

دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
( پلی تکنیک تهران )

پروژه کنترل خطی

سیستم تعلیق خودرو برای یک چرخ

پژوهشگران:

نیکا سلطانی تهرانی

نیلوفر توحیدی

مریم حیدری

ملیکا صالحیان

مهبان قلی جعفری

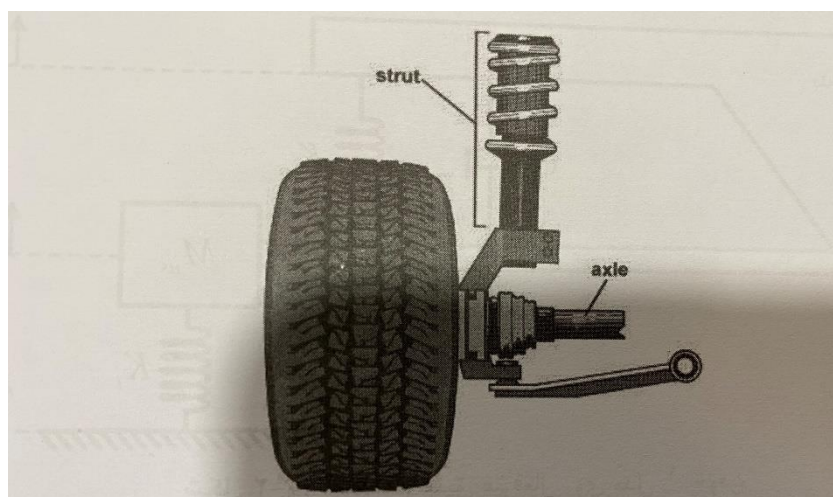
استاد راهنما

دکتر ایمان شریفی

زمستان ۹۹

## سیستم تعلیق خودرو

خودروها و سایل نقلیه از جمله سیستم هایی هستند که استفاده از سیستم های کنترل در آن ها از مدت ها پیش مورد توجه بوده است. کنترل موتور ، کنترل سیستم تعلیق، سیستم ترمز ضدقفل و غیره. این مقاله به بررسی سیستم تعلیق خودرو که از قدیمی ترین سیستم های کنترل به کار رفته در خودروهاست، می پردازد.



شکل ۱- سیستم تعلیق خودرو

در خودرو های سواری قدیمی همانطور که در شکل بالا نشان داده شده، سیستم تعلیق به صورت یک مجموعه فنر-کمک فنر(میراکننده) بین بدنه و محور چرخ های خودرو قرار دارد.

هدف اصلی به کار گیری سیستم تعلیق، کاهش نیروی منتقل شده به سرنشینان داخل خودرو در اثر دست اندازهای جاده و نیز بهبود میزان فرمان پذیری خودرو است. این دو موضوع در نهایت سبب کاهش خستگی مسافری و افزایش ایمنی در رانندگی خواهد شد.

در ادامه به بررسی حذف اثر اغتشاشات جاده و افزایش میزان فرمان پذیری خودرو می پردازیم .

## حذف اثر اغتشاشات جاده

هرچه میزان نیروی عمودی وارده به بدنه خودرو بیشتر باشد میزان خستگی مسافران درون خودرو بیشتر خواهد شد؛ بنابراین یک سیستم تعلیق خوب باید بتواند میزان بیشتری از نیروی ناشی از ناهمواری های جاده را در خود تلف کرده و در نتیجه نیروی عمودی کمتری به بدنه اعمال نماید.

واضح است که سیستم تعلیق در حین انجام این کار نباید دچار نوسان های شدید و مخرب شود .

## افزایش میزان فرمان پذیری خودرو

منظور از فرمان پذیری در خودرو، میزان تبعیت خودرو از فرامین راننده برای تغییر شرایط فعلی حرکت (تغییر مسیر، تغییر شتاب و...) است. فرمان پذیری خودرو در صورتی مناسب است که راننده آن بتواند به صورتی ایمن و تحت کنترل تغییر مسیر دهد، ترمز بگیرد و یا به خودرو شتاب دهد. لازمه این موضوع تماس دائمی چرخ های خودرو با سطح جاده است. در این صورت، اصطکاک بین سطح لاستیک و جاده منجر به فرمان پذیری بهتر خودرو خواهد شد. یک وظیفه عمده سیستم تعلیق آن است که با فشردن لاستیک بر روی جاده، تماس لاستیک با سطح جاده را تحت هر شرایطی (تغییر مسیر، ترمز، شتاب گرفتن و...) برقرار سازد.

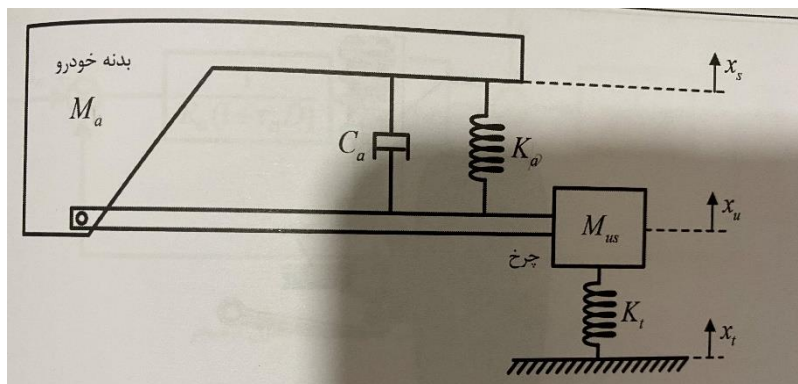
## دسته بنده سیستم های تعلیق

سیستم تعلیق بر پایه پارامترهای سختی و میرایی به قرار زیر دسته بندی می شوند:

۱. سیستم تعلیق غیرفعال
۲. سیستم تعلیق نیمه فعال
۳. سیستم تعلیق فعال

### ۱. سیستم تعلیق غیرفعال

در سیستم تعلیق غیرفعال منبع انرژی بیرونی وجود نداشته و این سیستم تنها توانایی بازیابی و میرایش انرژی را دارد؛ بنابراین اثرات ناخواسته و ناراحت کننده حرکات غلتش بدنه در هنگام چرخش خودرو، کله زدن بدنه در هنگام شتاب گیری و ترمزدهی، بلند شدن و جابه جایی مانای بدنه نسبت به سیستم تعلیق در هنگام چرخش پایدار خودرو و ... هیچگاه از بین نمی رود. از آنجا که در این سیستم منبع انرژی بیرونی وجود ندارد، بنابراین ساده ارزان و قابل اعتماد است در بیشتر این سیستم ها مقادیر سختی فنر و میرایی لرزه گیر ثابت بوده و با برگزیدن ضرایب مناسب و کاهش بلندی گرانیگاه خودرو می توان به کیفیت خوش سواری و فرمان پذیری خوبی دست یافت. فنر نرم بر واکنش شتاب گیری، ترمز گیری و چرخش خودرو تاثیرات منفی دارد.



شکل ۲- سیستم تعلیق غیرفعال

در این سیستم از یک مجموعه فنر-کمک فنر (میراکننده) با ضرایب ثابت و غیرفعال و غیرقابل کنترل استفاده می شود. در این سیستم هیچگونه کنترل خودکاری انجام نمی گیرد. از آن جا که دو هدف سیستم تعلیق (افزایش راحتی سرنشینان- بهبود فرمان پذیری خودرو) در تقابل باهم هستند، لذا در این نوع سیستم ها عموماً یک هدف تا حد زیادی فدای هدف دیگری می شود.

$M_b$  = جرم بدنه خودرو

$M_{us}$  = جرم چرخ

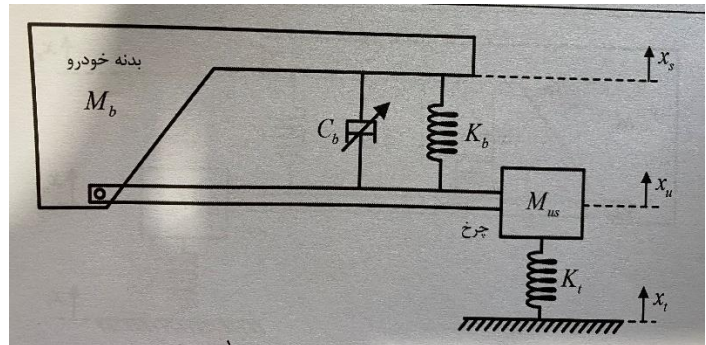
$K_t$  = خاصیت فنری لاستیک

میراکنندگی لاستیک =  $C_t$

فنر چرخ =  $K_a$

کمک فنر چرخ =  $C_a$

## ۲. سیستم تعلیق نیمه فعال

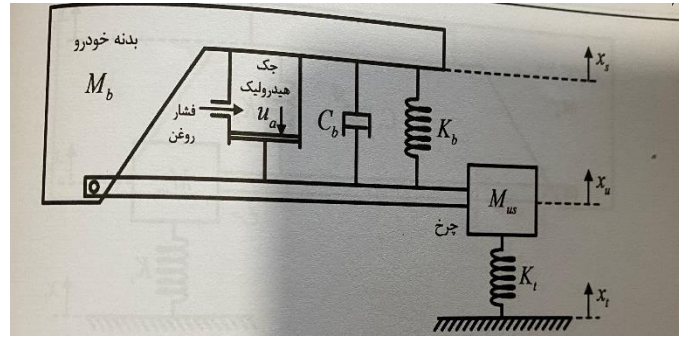


شکل 3 - سیستم تعلیق نیمه فعال

در این سیستم ها همانطور که در شکل ها نشان داده شده است، از یک فنر به همراه کمک فنر (میرا کننده) که ضریب میرایی آن قابل تنظیم است، استفاده می شود. به علاوه با نصب حسگر هایی روی محور چرخ ها و بدنه خودرو، میزان جابجایی آن ها و سایر پارامتر های مورد نیاز را استخراج می نمایند. در نهایت لازم به ذکر است که کنترل کننده با توجه به اهداف سیستم تعلیق ضریب کمک فنر را تغییر می دهد لازم به ذکر است که تغییر ضریب کمک فنر به صورت پیوسته نیست و تنها بین چند مقدار خاص قابل توجه است.

## ۳. سیستم تعلیق فعال

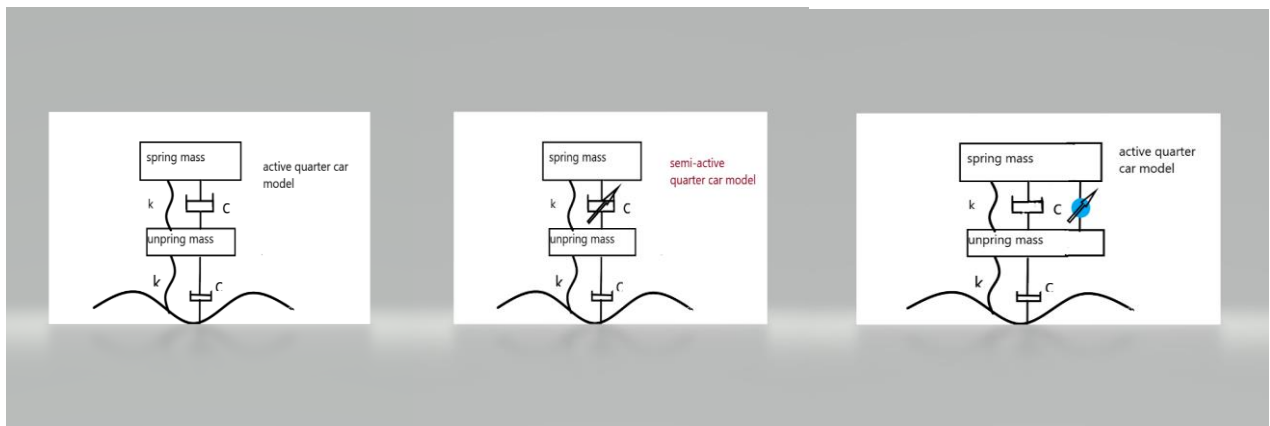
در این سیستم از یک جک هیدرولیک به موازات مجموعه فنر-کمک فنر (میرا کننده) استفاده می شود. فشار روغن قابل کنترل است و کنترل کننده با توجه به داده های دریافتی حسگر (جابه جایی بدنه و محور چرخ ها) و نیز راهکار کنترل مورد استفاده سیگنال کنترل را تنظیم کند. از آن جا که در این روش برخلاف روش نیمه فعال سیگنال کنترل به طور پیوسته قابل تغییر است می توان اهداف یک سیستم تعلیق مناسب را بهتر محقق کرد اما هزینه بالای پیاده سازی سیستم سبب شده است که توسعه آن به کندی انجام گیرد.



شکل ۴- سیستم تعلیق فعال

## مدلسازی

هدف این مقاله طراحی کنترل کارآمد برای سیستم تعلیق خودرو است. همانطور که پیش تر توضیح دادیم، هدف از این سیستم در وسایل نقلیه این است که سرنشینان احساس راحتی بیشتری داشته باشند و رانندگی با خودرو برای راننده بهتر ایمن تر و راحت تر باشد.

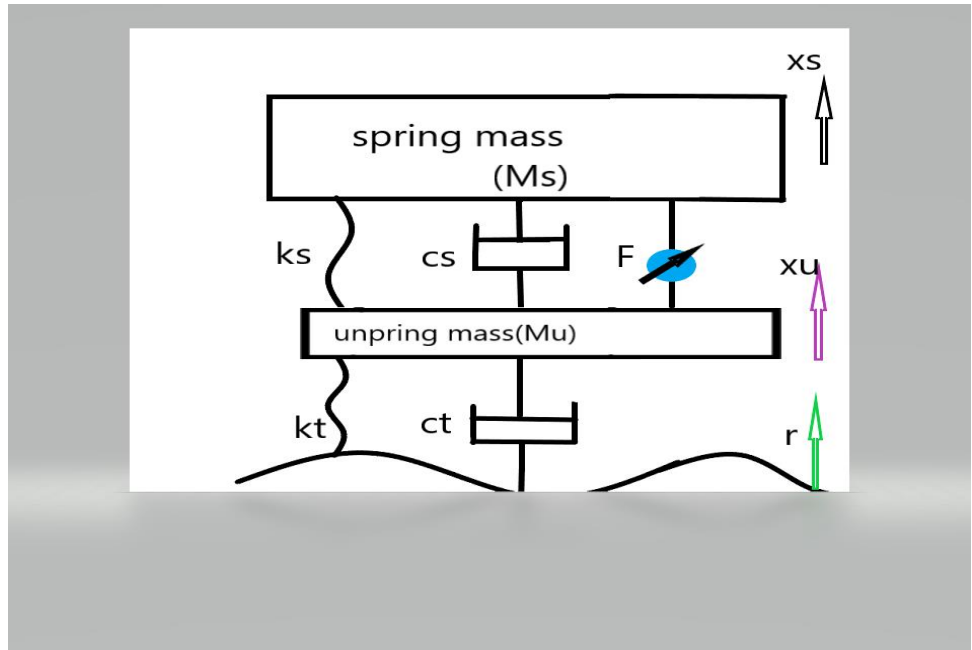


در شکل اول یک محرک هیدرولیکی غیرخطی به موازات دمپر سیستم تعلیق غیرفعال متصل می شود.

از بهینه سازی ازدحام ذرات برای تنظیم کنترل کننده PID، برای سیستم تعلیق فعال استفاده می شود. کنترل کننده طراحی شده برای سیستم تعلیق یک چهارم خودرو استفاده می شود و نتیجه آن با مدل سیستم تعلیق غیرفعال و مشخصات جاده ورودی مقایسه می شود. نتیجه شبیه سازی عملکرد خوبی را برای کنترل کننده طراحی شده نشان می دهد.

بررسی مدل سیستم تعلیق فعال برای یک چهارم خودرو

مدلسازی غیرخطی



$M_s$  : car chassis mass

$M_u$  : wheel mass

$K_s$  : spring stiffness

$K_t$  : tire stiffness corresponded to spring

$C_s$  : dumper force

$C_t$  : tire force corresponded to dumber

$F$ : actuat or force

$X_s$  : body displacement

$X_u$  : wheel displacement

$r$ : road profile

محاسبه معادلات غیرخطی دینامیکی با استفاده از قانون نیوتون

$$\Sigma F = ma$$

Equations:

Spring mass part

$$M_s \ddot{X}_s + K_s(X_s - X_u) + C_s(\dot{X}_s - \dot{X}_u) - F = 0$$

Unspring mass part

$$M_u \ddot{X}_u + K_t(X_u - r) + C_t(\dot{X}_u - \dot{r}) - K_s(X_s - X_u) - C_s(\dot{X}_s - \dot{X}_u) + F = 0$$

Ps: Supply pressure

Xv: Spool displacement of servo valve

$$Pl = -\beta Pl - \sigma A_p(\dot{X}_s - \dot{X}_u) + \gamma X_v \sqrt{P_s - Pl} \operatorname{sgn}(\dot{x}_v)$$

$$\frac{1}{\tau}(U_m - X_v)$$

Xv: valve displacement

Um: control signal to spool

$$F = Pl A_p$$

Ap= Cross section area of actuator piston



فضای حالت برای معادلات غیرخطی

$$\dot{X}_1 = X_2 - X_4$$

$$\dot{X}_2 = -\frac{Ks}{Ms}X_1 - \frac{Cs}{Ms}X_2 + \frac{Ap}{Ms}X_5 \dots$$

$$\dot{X}_3 = X_4 - \dot{r}$$

$$\dot{X}_4 = -\frac{Kt}{Mu}X_3 - \frac{Ct}{Mu}X_4 + \frac{Cs}{Mu}X_2 - \frac{Cs}{Mu}X_4 - \frac{Ap}{Mu}X_5$$

$$\dot{X}_5 = -\beta X_5 - \sigma Ap X_2 + \gamma X_6 \sqrt{(Ps - X_5 Sgn(X_6))}$$

$$\dot{X}_6 = \frac{1}{\tau}(Um - X_6)$$

$$X_1 = X_s - X_u$$

$$X_2 = \dot{X}_s$$

$$X_3 = X_{u-r}$$

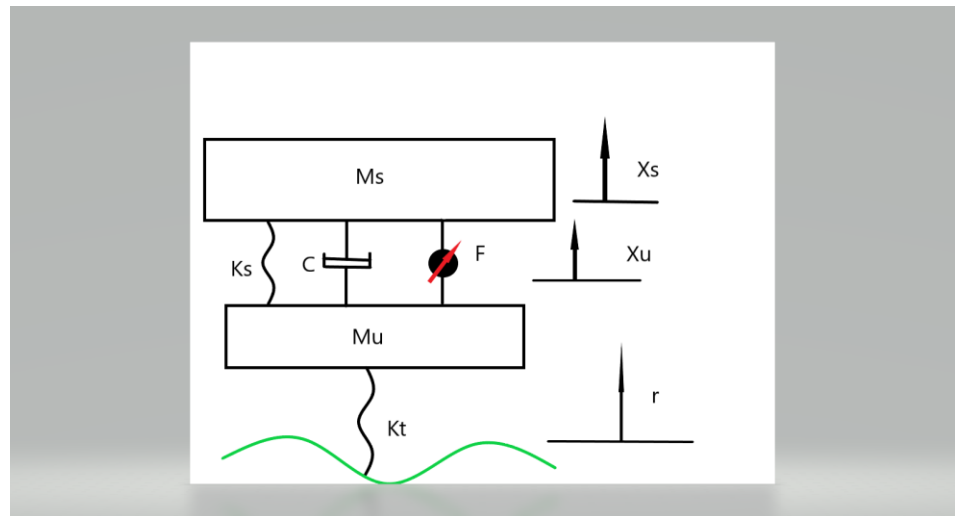
$$X_4 = \dot{X}_u$$

$$X_5 = Pl$$

$$X_6 = X_v$$

ماتریس های فضای حالت قبل از خطی سازی

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} = C \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ Ct \\ \frac{Cs}{Mu} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = B \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\frac{Ks}{Ms} & -\frac{Cs}{Ms} & 0 & \frac{Cs}{Ms} & \frac{Ap}{Ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{Ks}{Ms} & -\frac{Cs}{Mu} & -\frac{Kt}{Mu} & -\frac{Cs+Ct}{Mu} & \frac{Ap}{Mu} & 0 \\ 0 & -\sigma Ap & 0 & \sigma Ap & \beta & \gamma \sqrt{Ps - X_5 Sgn(X_6)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}$$



بسط تیلور خطی سازی سیستم

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0)$$

$$\sqrt{ps - X_5 \text{Sgn} X_6}$$

$$5X_6\sqrt{ps - X_5(0)\text{Sgn}X_6(0)} + 5 \times 6 \times \frac{1}{2} \times (ps - X'_5 \text{Sgn}X_6)^{-\frac{1}{2}}(x - x_0) \\ + 5\sqrt{ps - X_5 \text{Sgn}X_6} + 5 \times 6 \times \frac{1}{2} \times (ps - X_5 \gamma \times 6)^{-\frac{1}{2}}(y - y_0)$$

معادلات خطی دینامیکی سیستم و فضای حالت

$$M_s \ddot{X}_s + k_s(X_s - X_u) + C_s(\dot{X}_s - \dot{X}_u) = f$$

$$M_u \ddot{X}_u = C_s(\dot{X}_s - \dot{X}_u) + K_s(X_s - X_u) + K_t(r - X_u) - f$$

$M_s$  = جرم بدنه خودرو

$M_u$  = جرم سیستم تعلیق

$C_s$  = ضریب سختی فنر

$K_s$  = ضریب اصطکاک سیستم تعلیق

$K_t$  = ضریب اصطکاک تایر خودرو

متغیرهای حالت

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\frac{K_s}{M_s}x_1 + \frac{K_s}{M_s}x_3 - \frac{C_s}{M_s}x_4 - \frac{1}{M_s}f \\ \dot{x}_4 = \frac{C_s}{M_u}x_2 - \frac{C_s}{M_u}x_4 + \frac{K_s}{M_u}x_1 - \frac{K_s}{M_u}x_3 + \frac{K_t}{M_u}r - \frac{K_t}{M_u}x_3 - \frac{1}{M_u}f \end{cases} \quad \begin{cases} x_1 = X_s \\ x_2 = \dot{X}_s = \dot{x}_1 \\ x_3 = X_u \\ x_4 = \dot{X}_u = \dot{x}_3 \end{cases}$$

معادلات فضای حالت پس خطی سازی

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{C_s}{M_s} & \frac{K_s}{M_s} & \frac{C_s}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{M_u} & \frac{C_s}{M_u} & -\frac{K_t - K_s}{M_u} & -\frac{C_s}{M_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{M_u} \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_t}{M_u} \end{bmatrix} r$$

$$y = X_s - X_u \Rightarrow y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ \frac{1}{M_s} \\ 0 \\ -1 \\ \frac{1}{M_u} \end{pmatrix} = B_1$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_t \\ \frac{1}{M_u} \end{pmatrix} = B_2$$

<u>Ms</u> جرم بدنه خودرو	290kg
Mu جرم سیستم تعلیق	40kg
Cs ضریب سختی فنر سیستم تعلیق	12900 <u>v.s/m</u>
Ks ضریب اصطکاک سیستم تعلیق	19960 N/m
<u>Kt</u> ضریب اصطکاک تایر خودرو	175500 N/m

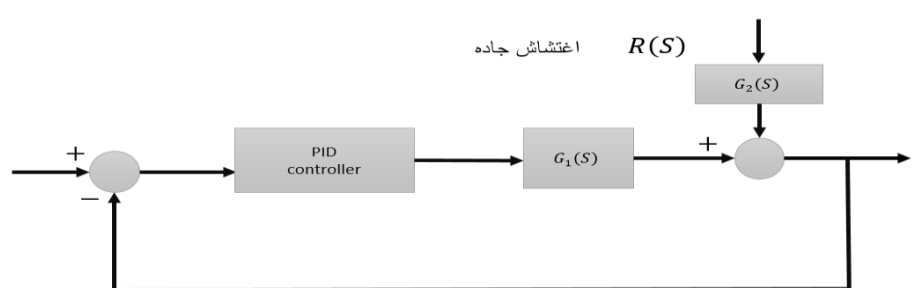
تابع تبدیل

$$G_2 = C(SI - A)^{-1}B_2$$

$$G_1(S) = \frac{5(S^2 - 702)}{2(116S^4 + 4257S^3 + 574818S^2 + 2263950S + 35029800)}$$

$$G_2(S) = \frac{-508950S^2}{116S^4 + 4257S^3 + 574818S^2 + 2253950S + 35029800}$$

سیستم حلقه بسته به همراه کنترلر



## کد متلب تابع تبدیل

```
% Linear control Project
%%Transform Function
clear all;
clc
close all;
syms s;
Ms= 290;
Mu= 40;
Cs= 1290;
Ks= 19960;
Kt= 175500;
A= [0 1 0 0;-Ks/Ms -Cs/Ms Ks/Ms Cs/Ms;0 0 0 1;Ks/Mu Cs/Mu (-Kt-Ks)/Mu -Cs/Mu]
C= [1 0 -1 0]
B1= [0 ; -1/Ms ; 0 ; -1/Mu]
B2= [0 ; 0 ; 0 ; Kt/Mu]
G1= C*inv(s*eye(4)-A)*B1
G2= C*inv(s*eye(4)-A)*B2

pretty(simplifyFraction(G1))
pretty(simplifyFraction(G2))
pretty(simplifyFraction(G1-G2))
```

## جدول معیارهای سرعت و دقت سیستم

<u>RiseTime</u>	<b>0.1364</b>
<u>settlingTime</u>	2.1172
<u>Settlingmin</u>	<b>-7.6460e-05</b>
<u>settlingMax</u>	-3.7543e-05
<b>overshoot</b>	<b>52.6143</b>
Undershoot	7.5633
<b>peak</b>	<b>7.6460e-05</b>
<u>peakTime</u>	0.4035

## توضیحات تابع تبدیل

درجه مخرج تابع تبدیل ۲ درجه از درجه صورت بیشتر است در نتیجه ۲ صفر در بی نهایت خواهیم داشت. یک صفر در سمت راست محور موهومی داریم که باعث وجود پایین زدگی در نمودار پاسخ پله خواهد شد.

```
%% pade
close all;
clear all;
clc
syms s;
Ms= 290;
Mu= 40;
Cs= 1290;
Ks= 19960;
Kt= 175500;
A= [0 1 0 0;-Ks/Ms -Cs/Ms Ks/Ms Cs/Ms;0 0 0 1;Ks/Mu Cs/Mu (-
Kt-Ks)/Mu -Cs/Mu];
C= [1 0 -1 0];
B1= [0 ; -1/Ms ; 0 ; -1/Mu];
B2= [0 ; 0 ; 0 ; Kt/Mu];
G1= C*inv(s*eye(4)-A)*B1;
sys=pade(G1)
pretty(simplifyFraction(sys))
```

sys =

$$\frac{(5*(-15839642588*s^3 + 581287573251*s^2 + 9727454918376*s - 397710332467578))}{(6*(-1833995234429287*s^3 + 97849926155059434*s^2 + 265738607260325550*s + 6615248530044047400))}$$

$$\frac{(-15839642588 s^3 + 581287573251 s^2 + 9727454918376 s - 397710332467578) 5}{-----}$$

$$(-1833995234429287 s^3 + 97849926155059434 s^2 + 265738607260325550 s + 6615248530044047400) 6$$

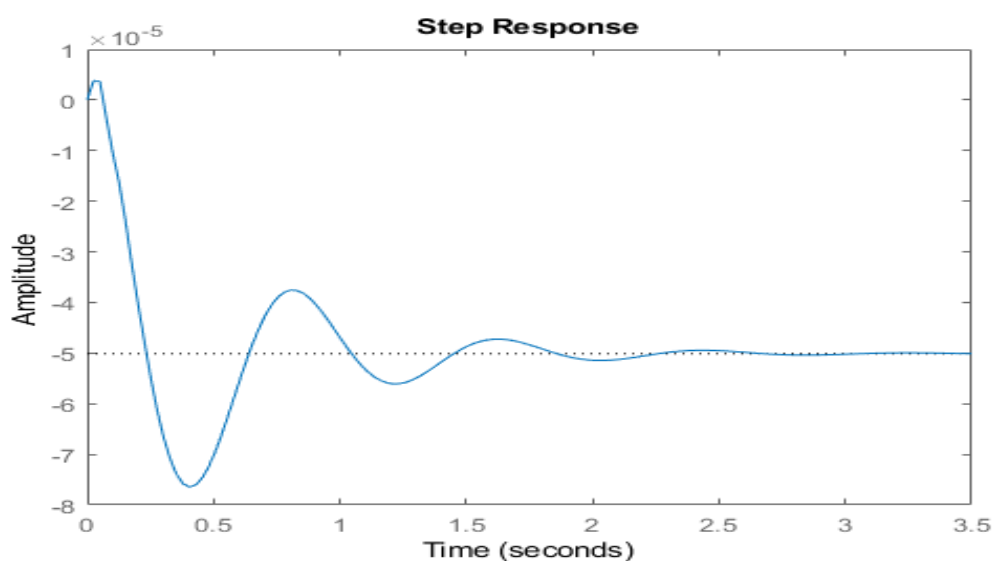
## پاسخ پله سیستم

```
clear all;
clc
close all;
% s= tf ('s');
num =[25 0 -17550];
den =[1160 42570 5748180 22639500 350298000];
f=tf(num,den);
step(f)
stepinfo(f)
```

ans =

struct with fields:

```
    RiseTime: 0.1364
    SettlingTime: 2.1172
    SettlingMin: -7.6460e-05
    SettlingMax: -3.7543e-05
    Overshoot: 52.6143
    Undershoot: 7.5633
         Peak: 7.6460e-05
    PeakTime: 0.4035
```



در نمودار پاسخ پله سیستم یک پایین زدگی (undershoot) مشاهده می شود که نشان دهنده وجود صفر نامینیم فاز در تابع تبدیل سیستم است. در کد متلب پاسخ پله سیستم از دستور `stepinfo()` استفاده شده که این دستور مقادیر بالازدگی، پایین زدگی، زمان نشست، نقطه اوج، زمان اوج را می دهد.

## معیار پایداری راث هرویتز

$s^4$	1160	$5748180+25k$	$3529800-17550k$
$s^3$	42570	22639500	0
$s^2$	A1	$35029800-17550k$	
$s^1$	B	0	
$s^0$	$35029800-17550k$		

$$A_1 = \frac{42570(5748180+25k)-1160(22639500)}{42570} = 218438202600 + 1064250k$$

$$B = \frac{22639500 \times \frac{218438202600 + 1064250k}{42570} - 42570(35029800 - 17550k)}{\frac{218438202600 + 1664250k}{42570}}$$

مقدار  $k$  بدست آمده از روابط بالا برای تعیین محدوده پایداری

$$-8733453 < k < 1996$$



نمودار (روت لوکاس) مکان ریشه ها

مکان ریشه های مثبت

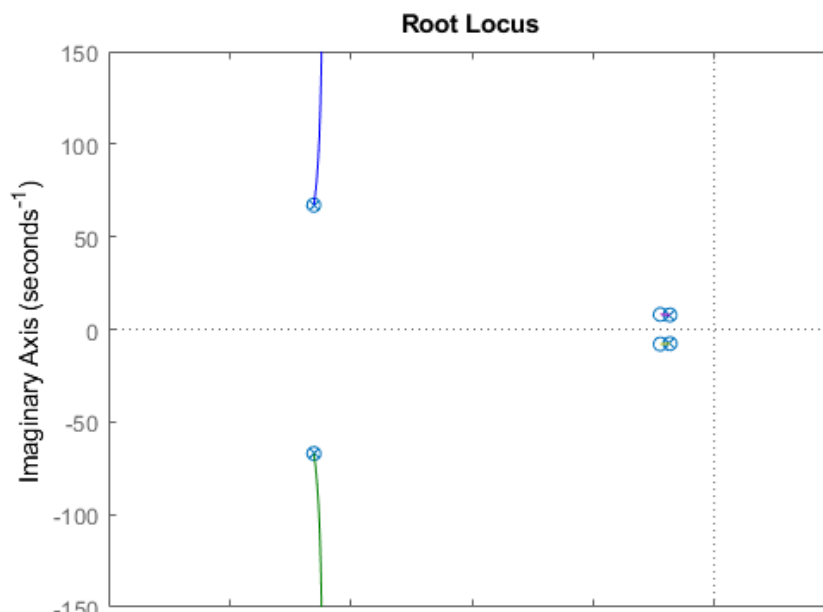
```
clc;
s=tf('s');
num=(29*s^2 + 129*s + 1996);
den=(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800)) - (4*s^2 + 129*s + 19546)/(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800));
gh=(num/den);
rlocus(gh)
p=pole(gh)
z=zero(gh)
```

p =

```
-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i
```

z =

```
-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-2.2241 + 7.9925i
-2.2241 - 7.9925i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i
```



## مکان ریشه های منفی

```

clc;
s=tf('s');
num=(29*s^2 + 129*s + 1996);
den=(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800)) - (4*s^2 + 129*s + 19546)/(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800));
gh=-(num/den);
rlocus(gh)
p=pole(gh)
z=zero(gh)

```

p =

```

-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i

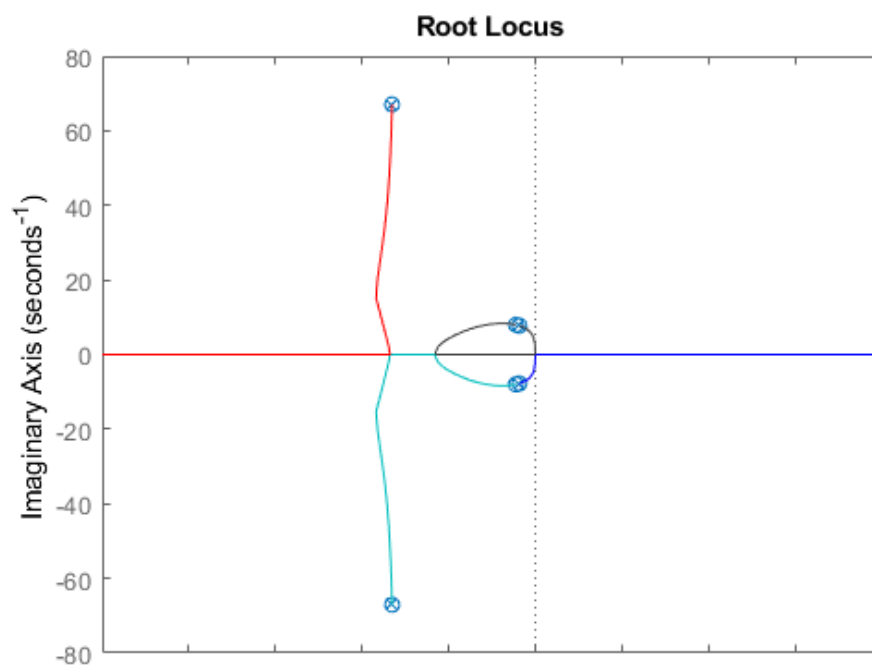
```

z =

```

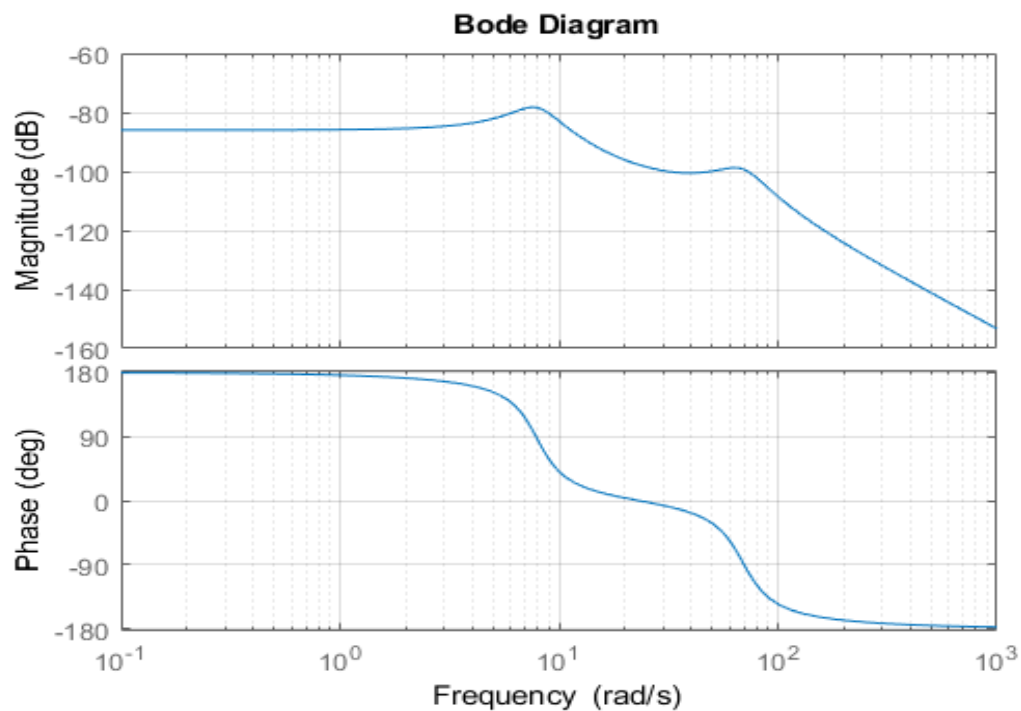
-16.5231 +67.0696i
-16.5231 -67.0696i
-2.2241 + 7.9925i
-2.2241 - 7.9925i
-1.8260 + 7.7431i
-1.8260 - 7.7431i

```



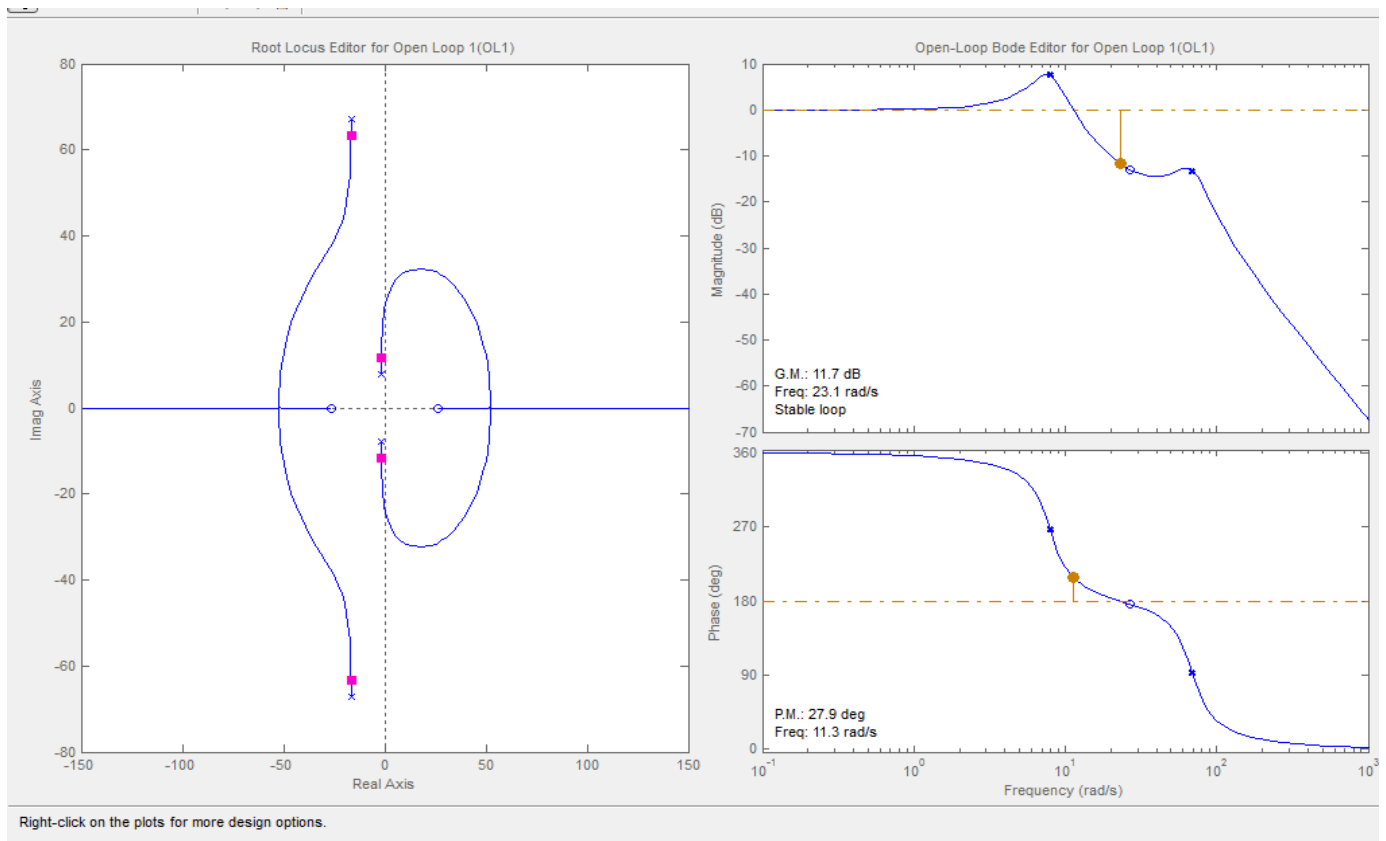
## نمودار بود

```
clear all;
clc
close all;
num = [25 0 -17550];
den = [1160 42570 5748180 22639500 350298000];
f=tf(num,den);
bode (f), grid
```



در فرکانس های پایین از ۱۸۰ شروع می کنیم که نشان دهنده ی وجود صفر ناپایدار در سیستم است و با گذشت زمان و افزایش فرکانس به منفی ۱۸۰ نزدیک می شود.

این نمودار اصلی بود سیستم است اما ما برای بهبود بهره فاز و حاشیه فاز تابع تبدیل سیستم را در یک کنترل کننده بهره ثابت با بهره منفی ۲۰۰۰ ضرب کردیم و به نمودار زیر می رسیم.



در اینجا مشاهده می‌شود که حاشیه فاز و دامنه که تا قبل منفی بودند و سیستم ناپایدار بود، اکنون این مقادیر مثبت شده اند و سیستم پایدار شده است.

```
clear all;
clc
close all;
% num =[25 0 -17550];
% sys = tf(25 -17550,[1160 42570 5748180 22639500 350298000]);
% margin (sys)
% den =[1160 42570 5748180 22639500 350298000];
num =[25 0 -17550];
den =[1160 42570 5748180 22639500 350298000];
G=tf(num,den);
m = allmargin(G)
GainMargins_dB = mag2db(m.GainMargin)
```

m =

struct with fields:

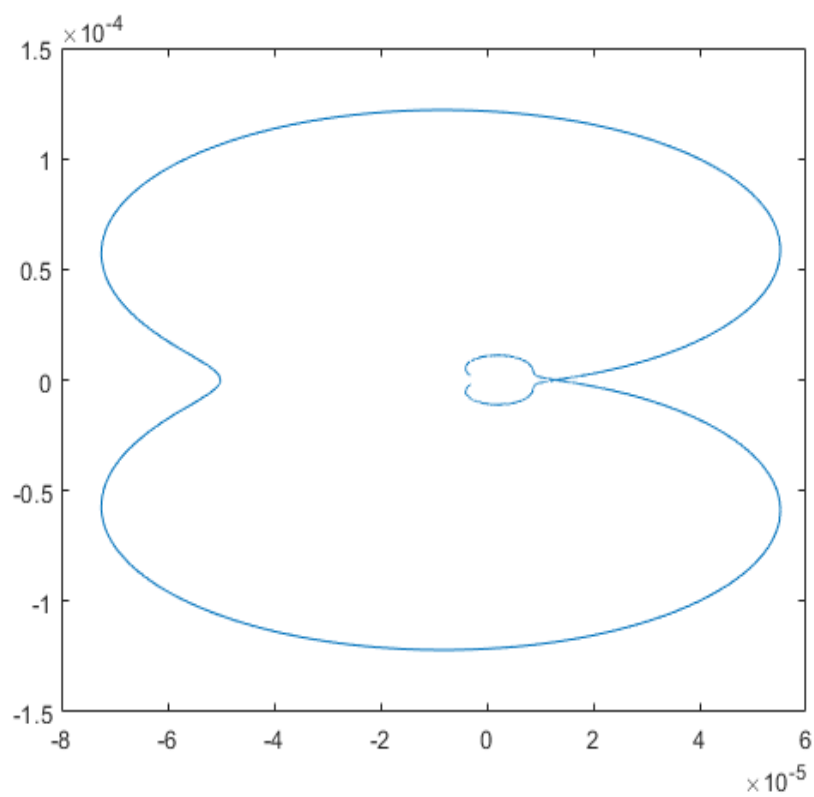
```
GainMargin: [1.9960e+04 Inf]
GMFrequency: [0 Inf]
PhaseMargin: [1×0 double]
PMFrequency: [1×0 double]
DelayMargin: [1×0 double]
DMFrequency: [1×0 double]
Stable: 1
```

GainMargins\_dB =

```
86.0032      Inf
```

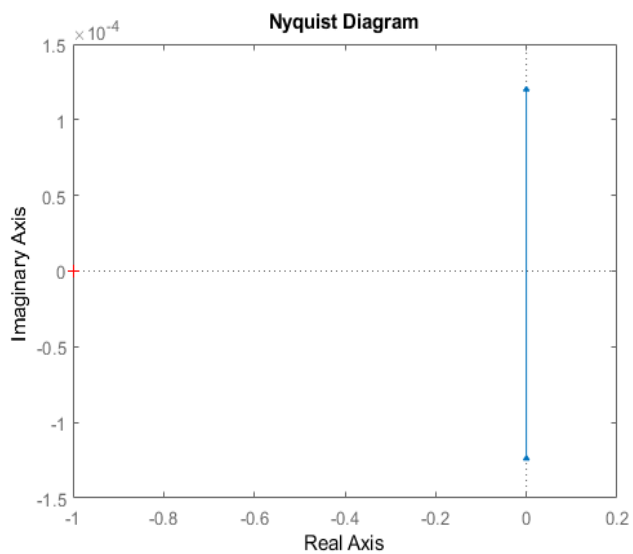
```
clear all;
clc
close all;
% num =[25 0 -17550];
% sys = tf(25 -17550,[1160 42570 5748180 22639500
350298000]);
% margin (sys)
% den =[1160 42570 5748180 22639500 350298000];
num =[25 0 -17550];
den =[1160 42570 5748180 22639500 350298000];
G=tf(num,den);
m = allmargin(G)
GainMargins_dB = mag2db(m.GainMargin)
```

## نمودار نایکوویست



oldny

```
clear all;  
clc  
close all;  
num=[25 0 -17550];  
den=[1160 42570 5748180 22639500 350298000];  
f=tf(num,den);  
nyquist(f)
```



```

clear all;
clc
close all;
syms s w
G=(29*s^2 + 129*s + 1996)/(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800)) - (4*s^2
+ 129*s + 19546)/(10*(116*s^4 + 4257*s^3 + 574818*s^2 + 2263950*s + 35029800));
G_w=subs(G,s,j*w)
W =[-100:.01:100];
nyq = eval(subs(G_w,w,W));
x= real(nyq);
y= imag (nyq);

plot (x,y);
temp = sign(y);
temp1 = sign (x);
differences1=diff(temp1);
differences = diff(temp);
% indexes = find (differences ~= 0 )
indexes = find (differences1 ~= 0 )
% W(12307)
% 1/abs(x(12307))
W(16996)
1/abs (y(16996))

```

G\_w =

$$\frac{(-29w^2 + w \cdot 129i + 1996)}{(1160w^4 - w^3 \cdot 42570i - 5748180w^2 + w \cdot 22639500i + 350298000)} - \frac{(-4w^2 + w \cdot 129i + 19546)}{(1160w^4 - w^3 \cdot 42570i - 5748180w^2 + w \cdot 22639500i + 350298000)}$$

indexes =

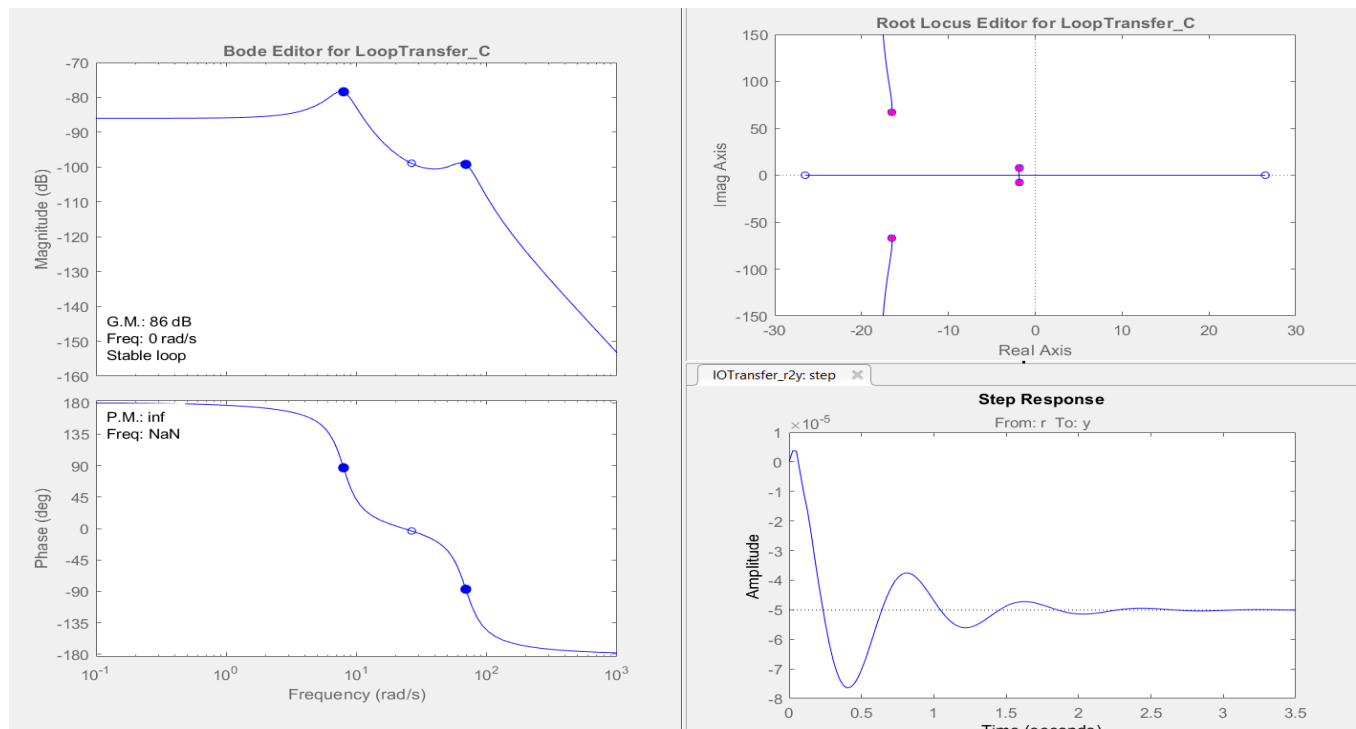
3005	9215	10786	16996
------	------	-------	-------

ans =

69.9500

ans =

9.2844e+04





مراحل طراحی کنترل کننده PD

$w_n=7.95, \text{zeta}=0.63$

$$-3W_n = -5.0085$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta w_n} \leq 0.2 \rightarrow -\zeta w_n \leq -5$$

$$\text{دامنه} \rightarrow x \frac{6.16}{\tan \theta_z} = 12.06$$

$$z_0 = 17.06$$

قطب مطلوب  $= -5 \mp 6.16$

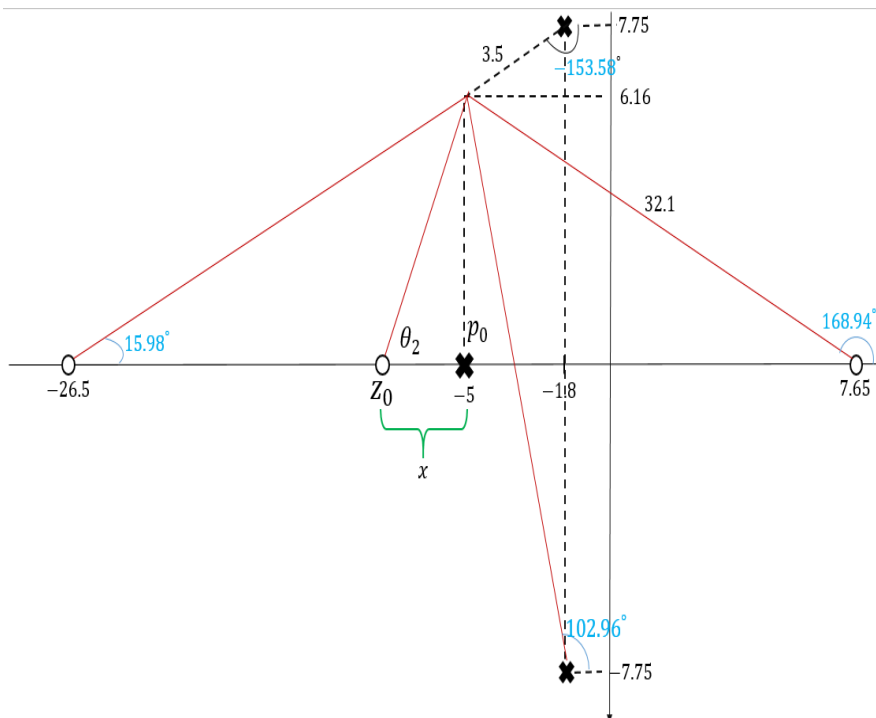
$$K_D = \frac{14.27 \times 3.5 \times 6.16}{15.7 \times 32.1 \times 13.54} = 0.045$$

$$\text{شرط زاویه} \rightarrow \theta_z + 168.94 - (15.98) = 180$$

$$k_p = z_0 \times k_D = 0.77$$

$$\theta_z = 27.04$$

$$c(s) = 0.77 + 0.045s$$



مراحل طراحی کنترل کننده PI متناظر با مجموعه تابع تبدیل و کنترل کننده PD

$-5 \pm 6.16$  محل قطب مطلوب

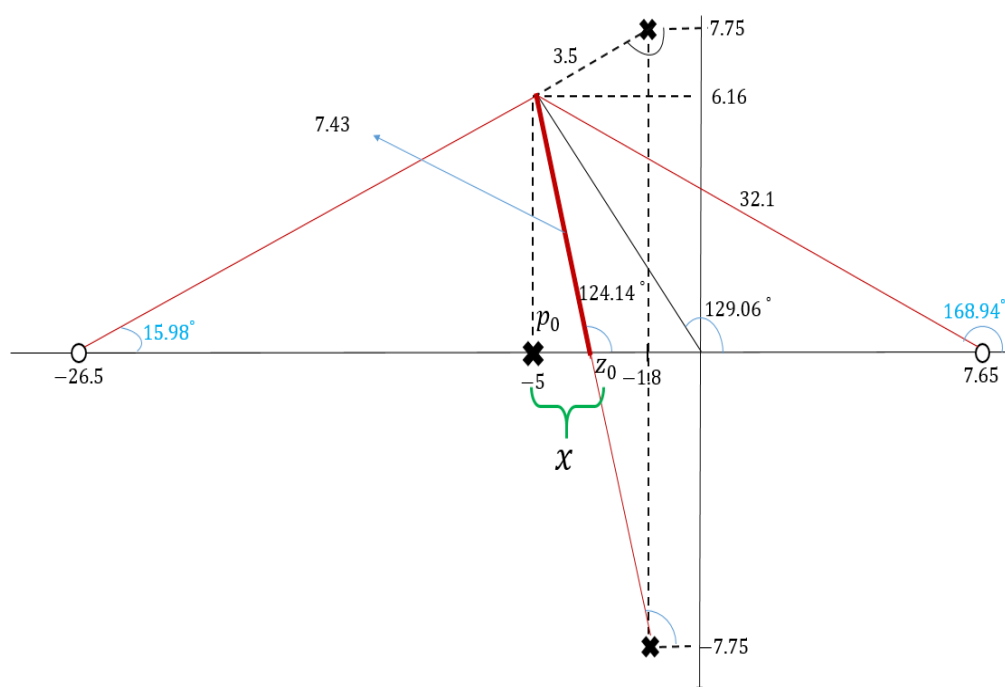
$$\theta_z + 15.98 + 168.94 - 129.06 = 180$$

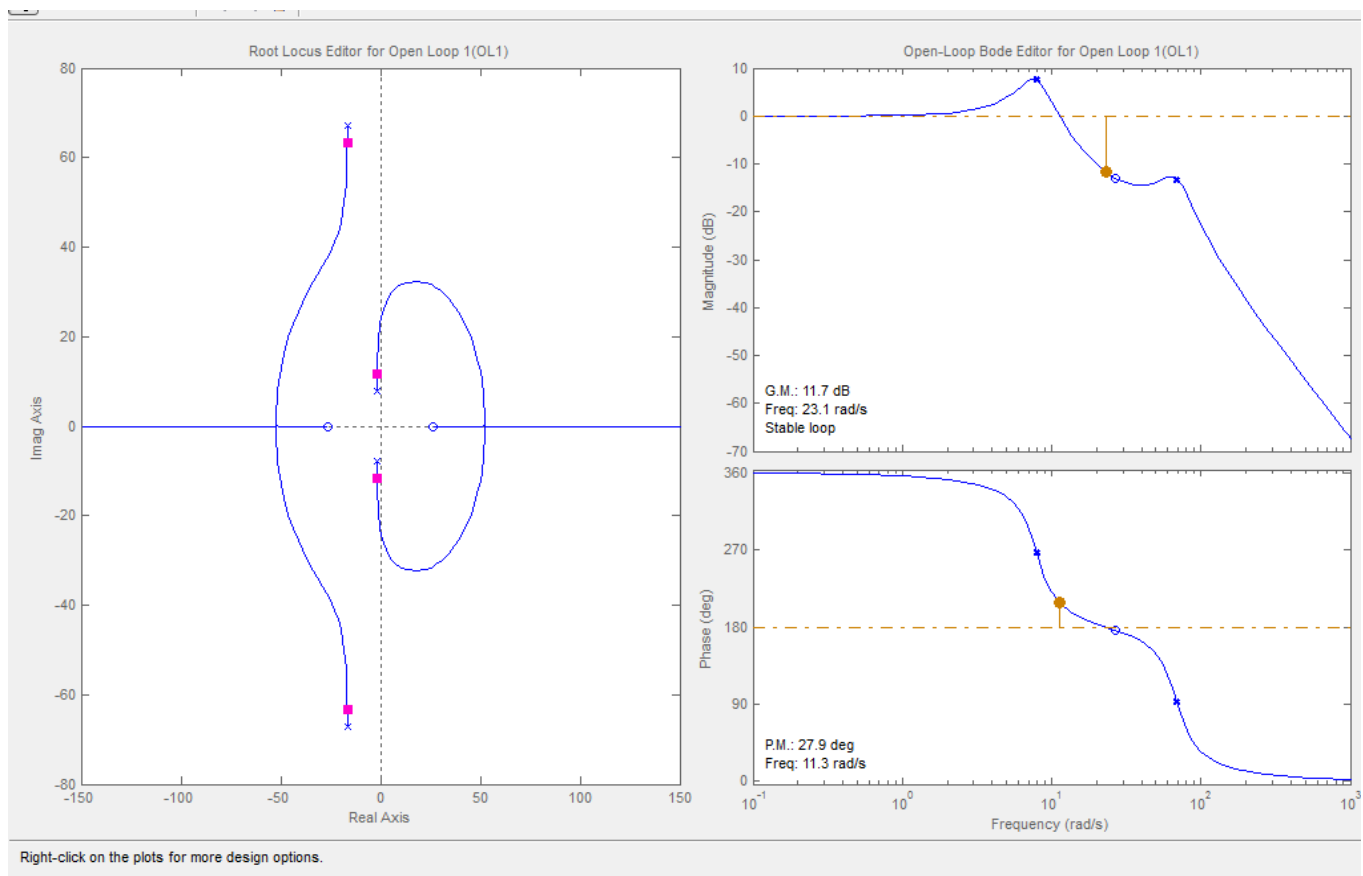
$$\theta_z = 124.14 \rightarrow x = 4.17 \rightarrow z_0 = 0.82 = \frac{k_I}{k_p}$$

$$k_p = \frac{7.93 \times 3.5 \times 14.27}{32.1 \times 15.7 \times 7.43} = 0.1$$

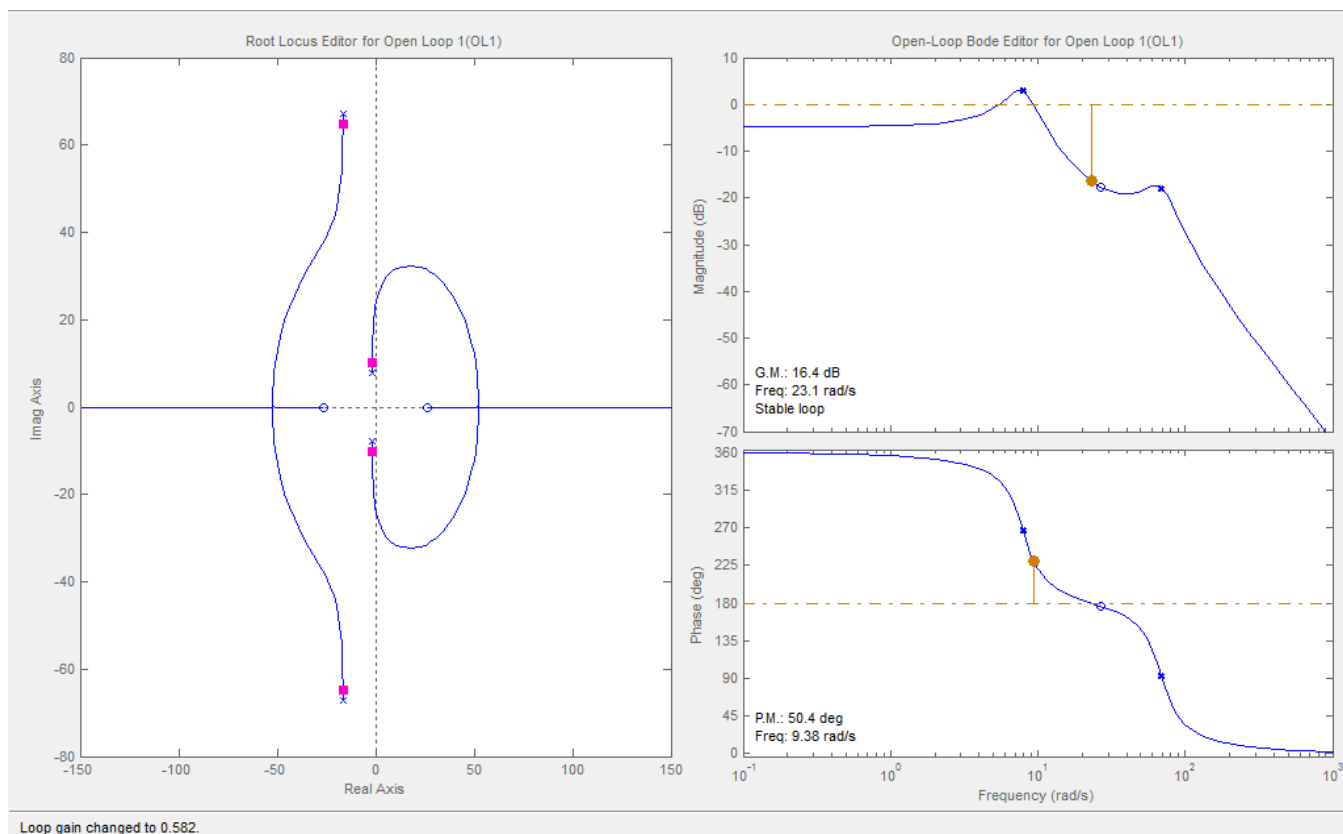
$$k_I = 0.82 \times 0.1 = 0.082$$

$$C(s) = 0.1 \left( 1 + \frac{0.082}{s} \right)$$





با استفاده از دستور sisotool متلب قطب های حلقه بسته (دایره های صورتی در شکل های بالا) را روی نمودار نایکویست جابه جا کردیم تا حد پایداری حفظ شود و بهره فاز و حاشیه فاز به مقدار مطلوب برسند. پس از بازطراحی توسط sisotool به کنترل کننده PID خواهیم رسید.



$$w_n = 7.9555, 69.0750$$

$$zeta = 0.2295$$

طبق نمودار نایکویست، اگر بخواهیم پایداری حفظ شود و همچنان برای سیستم بتوانیم کنترل کننده ای برای بهبود شرایط پاسخ گذرا طراحی کنیم، الزاما قسمت حقیقی قطب مطلوب ما باید در حدود ۱,۸- باشد و این بدان معناست که سرعت سیستم ما از یک حد مشخصی بیشتر نخواهد شد. با توجه به اینکه برای رسیدن به مشخصات مطلوب پروژه می بایست مصالحه ای میان مقدار  $w_n$  و  $zeta$  برقرار میکردیم، به روابط زیر برای طراحی کنترل کننده PID رسیدیم:

مراحل بازطراحی کنترل کننده PD

$$\zeta \omega_n = -5.0085$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \leq 0.2 \rightarrow -\zeta \omega_n \leq -5$$

$$\text{شرط دامنه} \rightarrow x \frac{6.16}{\tan \theta_z} = 12.06$$

$$z_0 = 17.06$$

$$\text{نقطه مطلوب} = -5 \mp 6.16$$

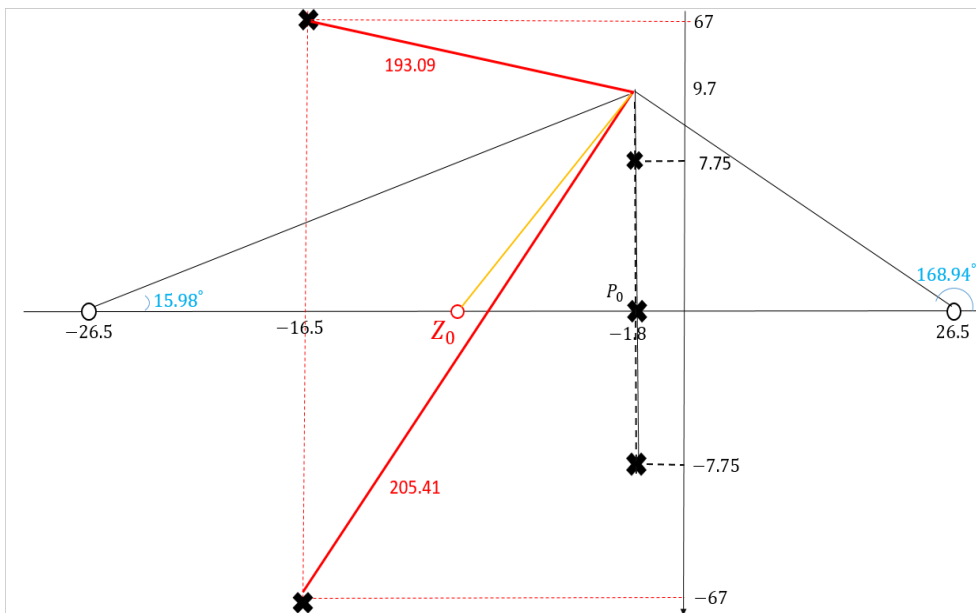
$$K_D = \frac{193.09 \times 14.27 \times 3.5 \times 6.16 \times 205.41}{15.7 \times 32.1 \times 13.54} = 1788.2$$

$$\text{شرط زاویه} \rightarrow \theta_z + 168.94 - (15.98) = 180$$

$$k_p = z_0 \times k_D = 30506.7$$

$$\theta_z = 27.04$$

$$c(s) = 30506.7 + 1788.2s$$



مراحل بازطراحی کنترل کننده PI متناظر با سیستم شامل تابع تبدیل و کنترل کننده PD برای رسیدن به کنترل کننده PID

محل قطب مطلوب  $-5 \pm 6.16j$

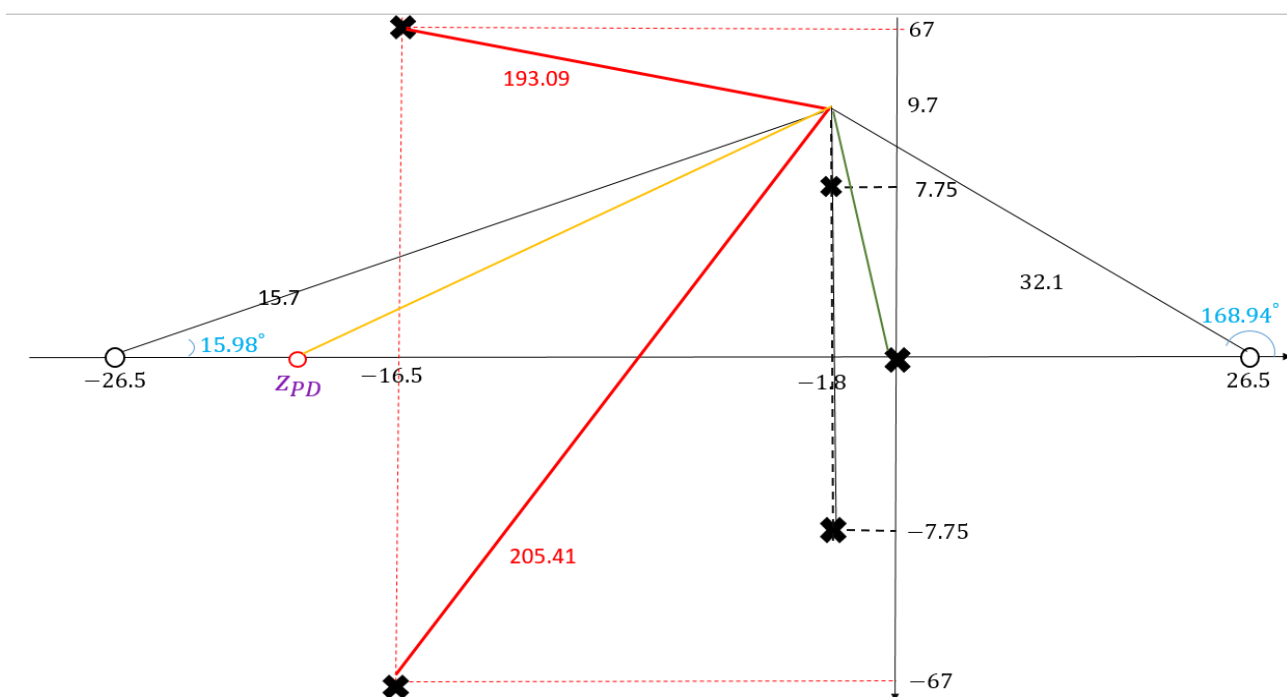
$$\theta_z + 27.05 + 15.98 + 168.94 - 129.06 = 180$$

$$\theta_z = 97.09 \rightarrow x = 0.76 \rightarrow z_0 = 4.23 = \frac{k_I}{k_p}$$

$$k_p = \frac{7.93 \times 3.5 \times 14.27 \times 193.09 \times 205.41}{32.1 \times 15.7 \times 7.43 \times 13.54} = 294.6$$

$$k_I = 294.6 \times 4.23 = 1246$$

$$C(s) = 294.6 \left( 1 + \frac{1246}{s} \right)$$



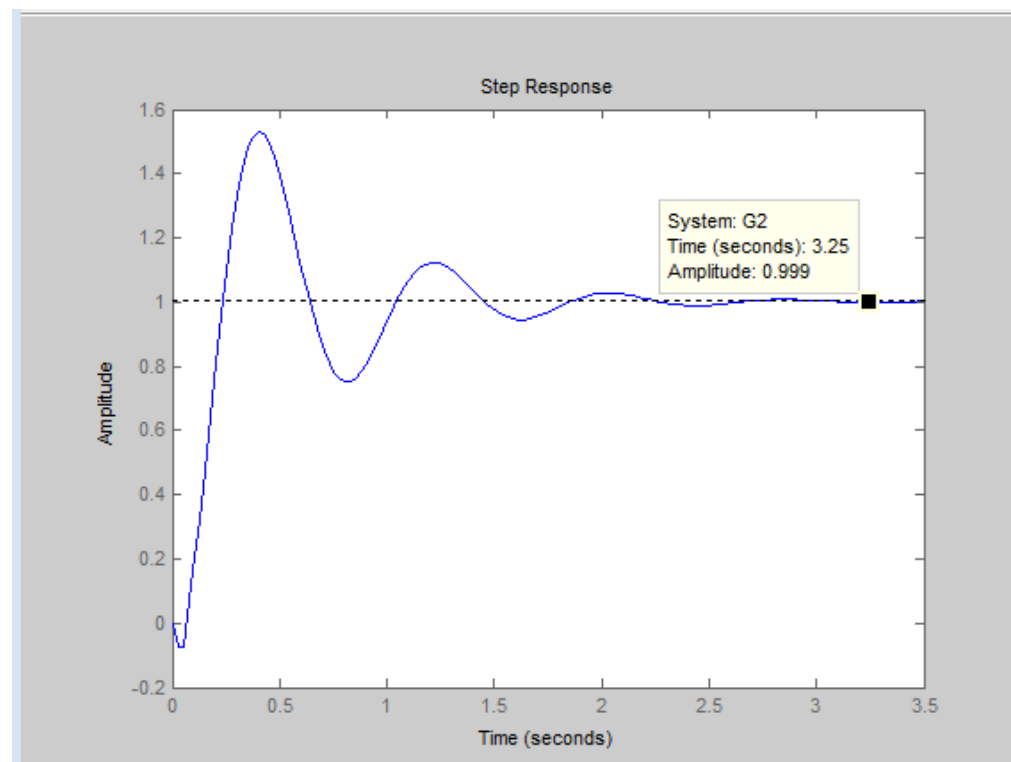
$$G(s) = \frac{2.5(s^2 - 702)}{116s^4 + 4257s^3 + 574818s^2 + 2263950s + 35029800}$$

$$G1 = \frac{2.5(s^2 - 702)(30506.7 + 1788.2s)}{116s^4 + 4257s^3 + 574818s^2 + 2263950s + 35029800}$$

کنترل کننده PID نهایی

$$PID: C(s) = 294.6 + \frac{1246}{s} + 1788.2s$$

خطای حالت دائم

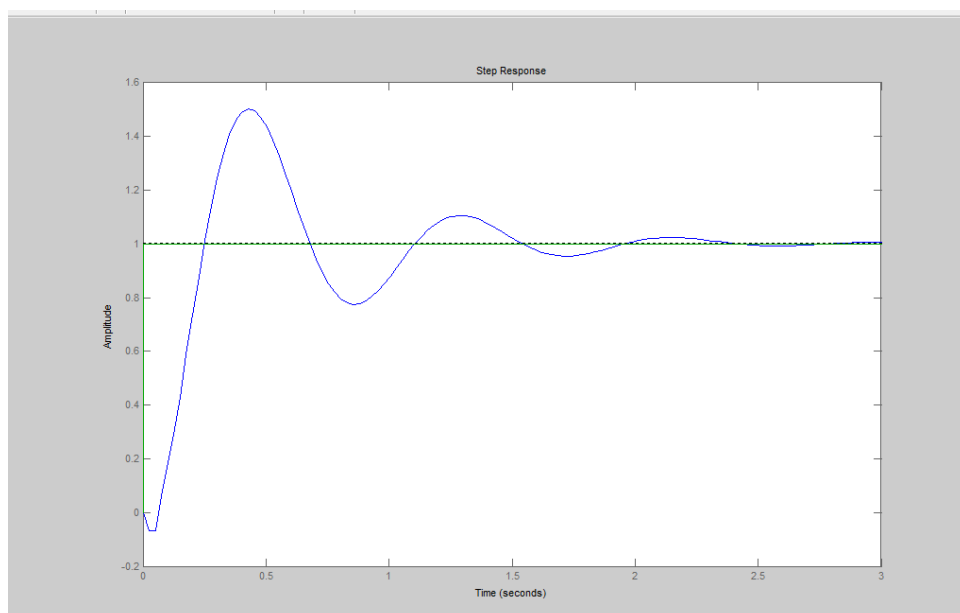


شکل 5- پاسخ پله تابع تبدیل حلقه بسته

جدول اطلاعات پاسخ پله سیستم قبل از طراحی و قرار گرفتن کنترلر

<u>RiseTime</u>	0.1480
<u>SettlingTime</u>	2.1639
<u>SettlingMin</u>	0.7744
<u>SettlingMax</u>	1.5018
Overshoot	49.8522
Undershoot	6.8416
Peak	1.5018
<u>Peakttime</u>	0.4277

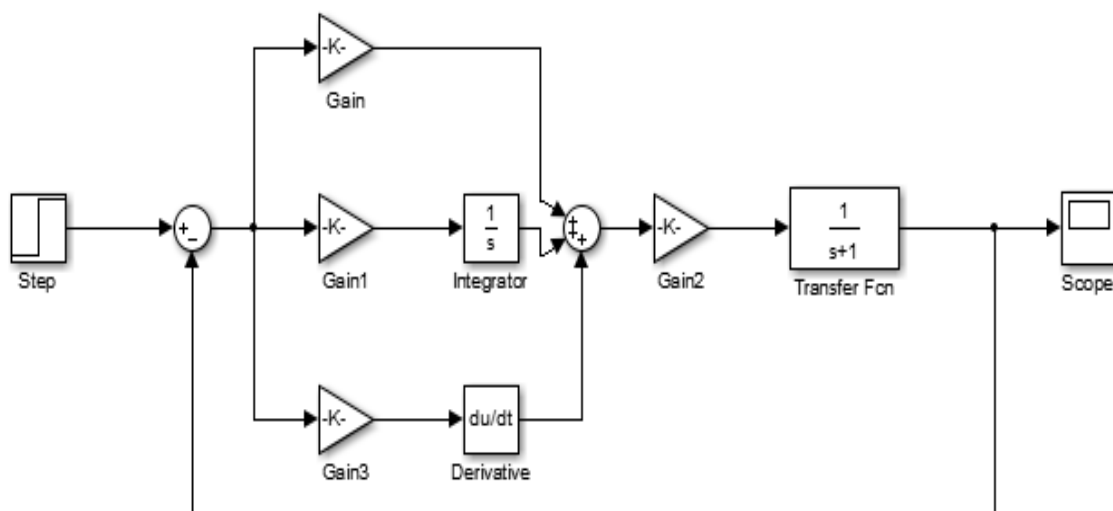
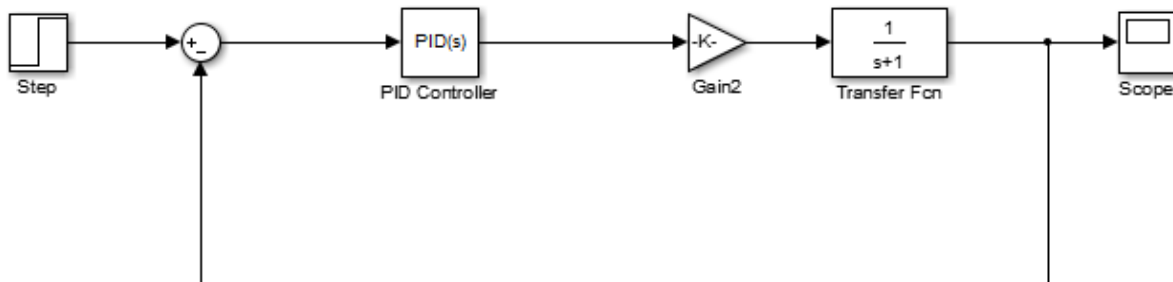
<u>RiseTime</u>	2.8546e-05
<u>SettlingTime</u>	5.1040e-05
<u>SettlingMin</u>	0.9041
<u>SettlingMax</u>	0.9995
Overshoot	0
Undershoot	0
Peak	0.9995
<u>Peakttime</u>	1.3676e-04





با توجه به جدول اطلاعات پاسخ پله حلقه بسته مشاهده می کنیم که به مقادیر مطلوب خواسته شده رسیده ایم.

### بلوک دیاگرام ها



## اغتشاش و بررسی تاثیر اغتشاش در خروجی به کمک سیمولینک

جاده ها همواره مقادیری را به علت ناهمواری های جاده ای به سیستم وارد می سازند. مقادیر به دست آمده نشان دهنده میزان بالایی از دامنه ارتعاشی هستند که این به نوبه خود علاوه بر گرفتن آسایش سرنشینان ممکن است از نظر حفظ سطح تماس تایر با جاده نیز راضی کننده نباشد و موجبات عدم توانایی راننده در هدایت خودرو را فراهم آورد. این مسأله لزوم استفاده از سیستم تعلیق فعال را روشن می سازد. از دهه های قبل اهمیت استفاده از کنترلر در سیستم های دینامیکی به دلیل پیچیدگی روز افزون این سیستم ها و انتظار عملکرد حداکثری از آنها گسترش یافته است. سیستم تعلیق خودرو نیز از این قاعده مستثنی نیست و با پیاده سازی یک سامانه کنترلی بر روی این سیستم انتظار عملکرد بهتر که همان حفظ راحتی سرنشینان و افزایش قدرت مانور راننده که به واسطه افزایش تماس سطح تایر با جاده به وجود می آید را از این سیستم داریم. در شکل سیستم حلقه بسته سیستم تعلیق فعال مدل سازی شده به صورت شماتیک آورده شده است. برای بهبود پاسخ سیستم به اغتشاشات از یک کنترلر PID استفاده شده است. با پیشرفت روز افزون دانش کنترل روش های متعدد و بسیار کار آمدی توسعه یافته اند اما همچنان در بیش از نود درصد از مصارف کاربردی و صنعتی از کنترلر های PID استفاده می شود. در این گونه از کنترلرها سیستم مدار بسته دارای یک حلقه پس خور است که خروجی سیستم را برای مقایسه با ورودی مرجع به یک نقطه جمع متصل می کند و کنترلر به وسیله مکانیزمی سعی در کمینه کردن خطای حاصله می نماید.

### شبیه سازی :

اغتشاش یا همان پروفیل جاده که به عنوان ورودی به سیستم اعمال می شود را می توان با معادلاتی مشابه  $d(t)$

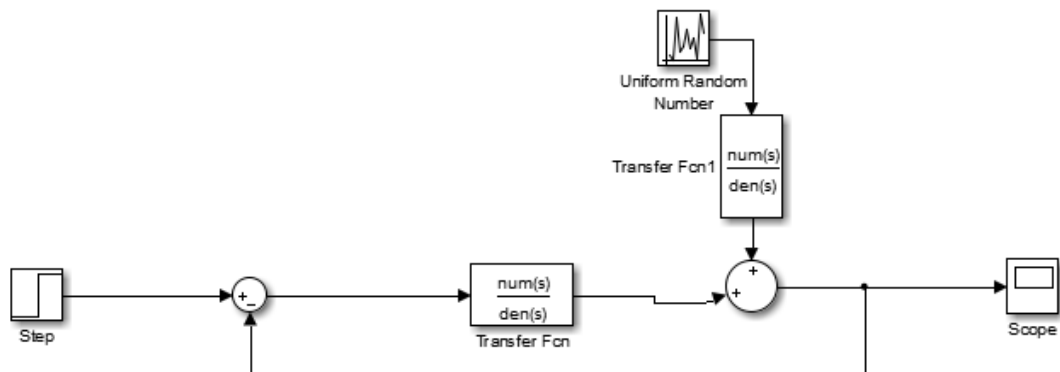
$$d(t) = \begin{cases} a(1 - \cos 8\pi t) & 0.5 \text{ s} \leq t \leq 0.75 \text{ s} \\ 0 & \text{other wise} \end{cases}$$

شبیه سازی نمود.

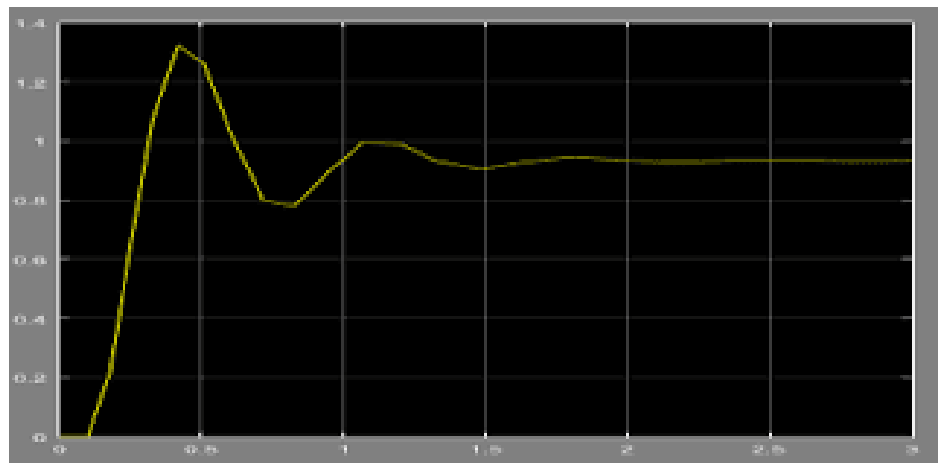
$a$  دامنه برآمدگی اغتشاش ورودی را مشخص می کند و مقدار آن تصادفی فرض شده است.

به منظور بررسی عملکرد سیستم در حضور اغتشاش از سیمولینک متلب استفاده شده است.

## تأثیر اغتشاش بر روی سیستم حلقه بسته بدون کنترلر PID

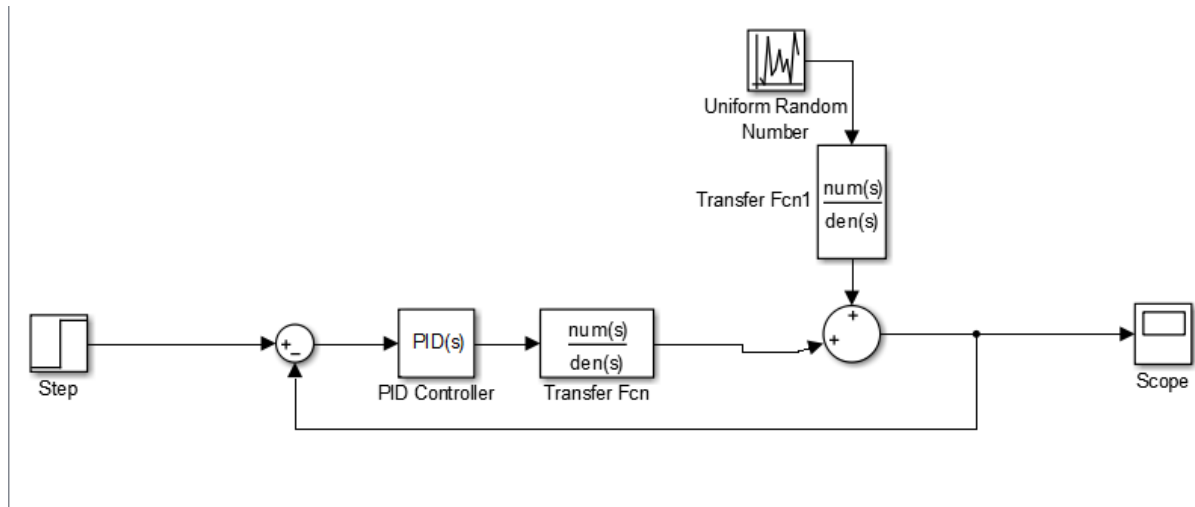


شکل ۶- بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته سیستم تعلیق فعال بدون کنترلر PID

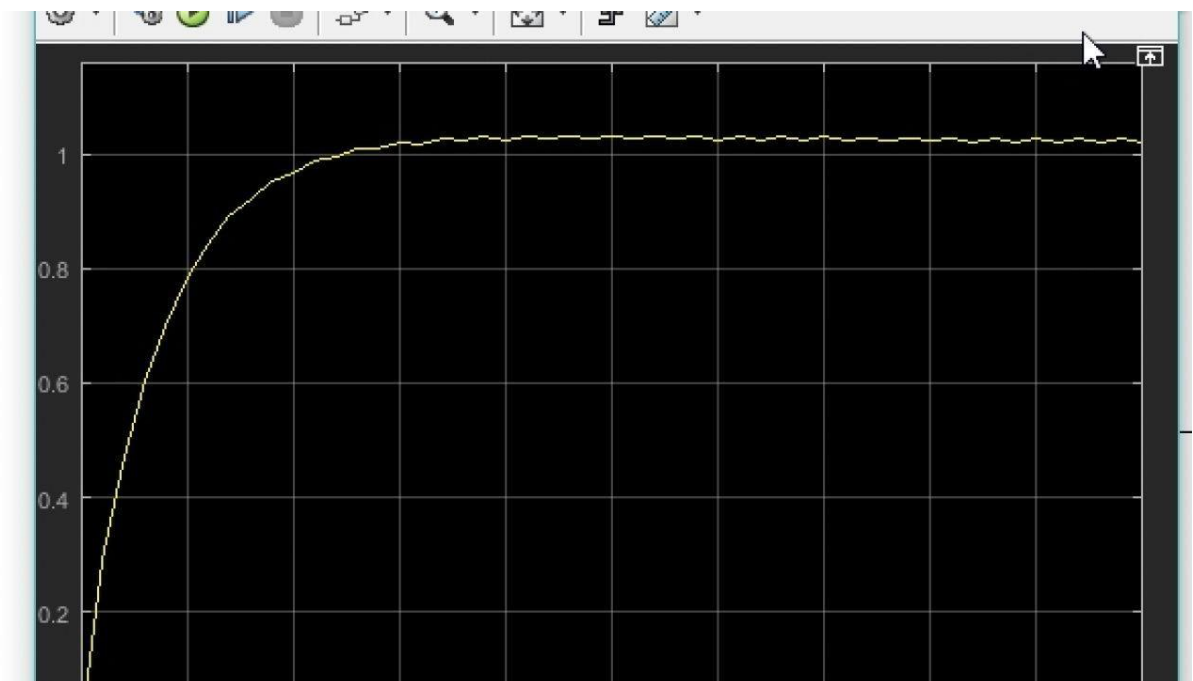


شکل ۷- خروجی حلقه بسته برای ورودی اغتشاشی

## تأثیر اغتشاش بر روی سیستم حلقه بسته به همراه کنترلر



شکل ۸- بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته سیستم تعلیق فعال به همراه کنترلر PID



شکل ۹- خروجی حلقه بسته برای ورودی اغتشاشی