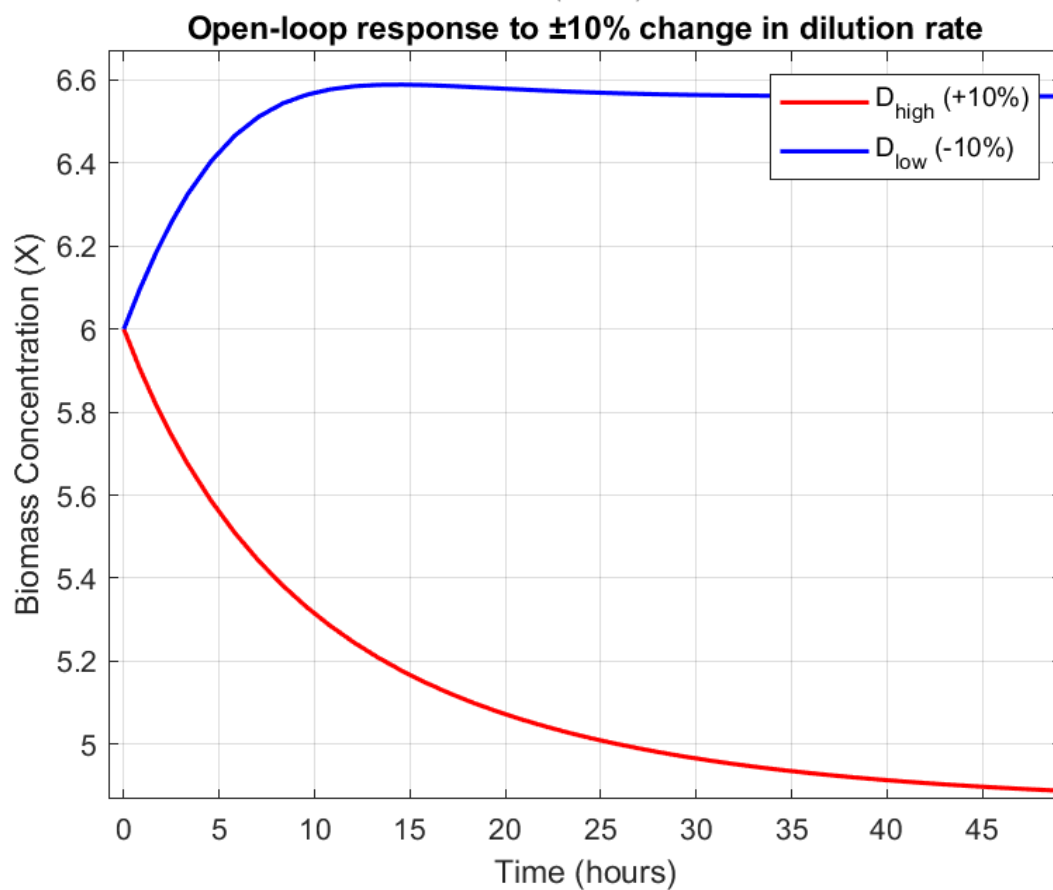
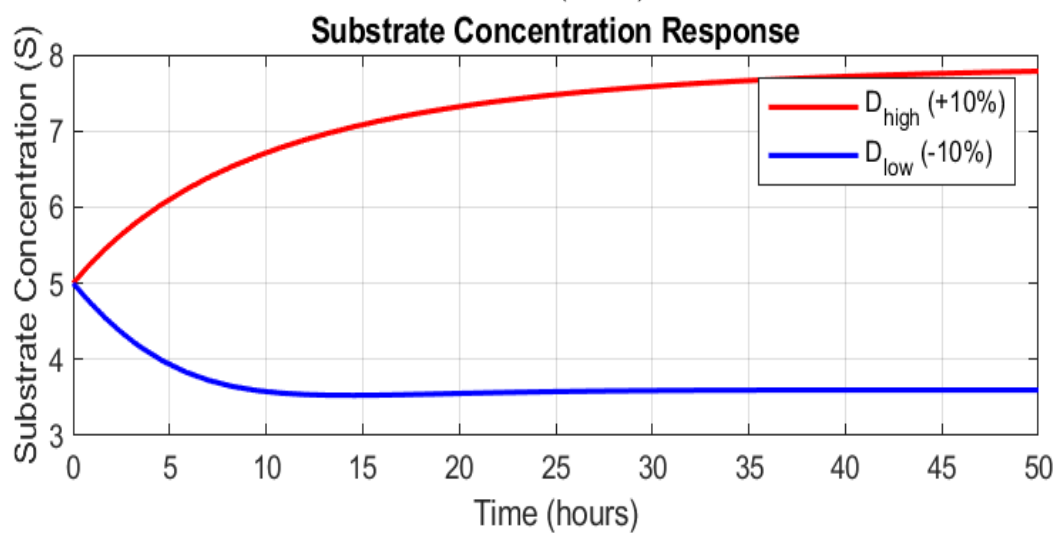
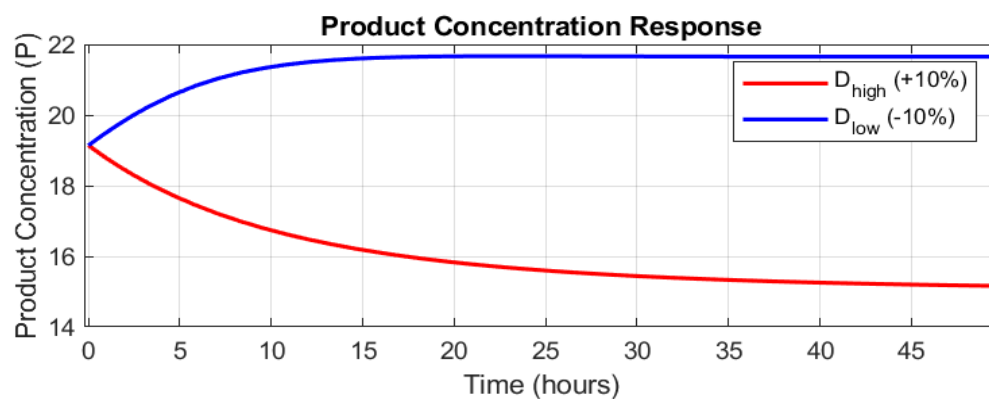


این برای تغییرات  $X$  در سیستم است .

حال برای تغییرات  $S, P$  بدین شرح است :



همین کد را برای غلظت های بالا 0.202 داریم :



## 5. نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی نشان دهنده حساسیت سیستم به تغییرات نرخ رقیق سازی است. در فرایندهای بیوشیمیایی مانند این مورد، نرخ رقیق سازی یکی از پارامترهای مهم در کنترل رشد میکروارگانیسم ها و تولید محصول است. با استفاده از این شبیه سازی ها می توان بهینه ترین شرایط کاری را برای سیستم تعیین کرده و بهره یکنواخت فرایند را در نقاط مختلف کاری بررسی کرد.

## طراحی کنترلر تناسبی- انتگرالی (PI) و تحلیل تاب آوری سیستم

### 1. مقدمه

در سیستم های بیوشیمیایی مانند راکتورهای زیستی، تنظیم دقیق نرخ رقیق سازی (D) و غلظت زیست توده (X) بسیار حیاتی است. در این بخش، هدف طراحی یک کنترلر تناسبی-انتگرالی (PI) است که بتواند نرخ رقیق سازی (D) را برای دستیابی به غلظت زیست توده مطلوب تنظیم کند. سیستم تحت بررسی قادر به دفع اغتشاشات ناشی از تغییرات در غلظت شربت قند بالادستی است. همچنین، این گزارش به تحلیل تاب آوری سیستم و پاسخ مدار بسته آن در برابر تغییرات در مقدار مقرر (setpoint) و همچنین بررسی تغییرات در بهره سیستم پرداخته است.

### 2. روش کار

برای طراحی کنترلر PI، ابتدا مدل ریاضی سیستم و معادلات مربوط به آن در محیط سیمولینک پیاده سازی شد. این مدل شامل معادلات حاکم بر نرخ رقیق سازی (D) و غلظت زیست توده (X) بود که در بخش های قبلی گزارش توضیح داده شد. پس از پیاده سازی سیستم در سیمولینک، یک کنترلر PI برای تنظیم نرخ رقیق سازی به کار گرفته شد.

**مدل سیستم**: در ابتدا، مدل دینامیکی سیستم به صورت معادلات دیفرانسیل زیر است:

$$\frac{dX}{dt} = -D \cdot X + \mu \cdot X$$

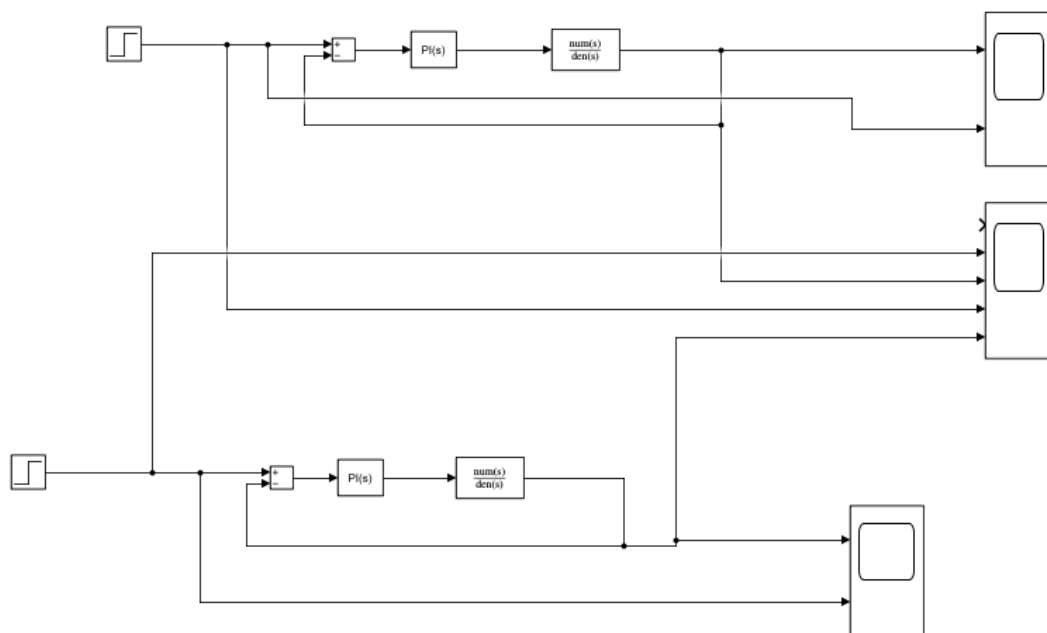
که در آن  $\mu(S,P)$  نرخ رشد زیستی به طور وابسته به سوبسترا و محصول است.

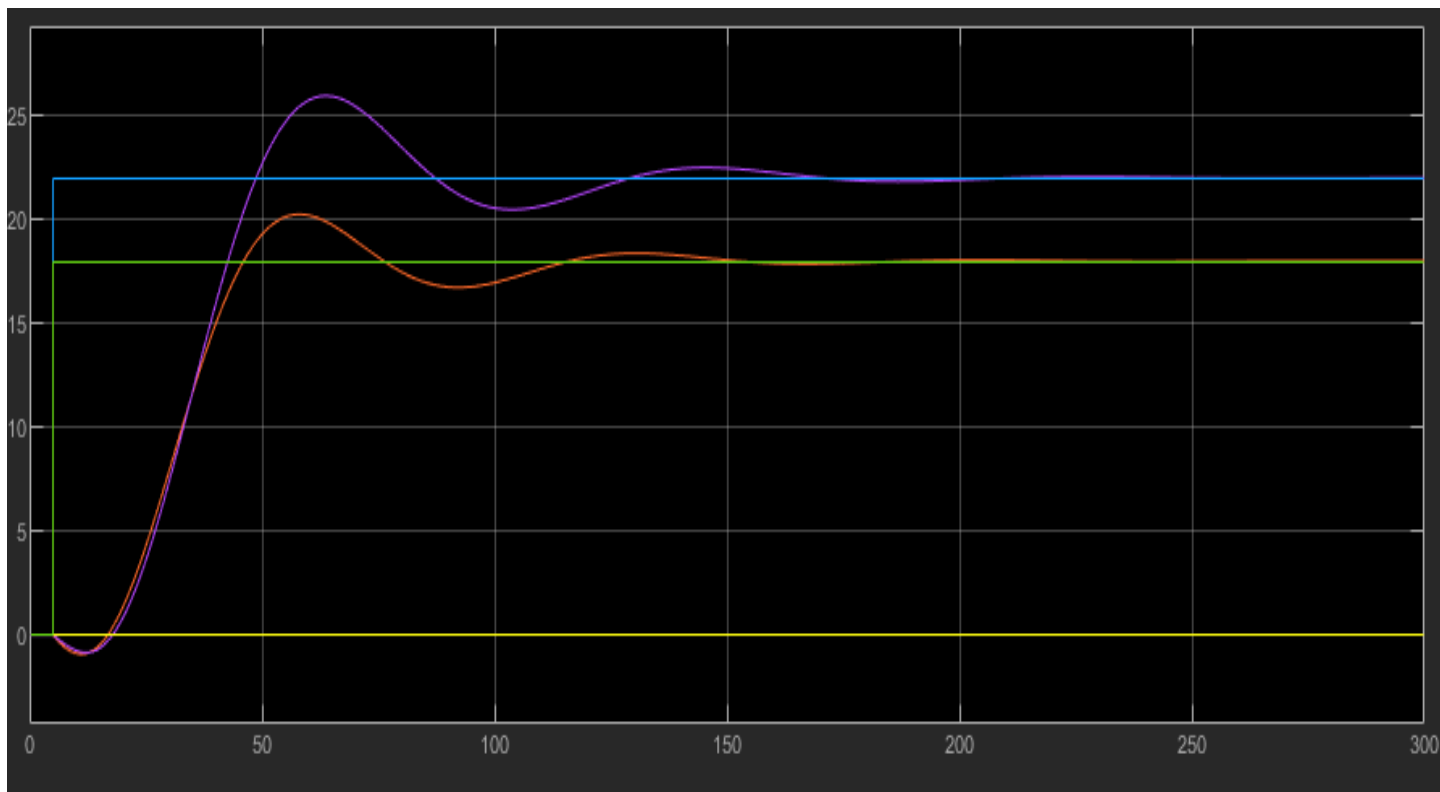
برای طراحی کنترلر PI، تابع خطا (Error) بین مقدار مقرر غلظت زیست توده ( $X_{sp}$ ) و مقدار واقعی ( $X$ ) تعریف شده و سپس با استفاده از سیمپولینک، یک کنترلر PI طراحی شده است که نرخ رقیق سازی را تنظیم می کند.

### 3. نتایج شبیه سازی

در این بخش، شبیه سازی سیستم با استفاده از سیمپولینک و کنترلر PI انجام شده است. ابتدا مقدار مقرر برای غلظت زیست توده ( $X_{sp}$ ) تعیین شده و سیستم تحت تاثیر اغتشاشات 10٪ تغییر در غلظت شربت قند بالادستی قرار گرفته است.

**نمودار پاسخ سیستم به اغتشاشات:** در نمودار زیر، پاسخ سیستم به تغییرات 10 درصدی در غلظت شربت قند بالادستی و عملکرد کنترلر PI نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، کنترلر PI قادر است با ایجاد تنظیمات مناسب در نرخ رقیق سازی ( $D$ )، غلظت زیست توده ( $X$ ) را به مقدار مقرر ( $X_{sp}$ ) بازگرداند.



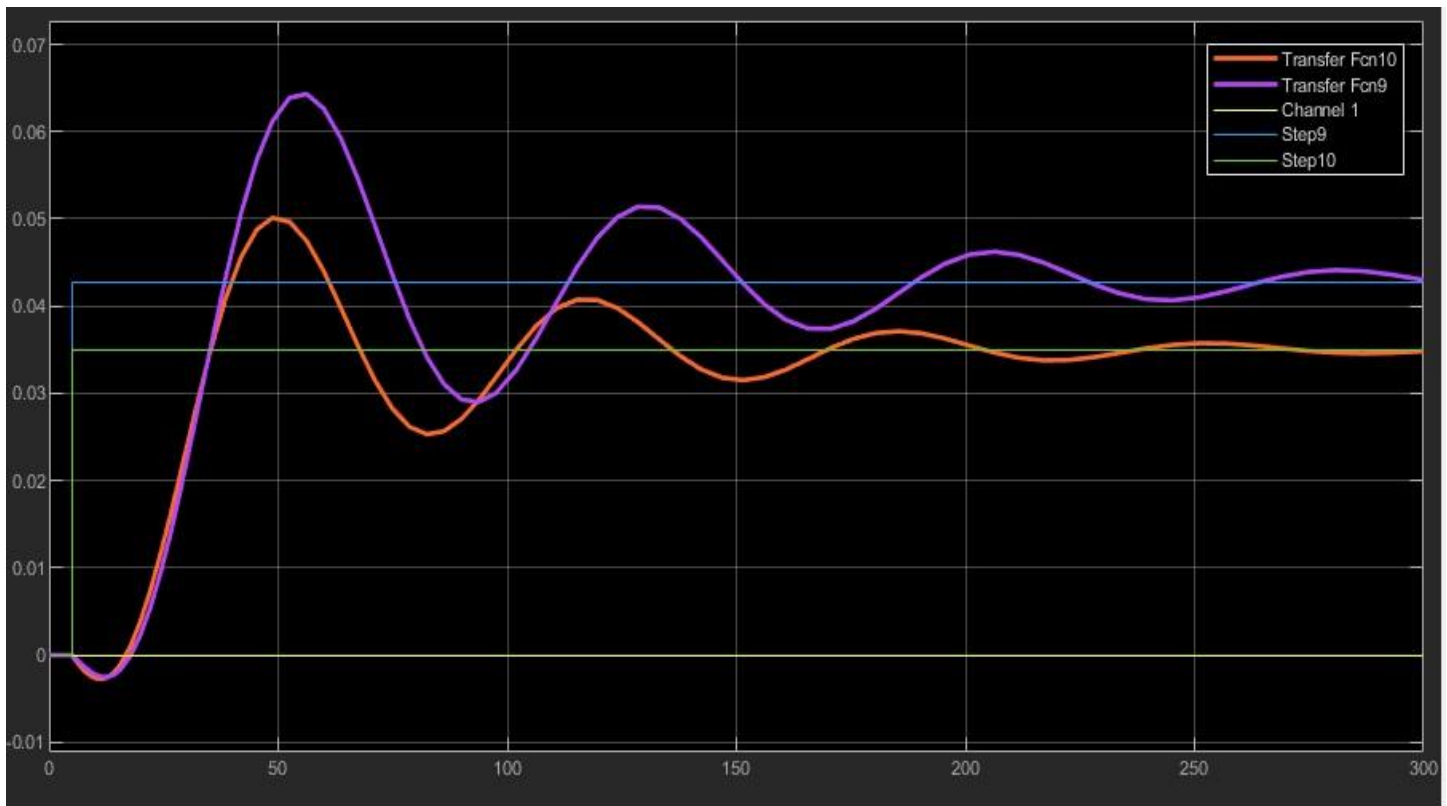
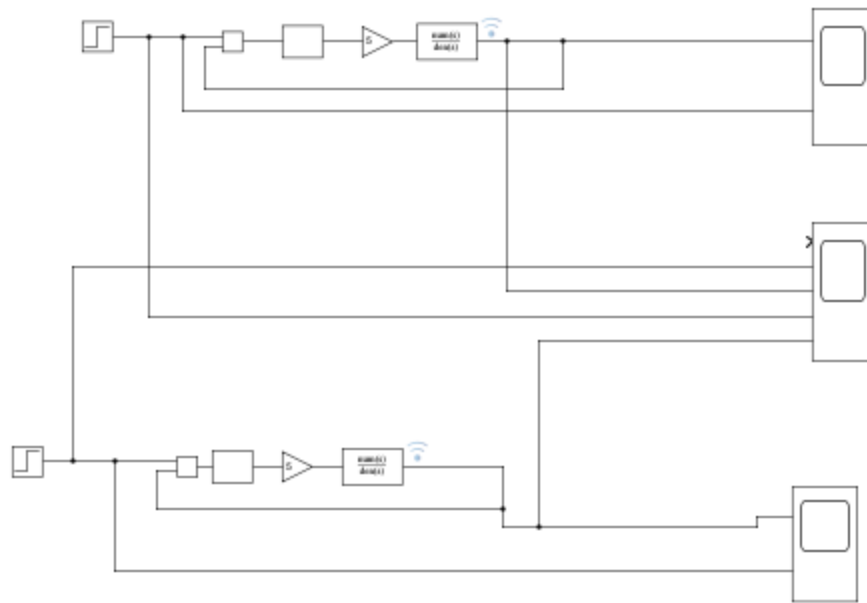


**نتایج شبیه‌سازی اغتشاشات:** در این شبیه‌سازی، تغییرات در ورودی غلظت شربت قند ( $S_f$ ) باعث تغییرات در نرخ رقیق‌سازی و غلظت زیست‌توده می‌شود. کنترلر  $PI$  با تنظیم مجدد نرخ رقیق‌سازی قادر به مقابله با این اغتشاشات است و غلظت زیست‌توده را به مقدار مقرر بازمی‌گرداند.

#### 4. تحلیل تاب‌آوری سیستم

برای آزمایش تاب‌آوری (مقاومت) سیستم، تغییرات در مقدار مقرر ( $X_{sp}$ ) اعمال شده تا مشاهده شود که آیا سیستم به‌طور صحیح به تغییرات پاسخ می‌دهد و به نقاط کاری جدیدی وارد می‌شود که بهره سیستم تغییر علامت دهد.

در این بخش، تغییرات در مقدار مقرر (setpoint) به گونه‌ای اعمال می‌شود که نقاط کاری جدیدی برای سیستم به‌وجود آید. هدف از این آزمایش، سنجش تاب‌آوری سیستم در برابر تغییرات ورودی و توانایی سیستم در حفظ عملکرد مناسب و بهره یکنواخت است.



**نتایج تاب آوری**: پس از اعمال تغییرات در مقدار مقرر، سیستم وارد نقاط کاری جدیدی شده و به طور صحیح به تغییرات پاسخ داده است. با این حال، بررسی ها نشان داد که در برخی شرایط، بهره یکنواخت سیستم تغییر علامت می دهد، که نشان دهنده حساسیت سیستم به تغییرات در نرخ رقیق سازی و غلظت زیست توده است.

**5. نتیجه گیری**



در این بخش از گزارش، یک کنترلر PI برای جفت نرخ رقیق سازی (D) و غلظت زیست توده (X) طراحی شد و عملکرد آن تحت شرایط مختلف بررسی گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که کنترلر PI قادر است اغتشاشات 10 درصدی را جبران کرده و غلظت زیست توده را به مقدار مقرر بازگرداند. همچنین، آزمایش تاب آوری نشان داد که سیستم در برابر تغییرات در مقدار مقرر مقاوم است، هرچند در برخی موارد بهره سیستم تغییر علامت می دهد.

## گزارش کار: طراحی کنترلر پیش خور و پس خور برای سیستم زیستی با استفاده از MATLAB و Simulink

### مقدمه

در این بخش از گزارش، هدف طراحی یک سیستم کنترل ترکیبی پیش خور (Feedforward) و پس خور (Feedback) برای سیستم زیستی است که از اطلاعات سنجش غلظت گلوکز خوراک (Sf) استفاده می کند. به طور خاص، ترکیب کنترلر پیش خور و پس خور می تواند عملکرد سیستم را بهبود داده و قابلیت واکنش سریع تر به تغییرات ورودی ها (مانند اغتشاشات) را فراهم آورد. در این راستا، ابتدا یک کنترلر پیش خور برای سیستم طراحی می شود و سپس پاسخ های مدار بسته در برابر اغتشاشات افزایشی و کاهشی بررسی و با نتایج کنترلر پس خور مقایسه می شوند.

### روش کار

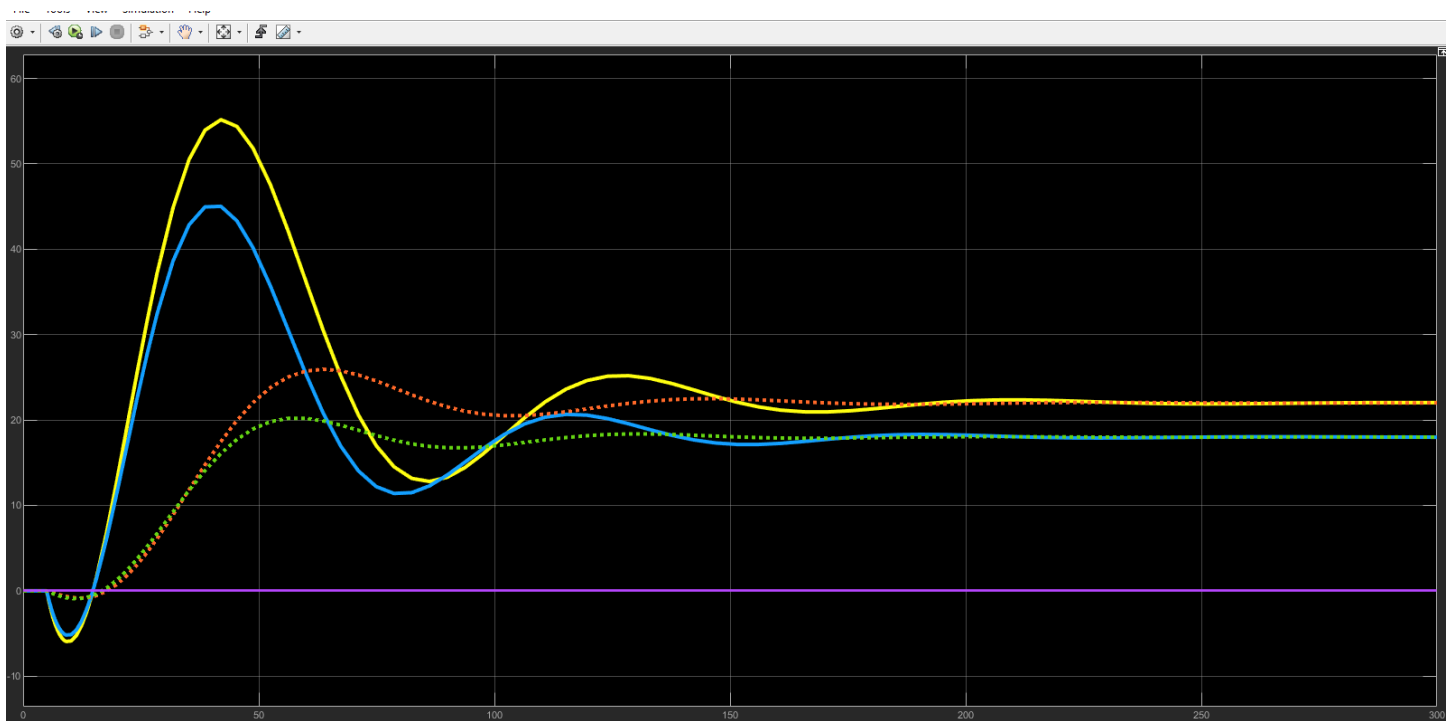
1. طراحی کنترلر پیش خور: ابتدا یک کنترلر پیش خور طراحی می شود که سیگنال ورودی از سنجش غلظت گلوکز خوراک (Sf) را برای پیش بینی رفتار سیستم و تنظیم سریع نرخ رقیق سازی (D) استفاده می کند. این کنترلر در کنار کنترلر پس خور ترکیب می شود تا سیستم عملکرد بهینه تری را در برابر اغتشاشات نشان دهد.
2. طراحی کنترلر پس خور: برای قسمت (ه)، از یک کنترلر تناسبی - انتگرالی (PI) استفاده شده است که در آن نرخ رقیق سازی (D) به صورت بازخوردی برای تنظیم غلظت زیست توده (X) تنظیم می شود.
3. ترکیب کنترلر پیش خور و پس خور: کنترلر پیش خور با استفاده از سیگنال ورودی گلوکز خوراک (Sf) نرخ رقیق سازی (D) را پیش بینی و تنظیم می کند، در حالی که کنترلر پس خور به تنظیم غلظت زیست توده (X) کمک می کند. این ترکیب منجر به یک سیستم با دو درجه آزادی می شود که می تواند تغییرات ورودی ها را بهتر مدیریت کند.

4. شبیه‌سازی در **Simulink**: یک مدل شبیه‌سازی از سیستم کنترل ترکیبی پیش‌خور و پس‌خور در **Simulink** ایجاد می‌شود. برای هر یک از اغتشاشات افزایشی و کاهشی، پاسخ سیستم به‌صورت سری زمانی بررسی و با نتایج کنترلر فقط پس‌خور مقایسه می‌شود.

5. بررسی پاسخ سیستم در برابر اغتشاشات:

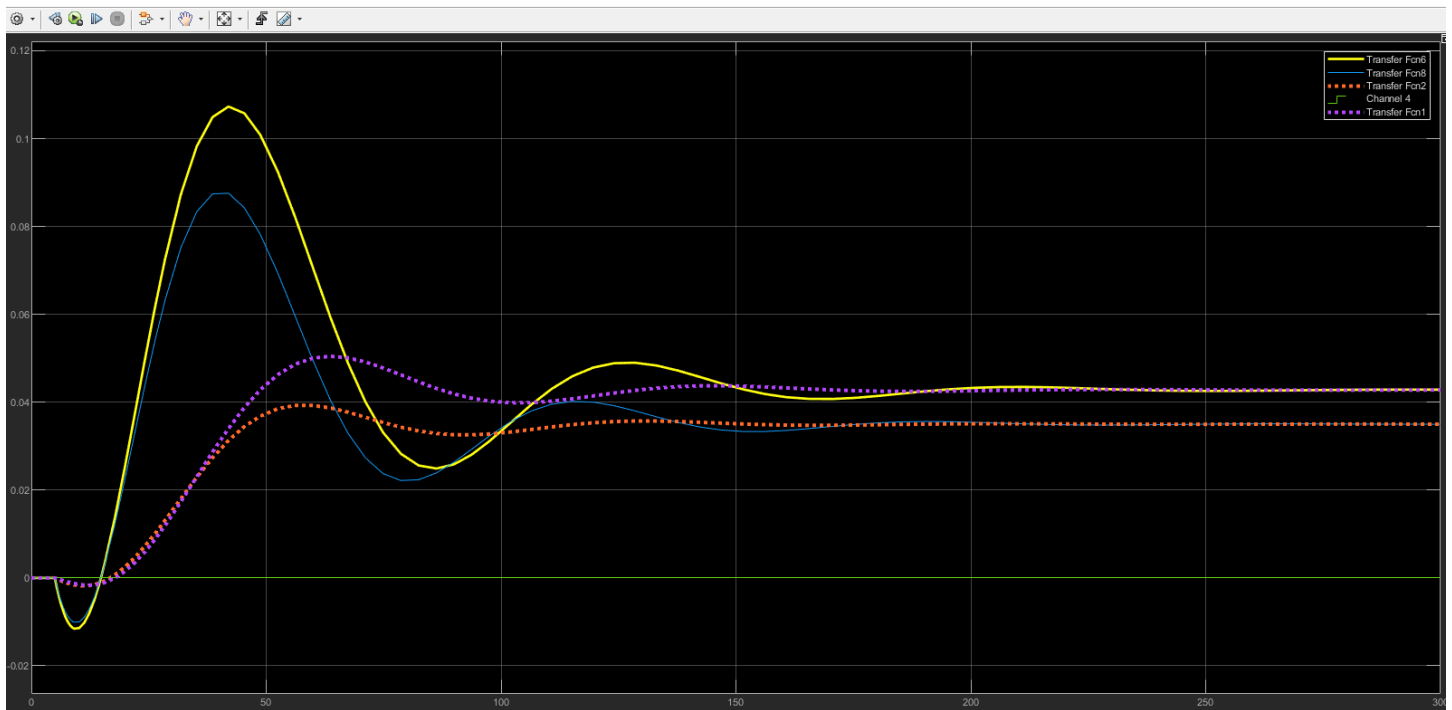
- اغتشاش افزایشی:  $(+10\%)$  برای بررسی واکنش سیستم به اغتشاش افزایشی، مقدار گلوکز خوراک ( $S_f$ ) به‌طور ناگهانی  $10\%$  افزایش می‌یابد و سیستم باید قادر به جبران این تغییرات باشد.

- اغتشاش کاهشی:  $(-10\%)$  برای بررسی واکنش سیستم به اغتشاش کاهشی، مقدار گلوکز خوراک ( $S_f$ ) به‌طور ناگهانی  $10\%$  کاهش می‌یابد و سیستم باید به‌سرعت به این تغییرات واکنش نشان دهد.



این برای ورودی گلوکز به تغییرات است .

حال برای ورودی  $D$  نمودار به صورت زیر است :



## تحلیل و مقایسه نتایج

پس از شبیه‌سازی در Simulink، نتایج حاصل از کنترلرهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند:

1. **کنترلر فقط پس‌خور**: این کنترلر تنها به اطلاعات بازخورد از غلظت زیست‌توده ( $X$ ) متکی است. این کنترلر قادر به جبران اغتشاشات است، اما ممکن است در مواجهه با تغییرات سریع یا پیچیده در ورودی‌ها (مانند تغییرات گلوکز خوراک) کند عمل کند.

2. **کنترلر پیش‌خور و پس‌خور**: ترکیب این دو کنترلر باعث می‌شود که سیستم قادر به پیش‌بینی و واکنش سریع‌تر به تغییرات ورودی‌ها شود. در این حالت، سیستم می‌تواند واکنش‌های سریع‌تری به اغتشاشات افزایشی و کاهش‌ی نشان دهد و در نتیجه، عملکرد بهتری نسبت به حالت فقط پس‌خور داشته باشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد سیستم در ترکیب کنترلرهای پیش‌خور و پس‌خور نسبت به استفاده از تنها کنترلر پس‌خور است. ترکیب این دو کنترلر می‌تواند سیستم را در برابر تغییرات سریع ورودی‌ها مقاوم‌تر کند و به سیستم کمک کند تا عملکرد بهتری در جبران اغتشاشات نشان دهد.

