

گروه پژوهشی ایک



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی برق - گروه مهندسی کنترل

## کنترل پیش بین مدل تمرین سری چهارم

نام و نام خانوادگی	امیر جهانگرد تکالو
شماره دانشجویی	۴۰۳۱۵۳۸۴
استاد درس	دکتر امیرحسین نیکوفرد
تاریخ	دی ماه ۱۴۰۳



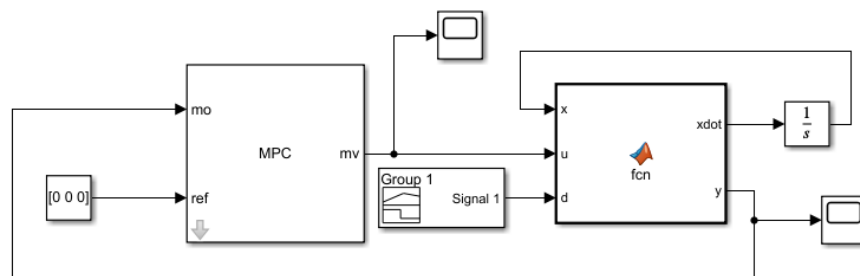
## فهرست مطالب

۲	۱	سوال اول
۲	۱.۱	بخش اول
۹	۲.۱	بخش دوم
۱۴	۳.۱	بخش سوم
۱۴	۱.۳.۱	طراحی MPC Explicit
۱۸	۲.۳.۱	طراحی MPC Tube Explicit
۲۰	۲	سوال دوم

## ۱ سوال اول

## ۱.۱ بخش اول

بلوک سیمولینک مربوط به این بخش در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم دارای MPC Linear

تابع متلب ما مطابق سیستم گفته شده در صورت سوال تعریف شده است:

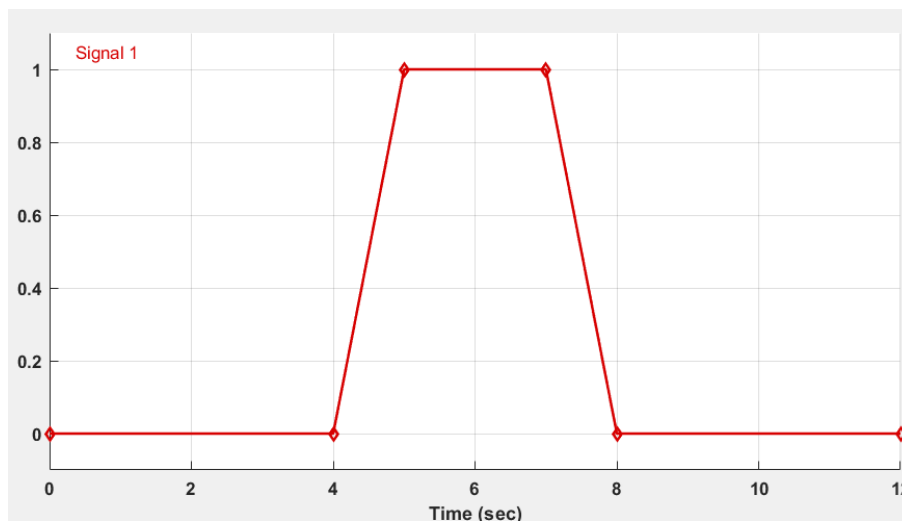
```

1 function [xdot,y] = fcn(x,u,d)
2 % Parameter values
3 Ms = 2500; % Vehicle mass (kg)
4 Mu = 320; % Unsprung mass (kg)
5 ks = 80000; % Suspension stiffness (N/m)
6 kt = 500000; % Tire stiffness (N/m)
7 cs = 350; % Suspension damping (Ns/m)
8 ct = 15020; % Tire damping (Ns/m)
9
10 % State-space matrices
11 A = [0 1 0 0;
12 0 -cs/Ms -ks/Ms cs/Ms;
13 0 1 0 -1;
14 -kt/Mu cs/Mu (ks+kt)/Mu -(cs+ct)/Mu];
15
16 B = [0;
17 1/Ms;
18 0;
19 -1/Mu];
20
21 E = [0;
```

```

22     (cs*ct)/(Ms*Mu);
23     -ct/Mu;
24     (ct/Mu)*((kt/ct)-(cs/Mu)-(ct/Mu))];
25
26 C = [1 0 0 0;
27       0 1 0 0;
28       0 0 1 0];
29
30 D = [0;
31       0;
32       0];
33
34 F = [0; 0; 0];
35
36 xdot = A*x + B*u + E*d;
37 y = C*x + D*u + F*d;
    
```

شکل اغتشاش نیز طبق سوال مطابق شکل ۲ می باشد.



شکل ۲: اغتشاش وارده بر سیستم

حال در ادامه به تنظیمات MPC می پردازیم. ابتدا باید پارامترهای MPC را مشخص کنیم که در شکل ۳ مشاهده می شوند.

Sample time: 0.1

Prediction horizon: 80

Control horizon: 20

HORIZON

شکل ۳: پارامترهای MPC

در ادامه وزن های MPC را مطابق شکل ۴ تنظیم می کنیم.

**Input Weights (dimensionless)**

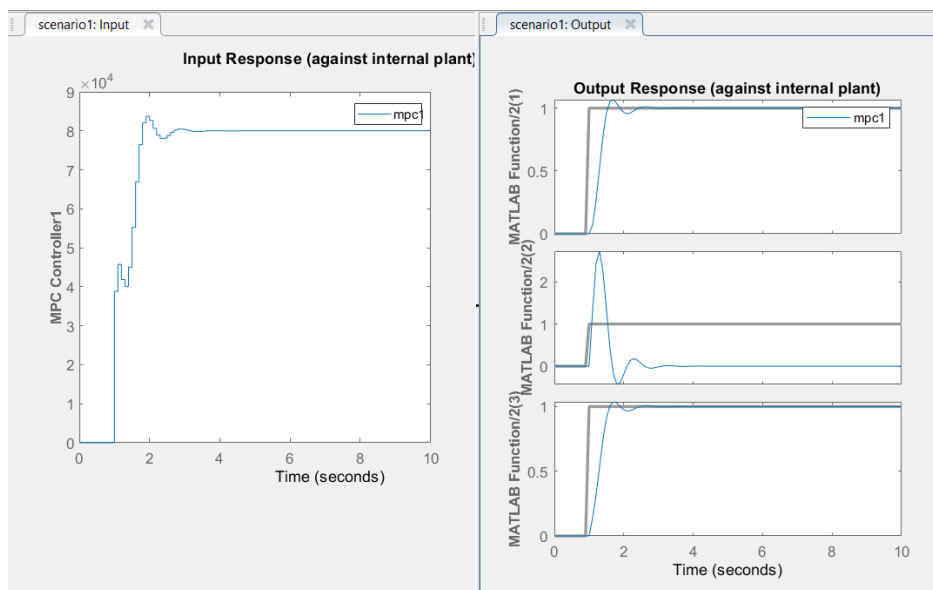
Channel	Type	Weight	Rate Weig...	Target
u(1)	MV	0	0.01	nominal

**Output Weights (dimensionless)**

Channel	Type	Weight
y(1)	MO	10
y(2)	MO	1
y(3)	MO	5

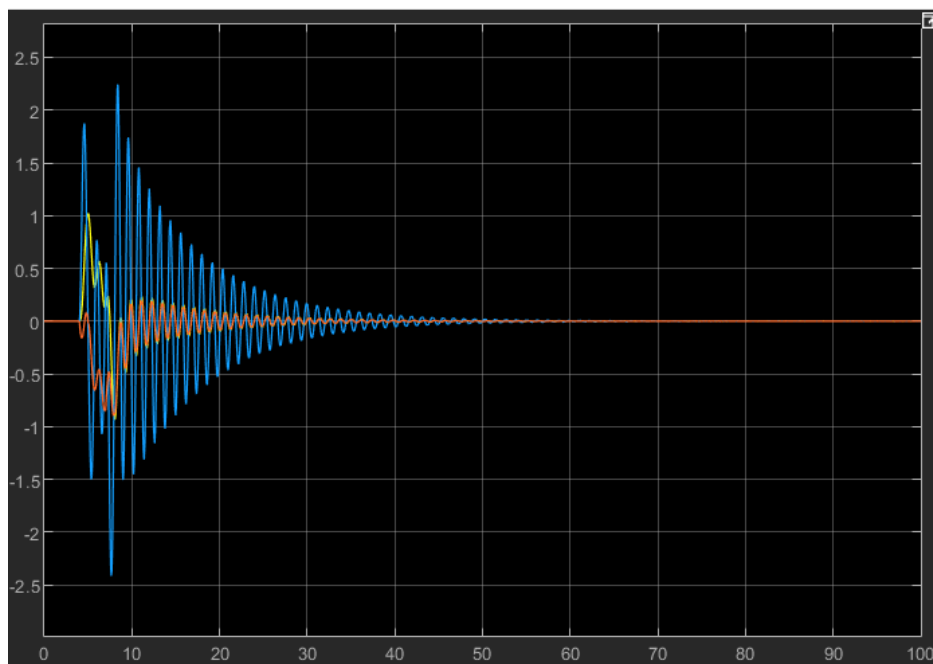
شکل ۴: وزن های MPC

خروجی سیستم MPC ما مطابق شکل ۵ می باشد.



شکل ۵: نمودارهای بلوک MPC

حال خروجی سیستم را در ۱۰۰ ثانیه اول در شکل ۶ مشاهده می کنیم. هر یک از خروجی های این سیستم پس از نوسانات زیاد به پایداری مدنظر رسیده اند. پس کنترلر MPC ما به خوبی عمل کرده است. در ادامه می توان با روش های بهینه این میزان نوسانات را کاهش داد.

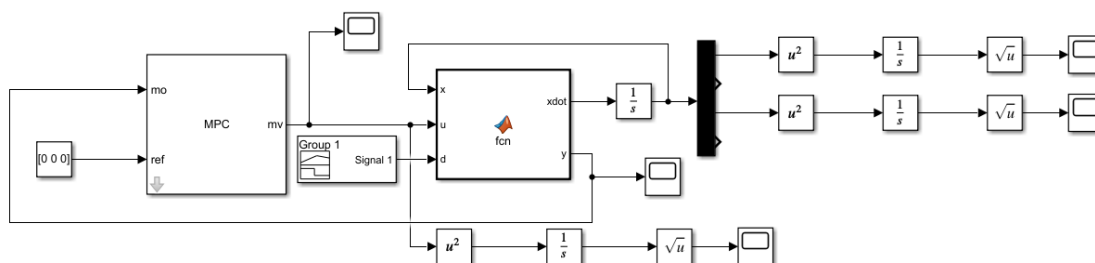


شکل ۶: نمودار خروجی سیستم

در ادامه باید میزان عملکرد RMSE سیستم را بررسی کنیم. برای این کار بلوک شکل ۷ را باید به هر کدام از متغیرهایی که می خواهیم اعمال کنیم. در نهایت شکل بلوک دیاگرام ما مطابق شکل ۸ می باشد.

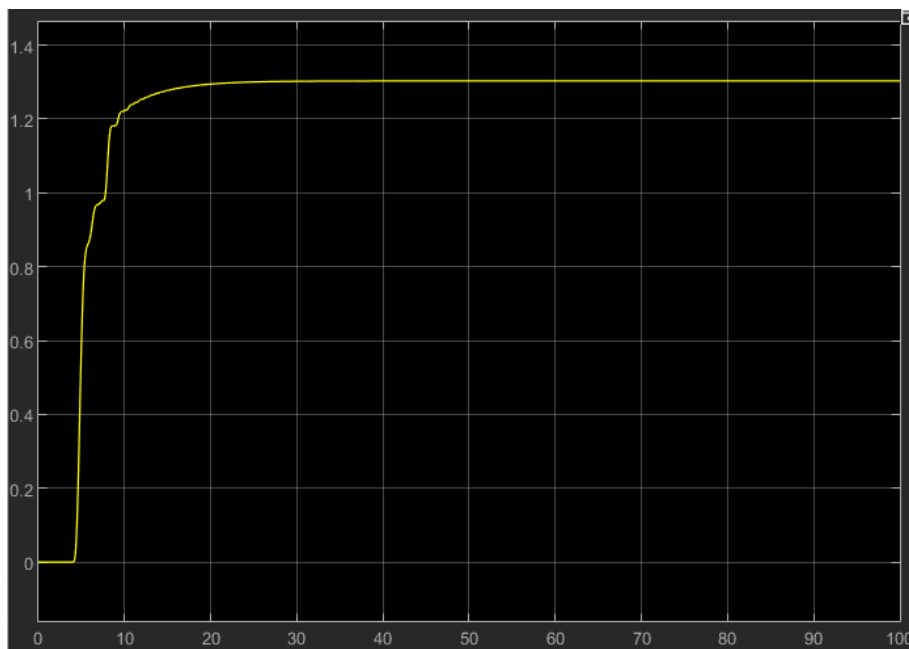


شکل ۷: بلوک دیاگرام RMSE

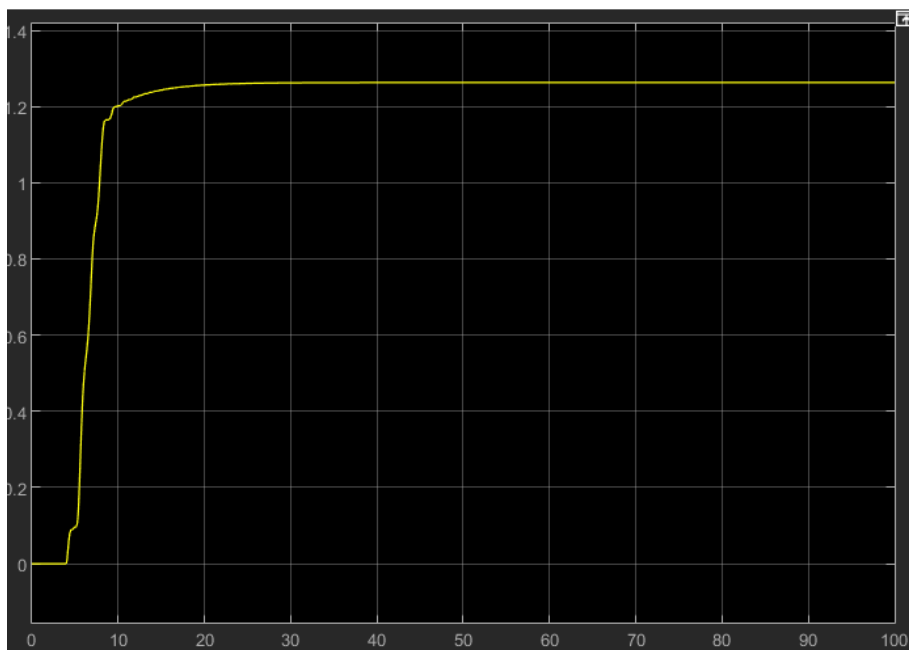


شکل ۸: بلوک دیاگرام سیستم دارای MPC Linear

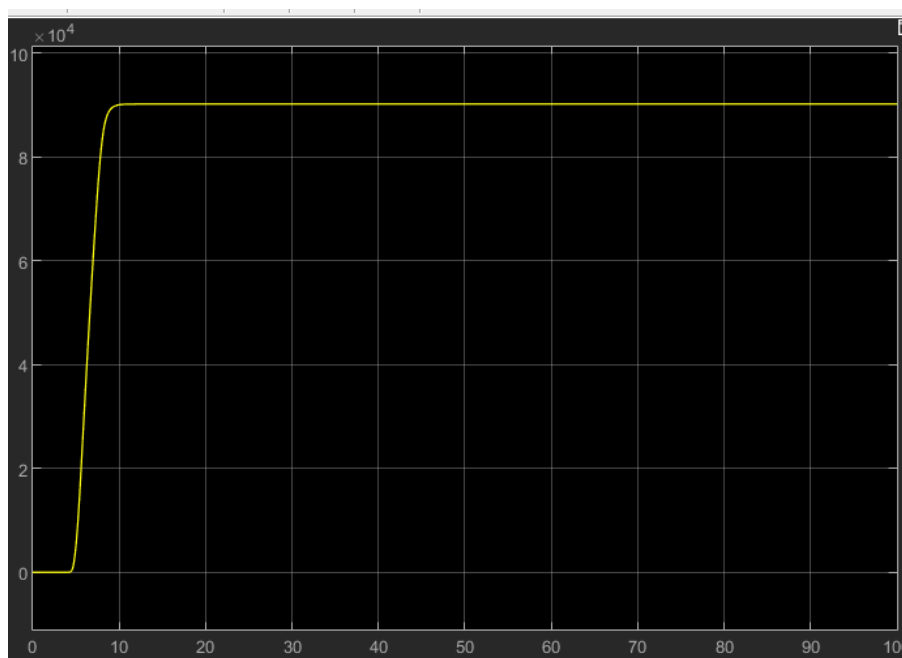
خروجی نمودار RMSE برای  $x_1$  و  $x_3$  و  $u$  به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشاهده می شود. مشاهده می کنیم که این سیستم عملکرد مناسبی دارد.



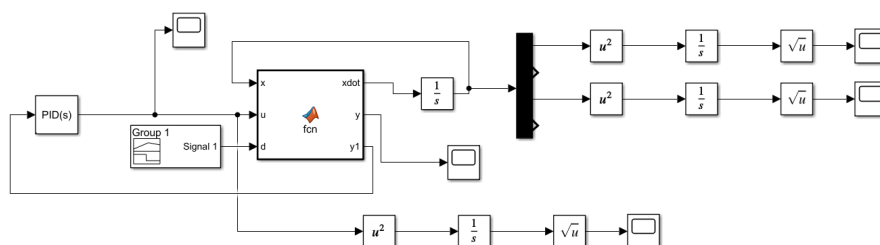
شکل ۹: خروجی  $x_1$



شکل ۱۰: خروجی  $x_3$


 شکل ۱۱: خروجی  $u$ 

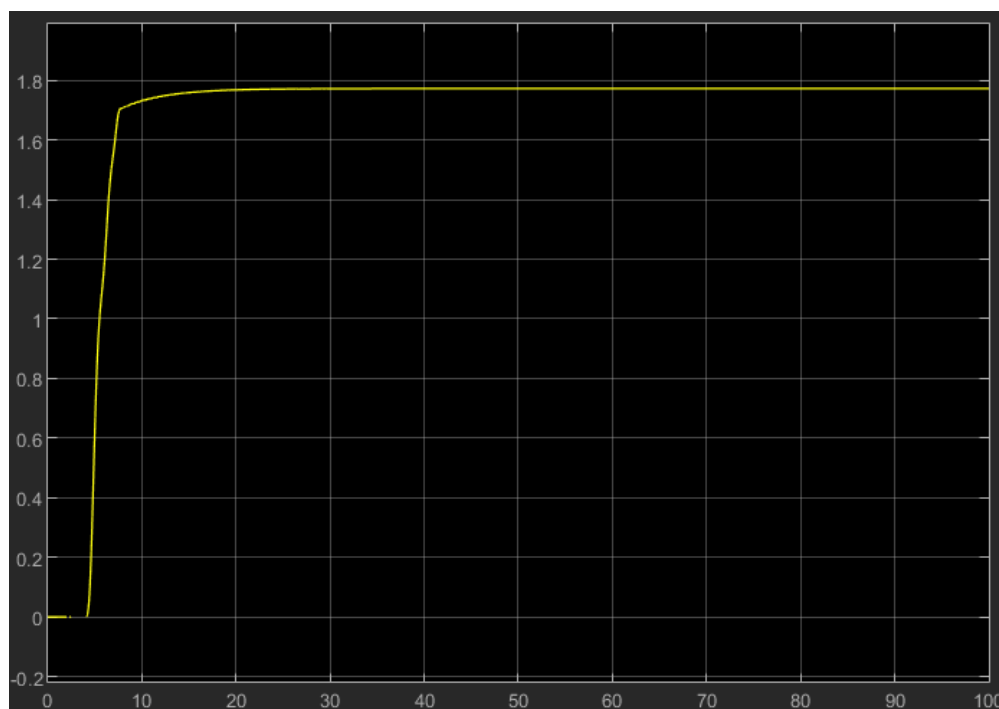
حال باید یک سیستم جدید و پایه طراحی کنیم و به مقایسه عملکرد سیستم پردازیم. برای این کار ما برای سیستم یک کنترلر PID اعمال می کنیم. بلوک دیاگرام سیستم در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



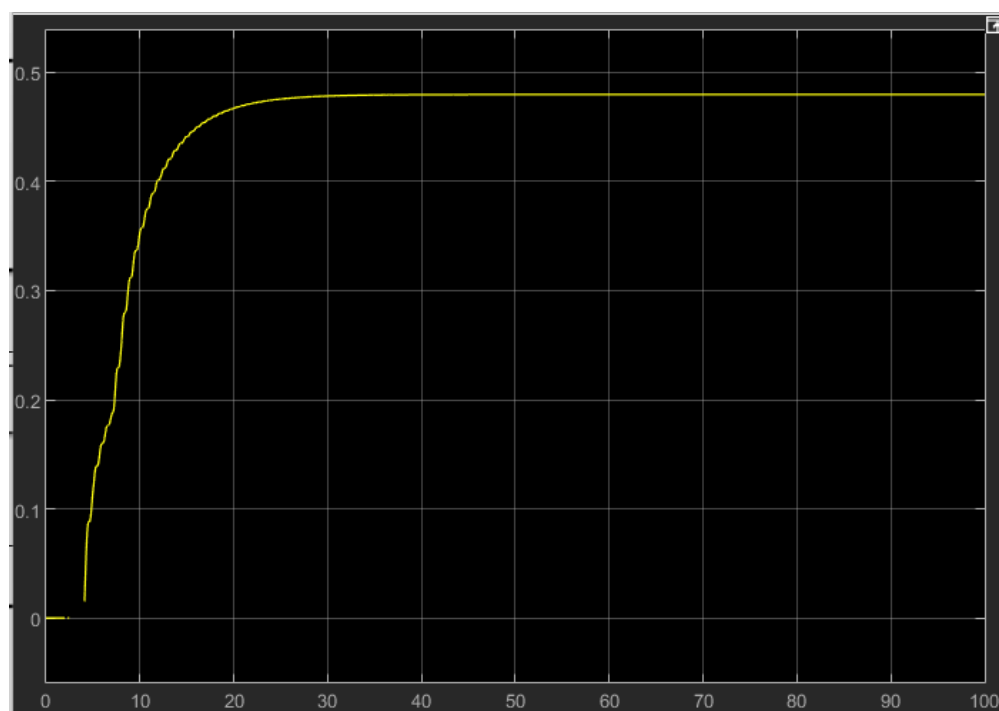
شکل ۱۲: بلوک دیاگرام سیستم پایه

خروجی نمودار RMSE برای  $x_1$  و  $x_3$  و  $u$  به ترتیب در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ و مشاهده می شود.

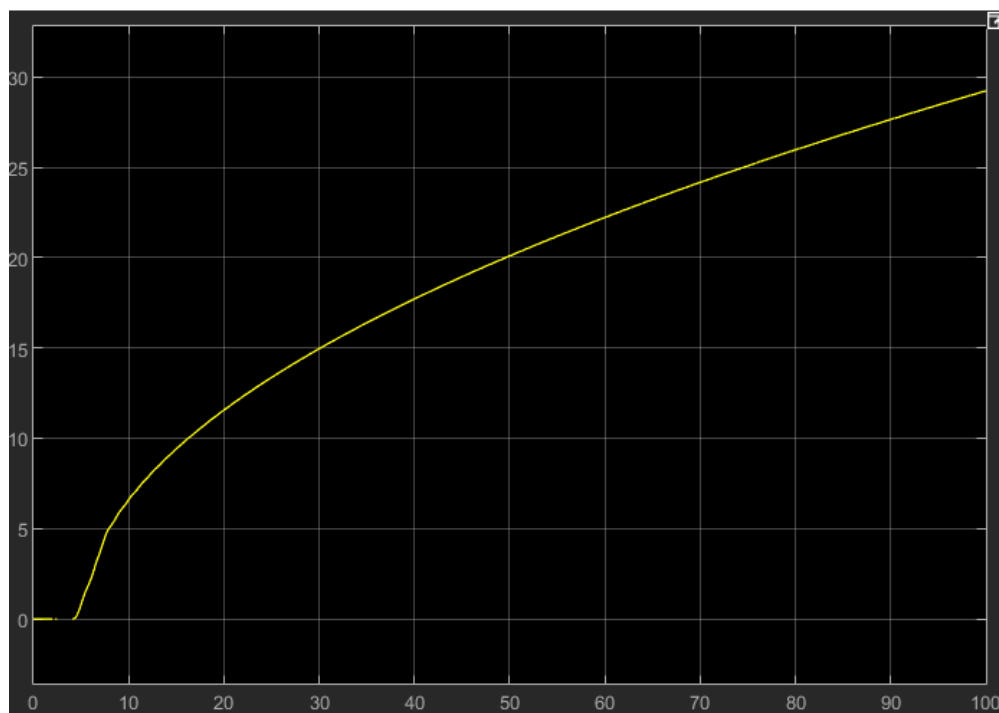




شکل ۱۳: خروجی  $x_1$



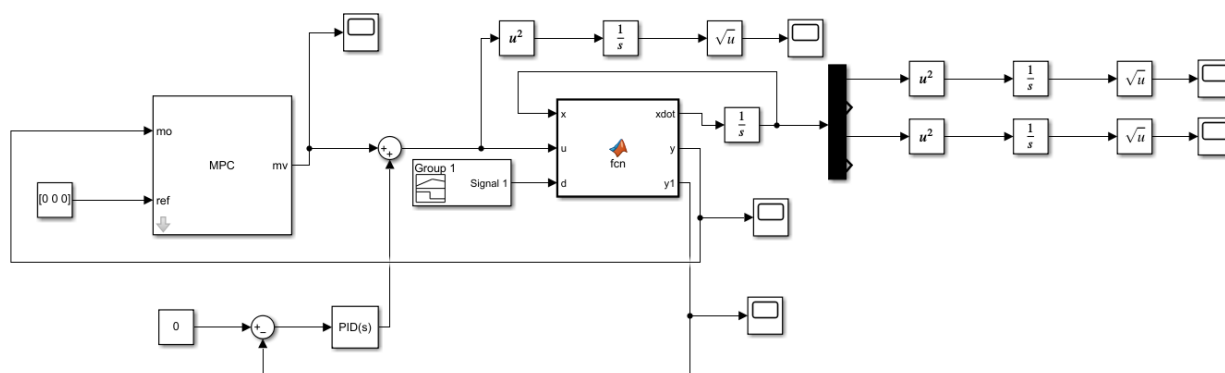
شکل ۱۴: خروجی  $x_3$


 شکل ۱۵: خروجی  $u$ 

در بررسی نمودار RMSE باید به این نکته دقت کنیم که هر چه نقطه نهایی به  $0$  نزدیک باشد سیستم ما عملکرد خوبی دارد. با بررسی نمودارهای مربوط به MPC مشاهده می کنیم که مقادیر نهایی  $x_1$  و  $x_3$  به  $1$  نزدیکتر هستند و میزان خطای ما بسیار کمتر از میزان خطای موجود در سیستم با کنترلر PID می باشد. پس این نشان می دهد عملکرد MPC خیلی بهتر است.

## ۲.۱ بخش دوم

در این قسمت باید MPC Tube را طراحی کنیم. بلوک دیاگرام مربوطه مطابق شکل ۱۶ می باشد. (دقت شود که با توجه به این شکل به بررسی RMSE نیز پرداخته می شود).



شکل ۱۶: بلوک دیاگرام مربوط به MPC Tube

متلب فانکشن مربوطه مطابق دستور زیر است:

```
1 function [xdot,y] = fcn(x,u,d)
2 % Parameter values
3 Ms = 2500; % Vehicle mass (kg)
4 Mu = 320; % Unsprung mass (kg)
5 ks = 80000; % Suspension stiffness (N/m)
6 kt = 500000; % Tire stiffness (N/m)
7 cs = 350; % Suspension damping (Ns/m)
8 ct = 15020; % Tire damping (Ns/m)
9
10 % State-space matrices
11 A = [0 1 0 0;
12 0 -cs/Ms -ks/Ms cs/Ms;
13 0 1 0 -1;
14 -kt/Mu cs/Mu (ks+kt)/Mu -(cs+ct)/Mu];
15
16 B = [0 ;
17 1/Ms ;
18 0 ;
19 -1/Mu ];
20
21 E = [0;
22 (cs*ct)/(Ms*Mu);
23 -ct/Mu;
24 (ct/Mu)*((kt/ct)-(cs/Mu)-(ct/Mu))];
25
26 C = [1 0 0 0;
27 0 1 0 0;
28 0 0 1 0];
29
30 D = [0;
31 0;
32 0];
33
34 F = [0; 0; 0];
35
```

```

36 xdot = A*x + B*u + E*d;
37 y = C*x + D*u + F*d;
38 y1 = y(1);
    
```

ابتدا باید ضرایب PID را بیابیم که از قسمت تیونر آن استفاده می کنیم. پارامترهای PID در شکل ۱۷ دیده می شود.

Proportional (P): 3778852.63684228

Integral (I): 12426817.657415

Derivative (D): 195850.591939797

شکل ۱۷: پارامترهای PID

سپس باید پارامترهای MPC را تنظیم کنیم. پارامترهای ما مطابق شکل ۱۸ می باشد.

The screenshot shows the MATLAB MPC Tuner interface with the following settings:

- Sample time:** 0.1
- Prediction horizon:** 100
- Control horizon:** 10
- Horizon:** scenario1: Input
- Input Constraints:**

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-Inf	Inf	-Inf	Inf
- Output Constraints:**

Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-1	1
y(2)	MO	-Inf	Inf
y(3)	MO	-Inf	Inf
- Input Weights (dimensionless):**

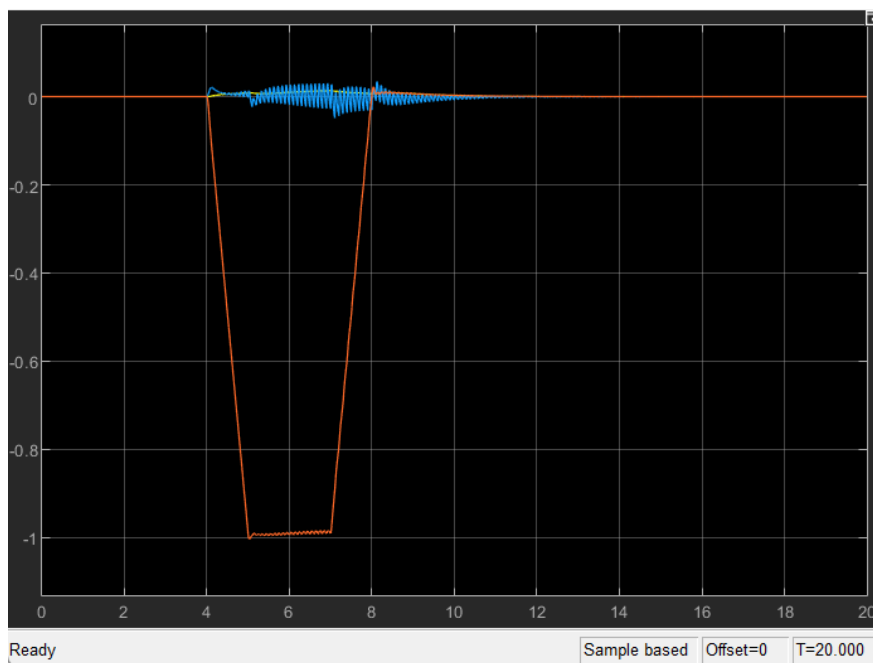
Channel	Type	Weight	Rate Weight	Target
u(1)	MV	0	0.0001	nominal
- Output Weights (dimensionless):**

Channel	Type	Weight
y(1)	MO	20
y(2)	MO	0.1
y(3)	MO	3
- ECR Weight (dimensionless):**

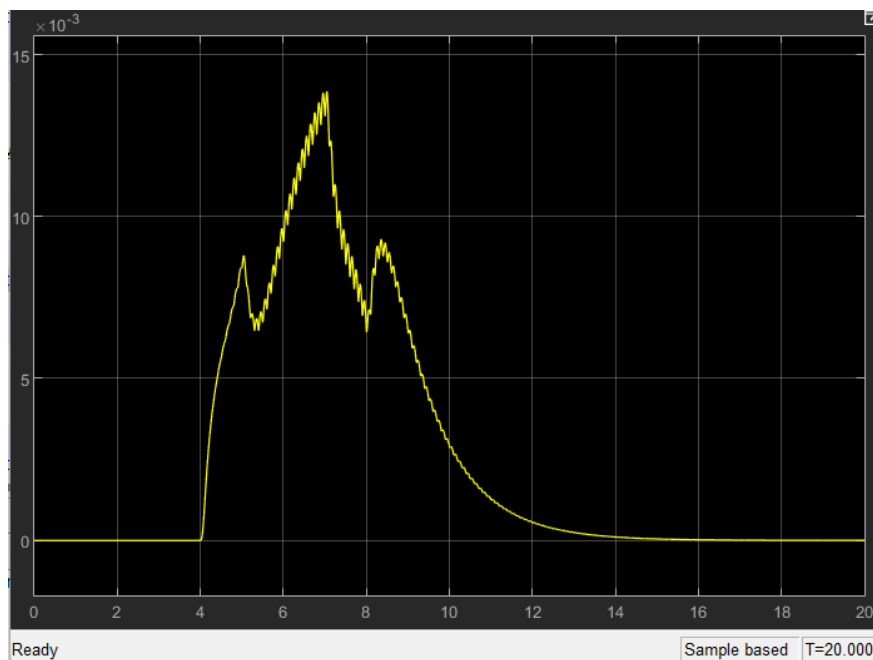
Weight on the slack variable: 100000

شکل ۱۸: پارامترهای MPC

حال می توان به بررسی نمودارهای مربوطه پرداخت. ابتدا نمودار خروجی سیستم را در شکل ۱۹ مشاهده می کنیم. می بینیم که نوسانات سیستم ما بسیار کاهش یافته است و در نهایت همه خروجی های ما پایدار شدند. همچنین خروجی اول را که کنترل کردیم در شکل ۲۰ مشاهده می کنیم. همانطور که می بینیم این خروجی به خوبی پایدار می شود.



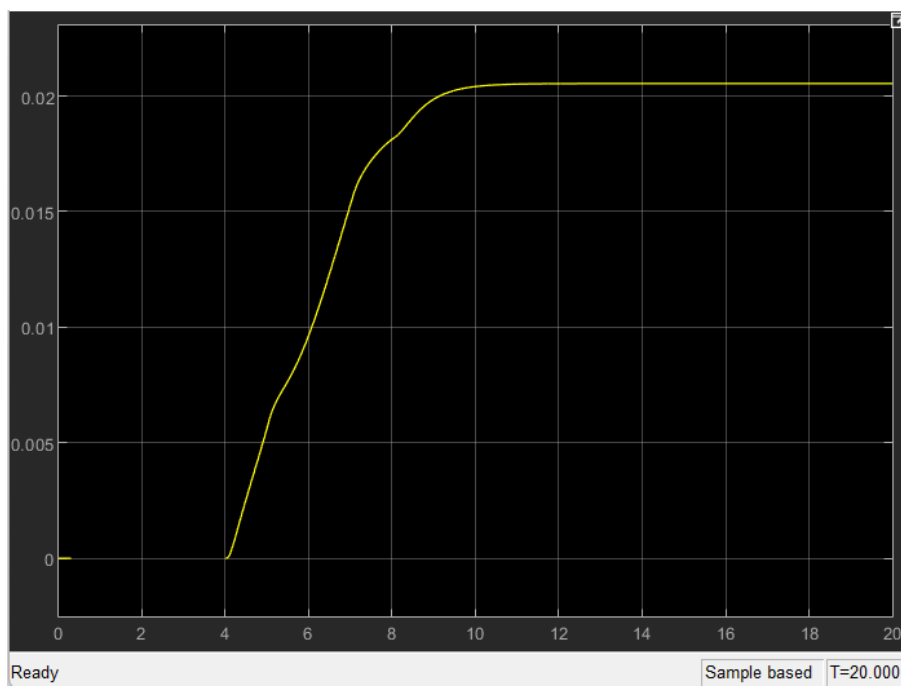
شکل ۱۹: نمودار خروجی سیستم



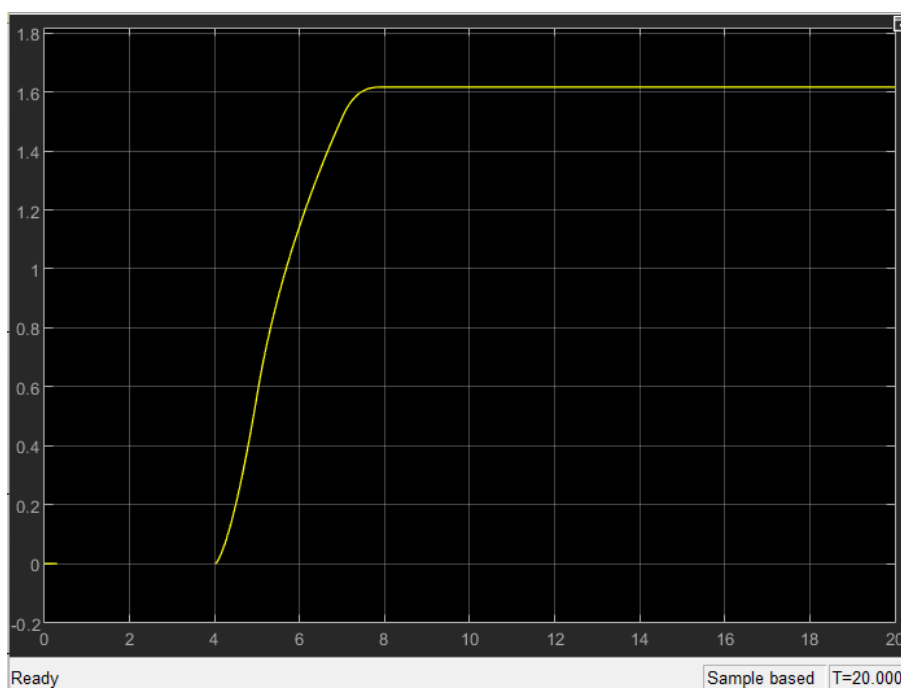
شکل ۲۰: نمودار خروجی اول سیستم

در ادامه به بررسی خطای RMSE سیستم می پردازیم. خروجی نمودار RMSE برای  $x_1$  و  $x_3$  و  $u$  به ترتیب در شکل ۲۱ و شکل ۲۲ و شکل ۲۳ مشاهده می شود. مشاهده می کنیم که در حالتی که سیستم ما MPC Tube دارد میزان این خطا کمتر از قبل است که این معیار نیز نشان دهنده مناسب بودن MPC Tube نسبت به بقیه MPC ها می باشد. (میزان RMSE نزدیکتر به ۰ می باشد. در ضمن با توجه به کنترل شدن خروجی اول

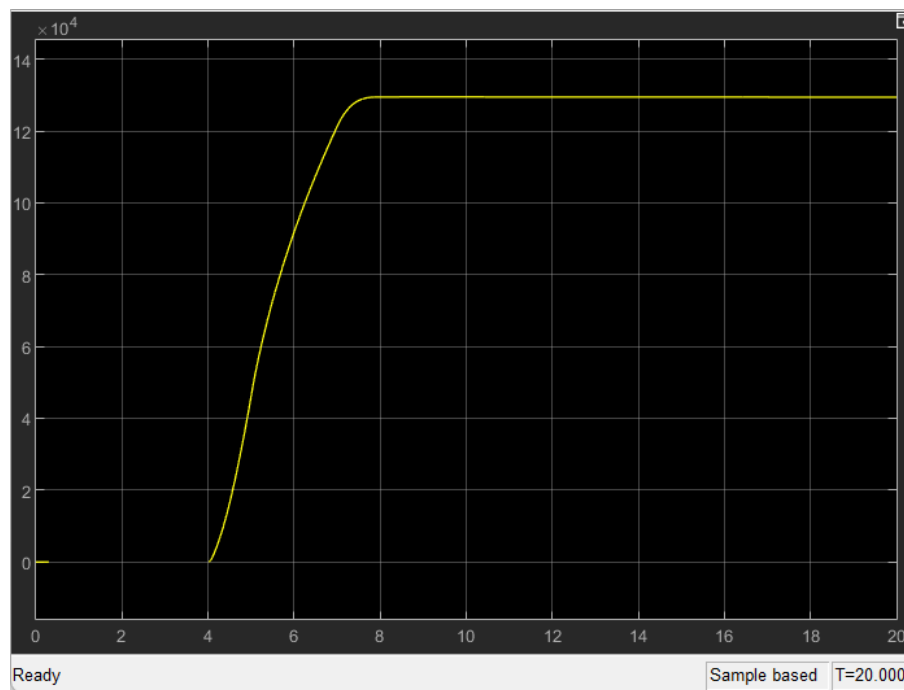
همانطور که از شکل ۲۱ مشخص است میزان RMSE بسیار بسیار کاهش پیدا کرده است.



شکل ۲۱: خروجی  $x_1$



شکل ۲۲: خروجی  $x_3$


 شکل ۲۳: خروجی  $u$ 

۳.۱ بخش سوم

۱.۳.۱ طراحی MPC Explicit

ابتدا باید دستور زیر را در متلب اجرا کنیم. پارامترهای این دستور طبق قسمت الف می باشند.

```

1 %%
2 clc
3 clear
4 close all;
5
6 Ms = 2500;    % Vehicle mass (kg)
7 Mu = 320;    % Unsprung mass (kg)
8 ks = 80000;  % Suspension stiffness (N/m)
9 kt = 500000; % Tire stiffness (N/m)
10 cs = 350;    % Suspension damping (Ns/m)
11 ct = 15020;  % Tire damping (Ns/m)
12
13 % State-space matrices
14 A = [0      1      0      0;
15      0  -cs/Ms  -ks/Ms  cs/Ms;
    
```

```
16      0      1      0      -1;
17      -kt/Mu   cs/Mu   (ks+kt)/Mu   -(cs+ct)/Mu];
18
19  B = [0 ;
20       1/Ms ;
21       0 ;
22       -1/Mu ];
23
24  E = [0;
25       (cs*ct)/(Ms*Mu);
26       -ct/Mu;
27       (ct/Mu)*((kt/ct)-(cs/Mu)-(ct/Mu))];
28
29  C = [1 0 0 0;
30       0 1 0 0;
31       0 0 1 0];
32
33  D = [0;
34       0;
35       0];
36
37  F = [0; 0; 0];
38
39  System=ss(A,B,C,D);
40  Ts=0.1;
41  Np=80;
42  Nc=20;
43  M0=struct('min',-1.1,'max',1.1);
44  MV=struct('min',-2.5,'max',2.5);
45  R=0.01;
46  Q = diag([10, 1, 5]);
47  S=0.1;
48  Weights=struct('ManipulatedVariables',R, 'ManipulatedVariablesRate',S, '
      OutputVariables',Q);
49
50  MPCObj=mpc(System,Ts,Np,Nc,Weights,MV,M0);
```



```

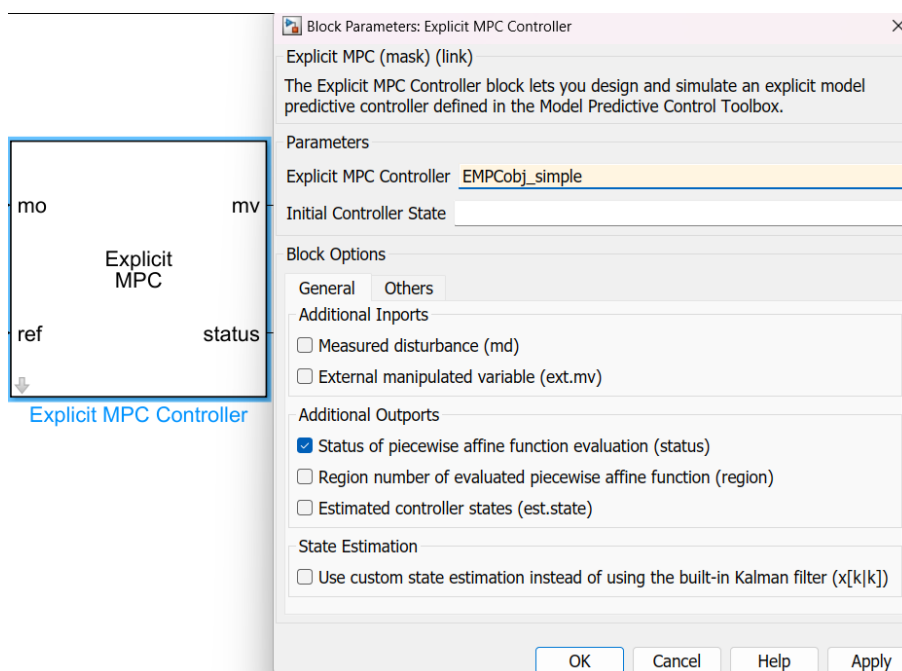
51 %%
52 range=generateExplicitRange(MPCobj);
53
54 range = generateExplicitRange(MPCobj);
55 range.State.Min(:) = [-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1];
56 range.State.Max(:) = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];
57
58 range.ManipulatedVariable.Min = -0.8;
59 range.ManipulatedVariable.Max = 0.03;
60
61 range.reference.Min = [-1,-1,-1,-1];
62 range.reference.Max = [1,1,1,1];
63
64 EMPCobj=generateExplicitMPC(MPCobj , range);
65
66 EMPCobj_simple=simplify(EMPCobj , 'exact');
67
68 disp('EMPCobj_simple');
69
70 params=generatePlotParameters(EMPCobj);
71 params.Reference.Index(1)=1;
72 params.Reference.Value(1)=0;
73 params.Manipulatedvariable.Index(1)=1;
74 params.Manipulatedvariable.Value(1)=0;
75 params.State.Index=1;
76 params.State.Value=0;
    
```

حال که طراحی کنترل کننده MPC با موفقیت انجام شده است میتوانیم از این کنترلر استفاده کرده و در محیط شبیه سازی سیمولینک کار خود را برای شبیه سازی ادامه دهیم. نحوه شبیه سازی با این بلوک مقدار زیادی گنگ بود که مجبور بودیم با سرچ کردن نحوه کار کردن با آنها را متوجه شویم. در ابتدا بایستی بصورت بالا و بصورت اسکریپت کنترل کننده ExplicitMPC را طراحی کنیم. سپس در محیط سیمولینک بلوک کنترل کننده ExplicitMPC را به محیط اضافه کرده و در قسمت تنظیمات آن بلوک نام کنترلی که بصورت اسکریپ طراحی شده است را وارد کنیم تا با ارور مواجه نشویم.

همانطور که در بالا دیدید با دستور زیر کنترلر ExplicitMPC ما طراحی شد و با ساده سازی آن، نام نهایی کنترلر طراحی شده بصورت **شکل ۲۴** در آمده است:

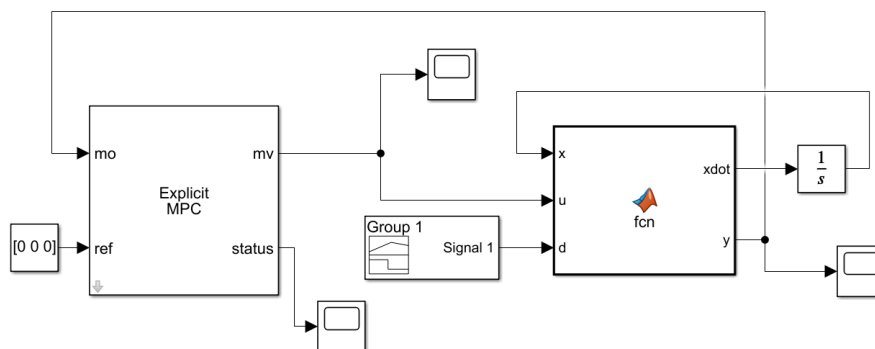
```

1 EMPCobj_simple=simplify(EMPCobj , 'exact');
    
```



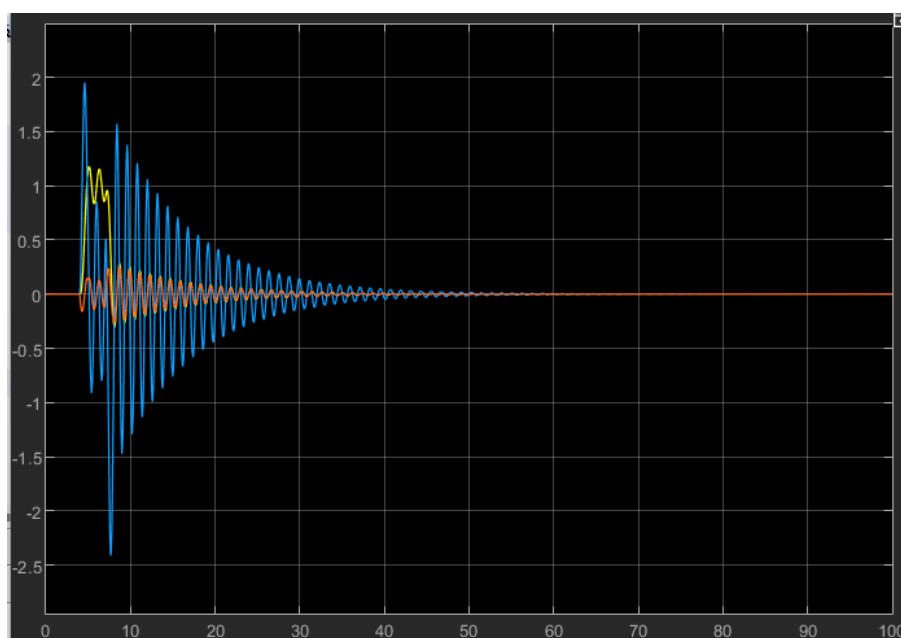
شکل ۲۴: تنظیم ExplicitMPC

حال که موفق شدیم بدون دادن ارور بصورت زیر یک ExplicitMPC طراحی کنیم و خروجی آن بصورت شکل ۲۵ تنظیم گردیده است.



شکل ۲۵: بلوک دیاگرام ExplicitMPC

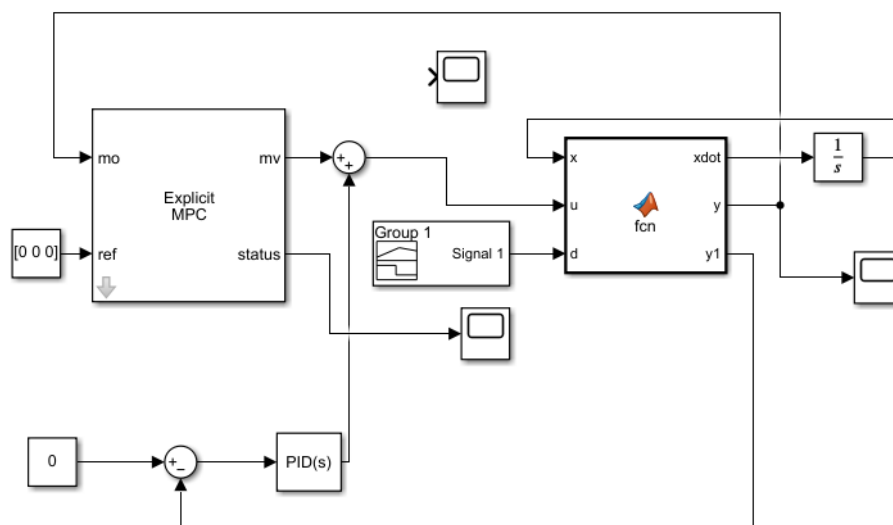
در ادامه در شکل ۲۶ خروجی سیستم را مشاهده می کنیم. اگر مقداری دقیق تر مشاهده کنیم متوجه میشویم که پاسخ کنترل کننده MPC خطی و Explicit تقریباً یکی شده است و روی هم قرار گرفته اند. که مطابق انتظار ما بوده است. در واقع مسئله بهینه سازی چه بصورت افلاین و چه بصورت آنلاین باید به یک جواب برسد.



شکل ۲۶: خروجی ExplicitMPC

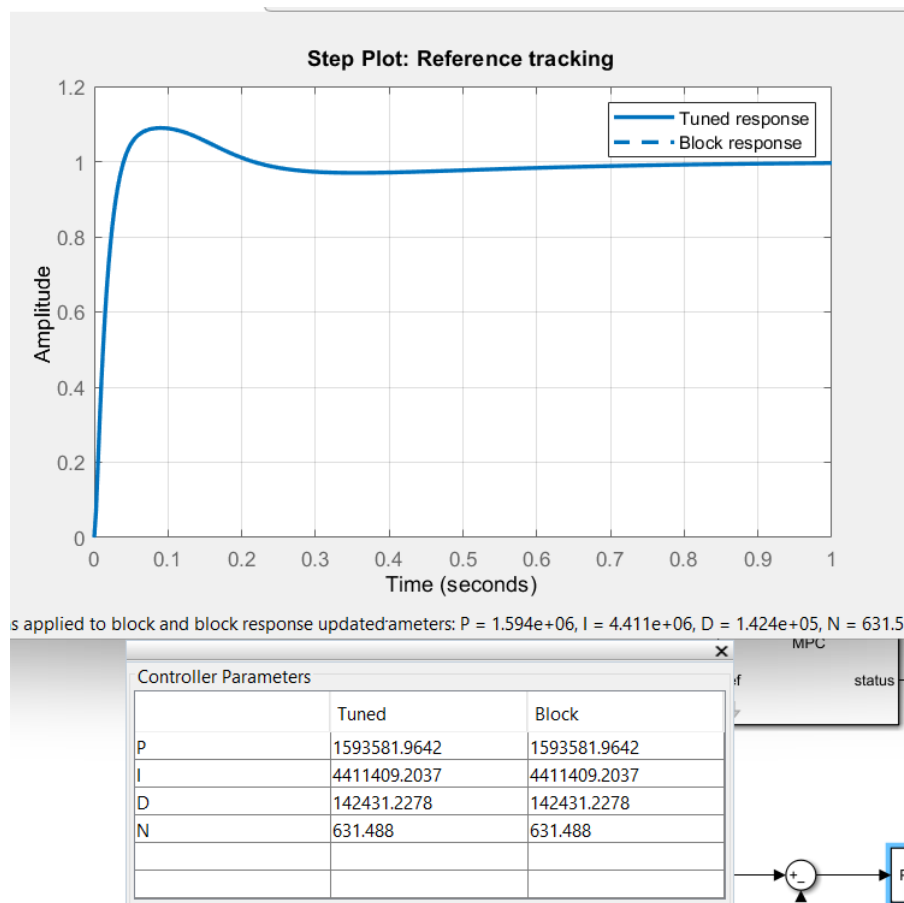
### ۲.۳.۱ طراحی MPC Tube Explicit

با اضافه شدن کنترلر PID طراحی جدیدی را مشاهده می کنیم که حالت tube است. این طراحی در شکل ۲۷ می باشد.



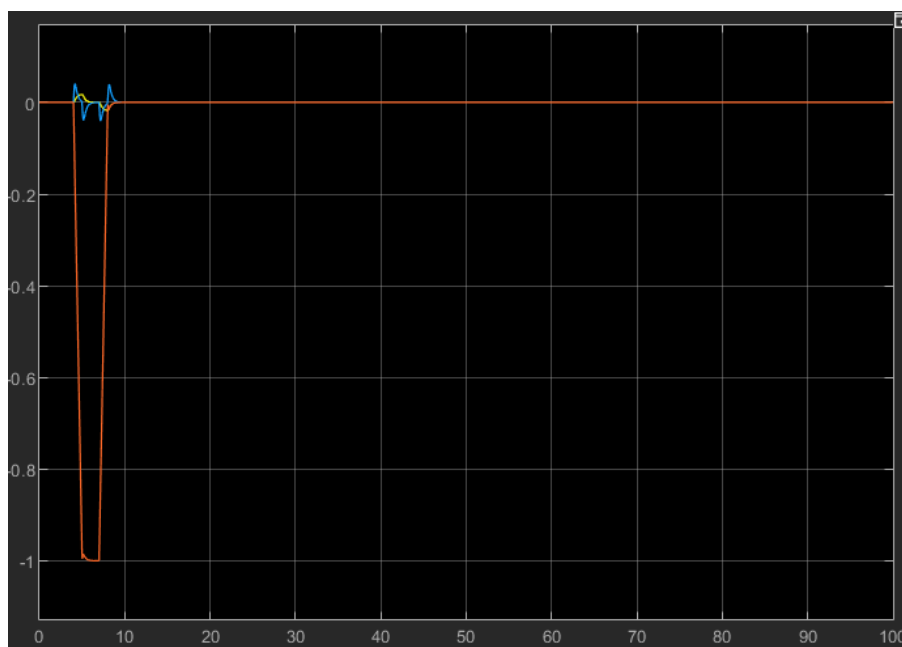
شکل ۲۷: بلوک دیاگرام MPC Tube Explicit

در ادامه در شکل ۲۸ پارامترها و خروجی PID را مشاهده می کنیم.



شکل ۲۸: پارامترها و خروجی PID

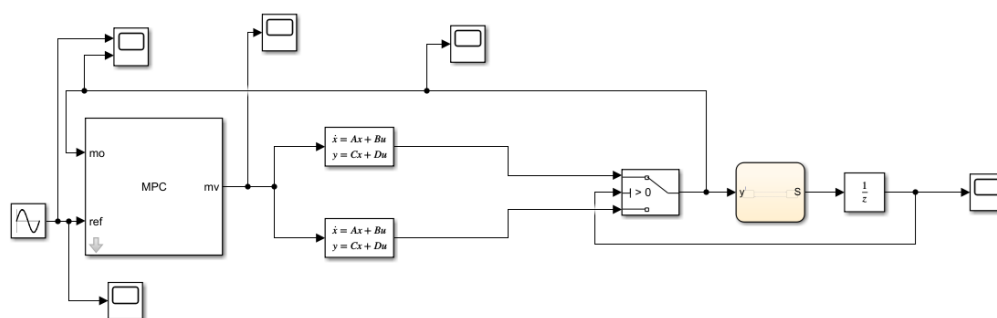
حال در شکل ۲۹ خروجی سیستم را مشاهده می کنیم. می بینیم که نتایج این قسمت نیز مانند بخش MPC Tube است. PID نوسانات سیستم را کم کرده است و باعث پدید آمدن نتیجه مطلوب تری نسبت به MPC Explicit شده است. به طور کلی برای نتیجه می توان گفت بهبودی که استفاده از کنترلر MPC Explicit در سیستم ایجاد می کند، صرفاً سرعت بالاتر محاسبات است.



شکل ۲۹: خروجی ExplicitMPC

## ۲ سوال دوم

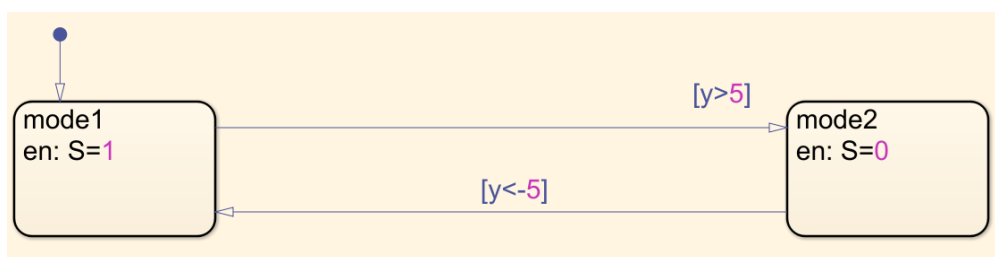
ابتدا باید به طراحی سیستم در سیمولینک پردازیم. شمای کلی آن در شکل ۳۰ قابل مشاهده می باشد. در ضمن فضای حالت های ما در شکل ۳۱ و چارت مربوط به سویچ ما در شکل ۳۲ مشاهده می شود.



شکل ۳۰: بلوک دیاگرام MPC Hybrid

Parameters		Parameters	
A:	[0 2 ; -2 -2]	A:	[0 4 ; -4 -4]
B:	[0;2]	B:	[0;4]
C:	[1 0]	C:	[1 0]
D:	[0]	D:	[0]
Initial conditions:	[0.5 ; 0]	Initial conditions:	[0.5 ; 0]

شکل ۳۱: فضای حالت سیستم دارای MPC Hybrid



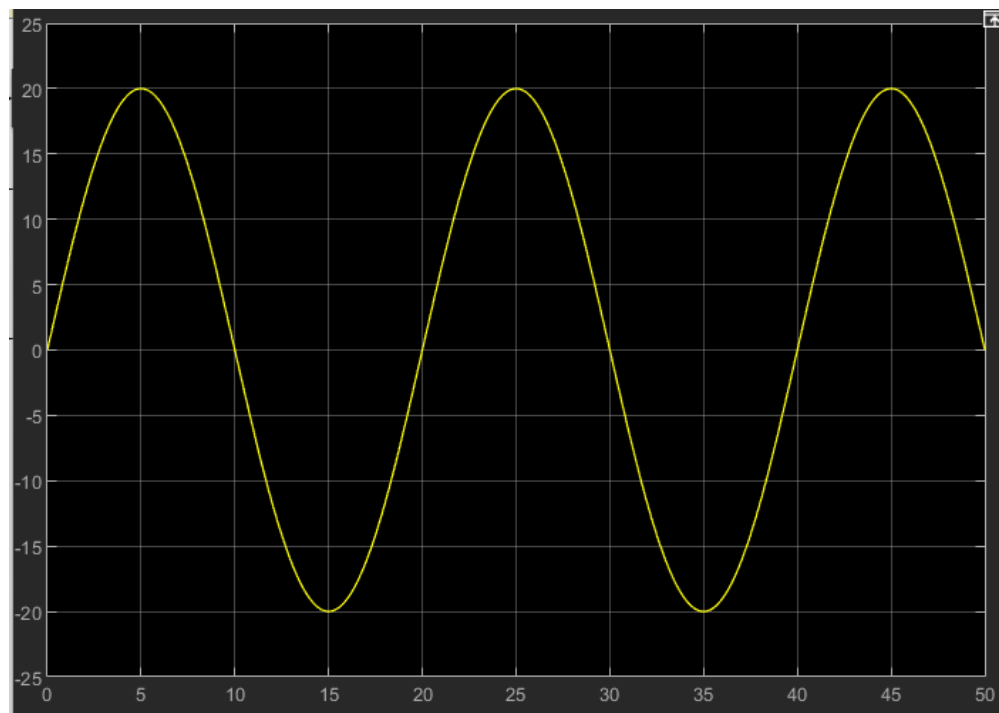
شکل ۳۲: چارت مربوط به سویچ

حال که سیستم را طراحی کردیم تنظیمات MPC مدنظر را اعمال می کنیم. این پارامترها طبق گفته سوال هستند و در شکل ۳۳ قابل مشاهده می باشند.

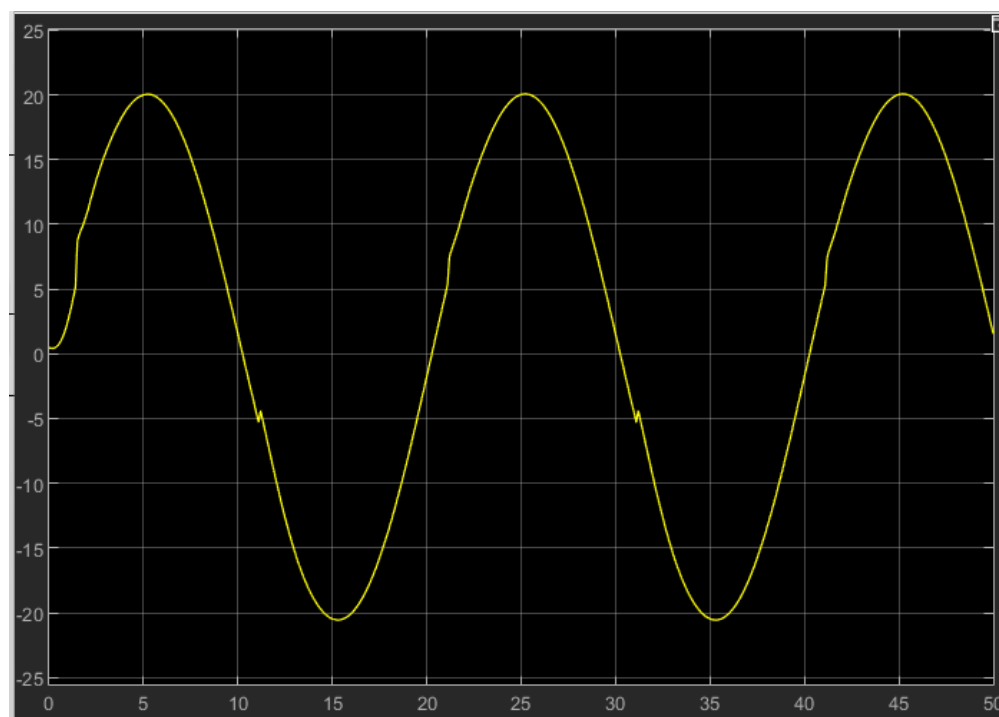
Constraints (mpc1)						Weights (mpc1)				
<b>Input Constraints</b>						<b>Input Weights (dimensionless)</b>				
Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax	Channel	Type	Weight	Rate Weig...	Target
u(1)	MV	-30	30	-Inf	Inf	u(1)	MV	0	0.1	nominal
+ Constraint Softening Settings										
<b>Output Constraints</b>						<b>Output Weights (dimensionless)</b>				
Channel	Type	Min	Max			Channel	Type	Weight		
y(1)	MO	-30	30			y(1)	MO	5		

شکل ۳۳: تنظیمات MPC

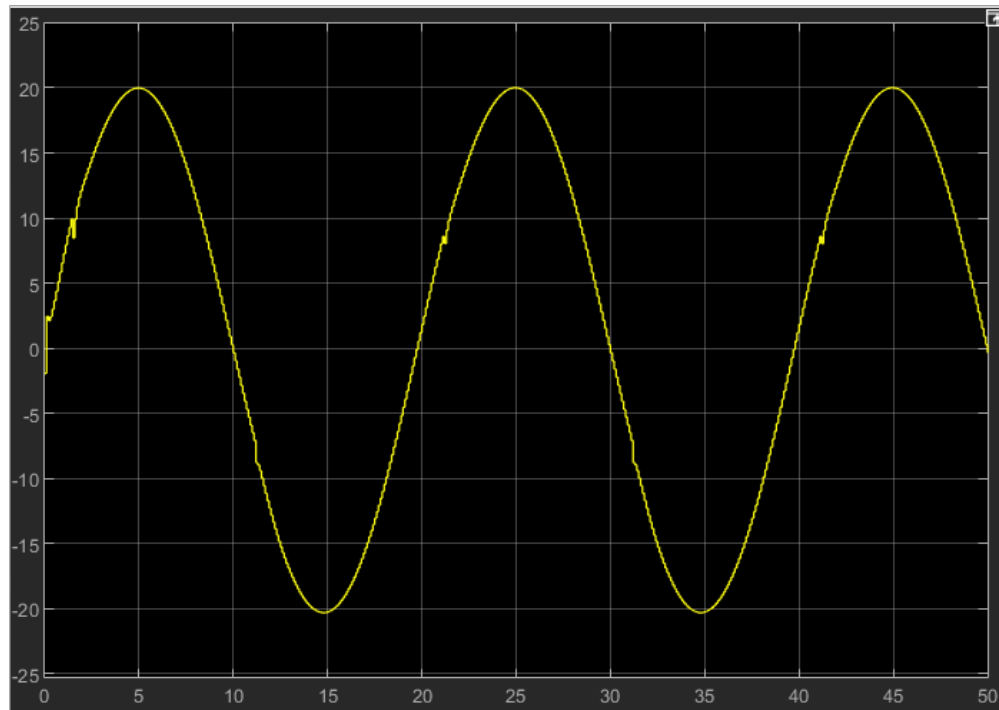
حال پس از اجرای برنامه می توانیم نمودارهای خواسته شده را مشاهده کنیم. نمودار ورودی رفرنس ( $r(t)$ ) در شکل ۳۴، نمودار خروجی رفرنس ( $y(t)$ ) در شکل ۳۵، نمودار ورودی کنترلر ( $u(t)$ ) در شکل ۳۶، نمودار تغییرات سویچ ها ( $S(t)$ ) در شکل ۳۷ و نمودار رفرنس و خروجی با هم در شکل ۳۸ مشاهده می شود.



شکل ۳۴: نمودار  $r(t)$

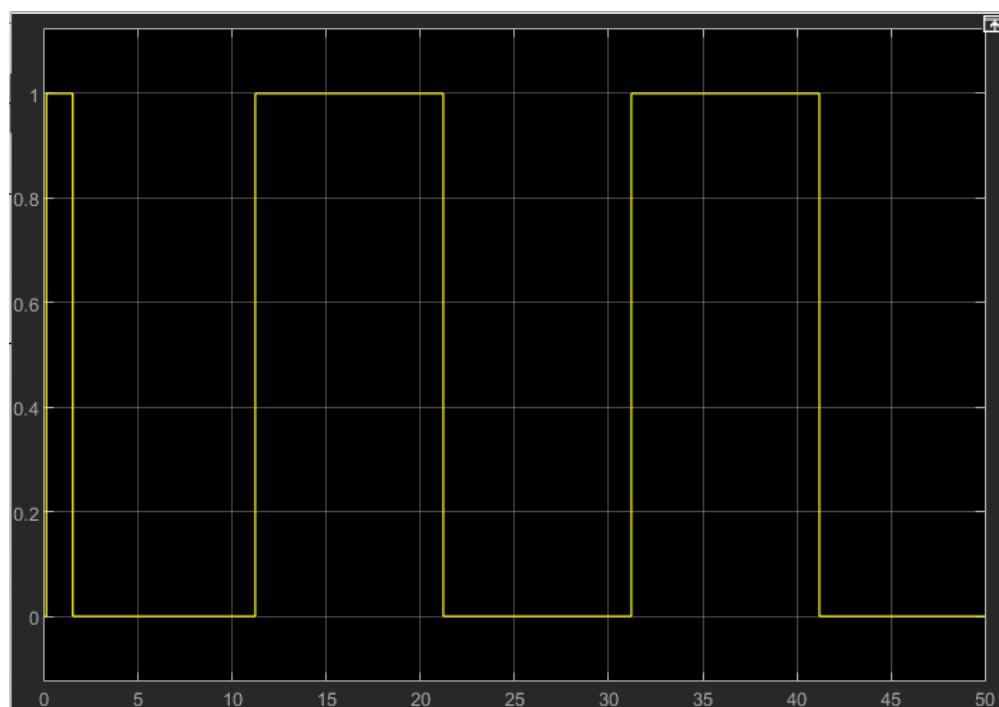


شکل ۳۵: نمودار  $y(t)$

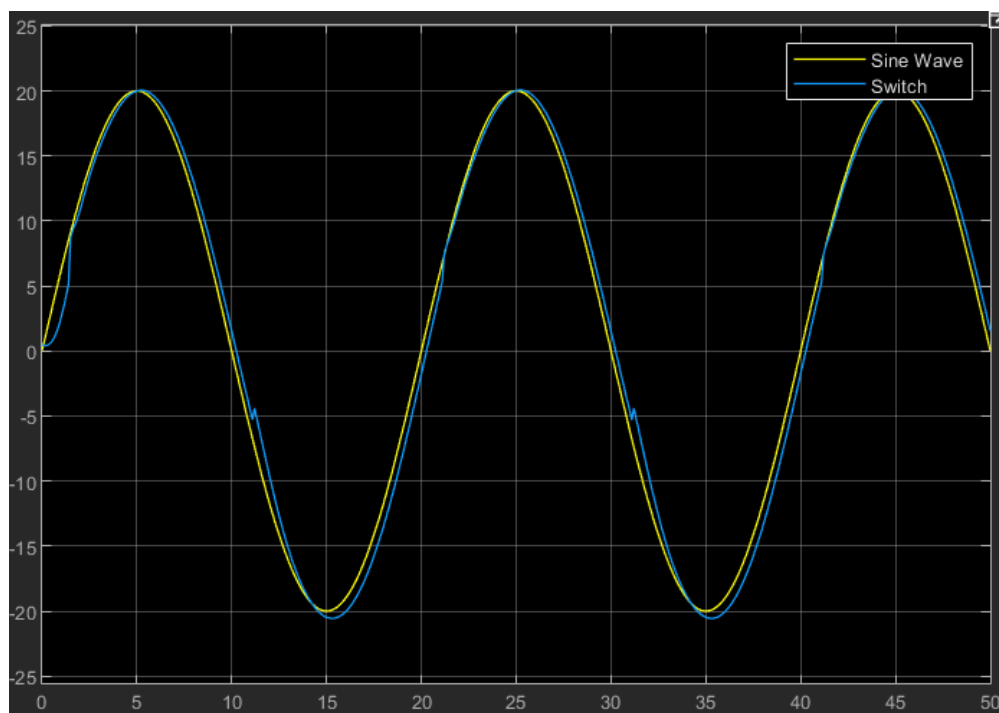


شکل ۳۶: نمودار  $u(t)$





شکل ۳۷: نمودار  $S(t)$



شکل ۳۸: نمودار  $y(t)$  و  $r(t)$



با بررسی این نمودارها متوجه می شویم که خروجی ما به خوبی ورودی ما که نمودار سینوسی است را ردیابی می کند یعنی کنترلر ما به خوبی عمل می کند. در نقاط ۵ و ۵- ما شاهد یک شیفت هستیم زیرا در این نقاط مدل سیستم تغییر می کند و از مد ۱ به مد ۲ و مد ۲ به مد ۱ تغییر پیدا می کند. به همین دلیل باعث ایجاد تغییرات کمی در ردیابی ورودی می شود. چون در نقاط ۵- میزان شیفت ما بیشتر است پس می توان گفت که مدل دوم ما عملکرد مناسب تری نسبت به مدل اول دارد.