

به نام خدا



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده برق و کامپیوتر



درس سیستم های کنترل دیجیتال

پروژه نهایی

نام و نام خانوادگی : سیاوش شمس

شماره دانشجویی : ۸۱۰۱۹۷۶۴۴

تیر ۱۴۰۱

فهرست سوالات

خواسته ها:	۳
(۱)	۳
(۲)	۴
(۳)	۵
(۴)	۸
(۵)	۱۱
(۶)	۱۲
(۷)	۱۴
(۸)	۱۵
(۹)	۱۷
(۱۰)	۱۹
(۱۱)	۲۱
پیوست:	۲۳

خواسته ها:

(۱)

$$\begin{cases} \dot{G} = -X(G + G_b) + D(t) \\ \dot{X} = -P_2X + P_3I \\ \dot{I} = -n(I + I_b) + U(t)/V \end{cases} \xrightarrow{D(t)=0} \begin{cases} -X_e(G_e + G_b) = 0 \\ -P_2X_e + P_3I_e = 0 \\ -n(I_e + I_b) + \frac{U(t)}{V} = 0 \end{cases}$$

با توجه به معادلات بالا دو دسته جواب برای نقاط تعادل خواهیم داشت:

$$1) X_e = 0 \Rightarrow I_e = 0, U(t) = nVI_b = 16.62$$

$$2) G = -4.5 \Rightarrow I, U(t), X$$

که در ادامه از دسته اول جواب ها استفاده می کنیم چون مقدار منفی برای G منطقی نیست. همچنین مقدار G می تواند دلخواه انتخاب شود که ما آن را صفر در نظر می گیریم. حال حول نقطه تعادل اول خطی سازی می کنیم.

$$A = \begin{bmatrix} -X_e & -(G_e + G_b) & 0 \\ 0 & -P_2 & P_3 \\ 0 & 0 & -n \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & -4.5 & 0 \\ 0 & -0.025 & 0.000013 \\ 0 & 0 & -5.54/60 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/V \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{12} \end{bmatrix}$$

حال برای بدست آوردن تابع تبدیل داریم:

$$H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

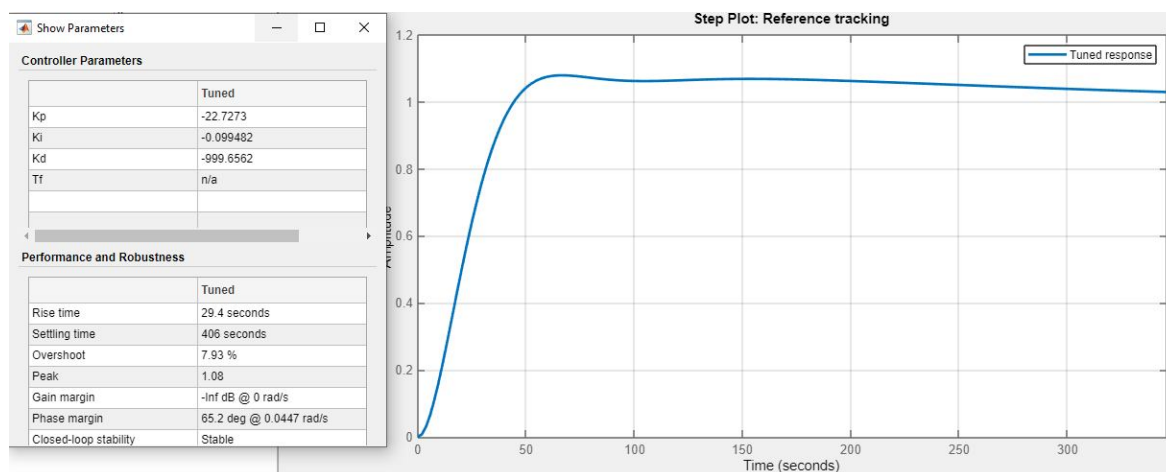
که می دانیم :

$$C = [1 \quad 0 \quad 0], D = 0$$

که در نتیجه داریم:

$$H(s) = \frac{-4.875 \times 10^{-6}}{s^3 + 0.1173s^2 + 0.002308s}$$

در این سوال با استفاده از دستور pidtuner یک کنترلر با موارد خواسته شده طراحی می کنیم:



شکل ۱- پاسخ پله سیستم کنترل شده

همانطور که مشاهده می شود زمان نشست آن ۴۰۶ و مقدار بالازدگی آن ۷.۹۳٪ می باشد. کنترلر به شکل زیر می باشد:

$$C(s) = -22.7 - \frac{0.0995}{s} - 999.65s$$

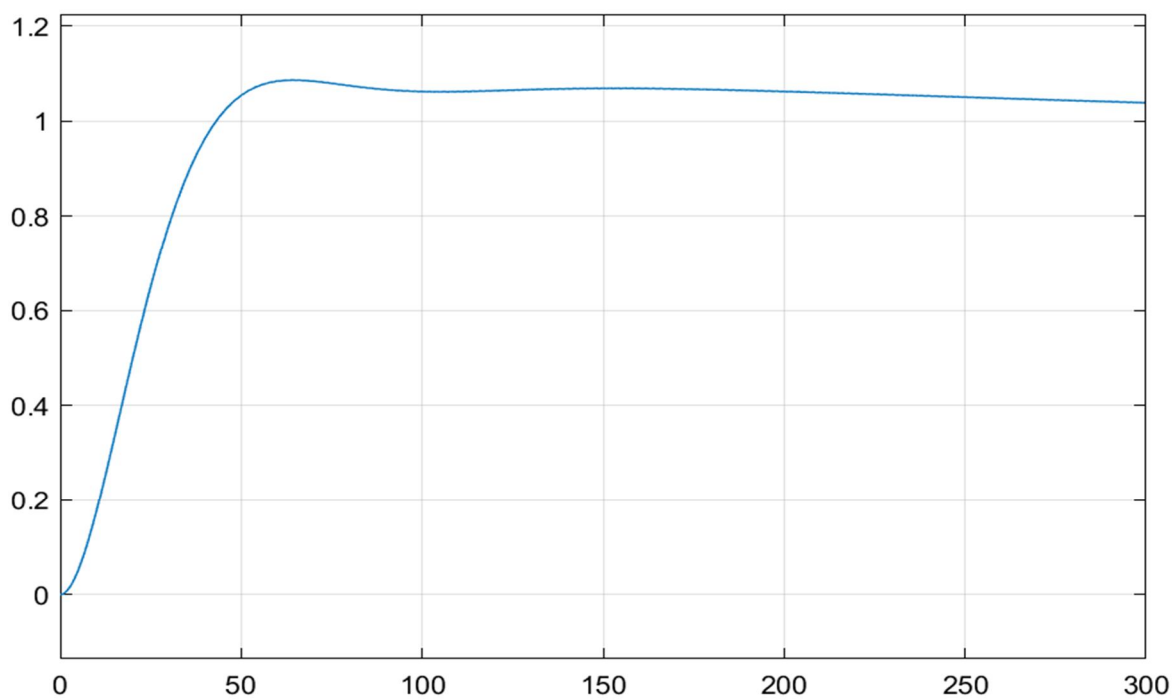
مشخصات گذرا و ماندگار سیستم به صورت زیر می باشد.

```
RiseTime: 29.3956
TransientTime: 405.7572
SettlingTime: 405.7572
SettlingMin: 0.9186
SettlingMax: 1.0793
Overshoot: 7.9320
Undershoot: 0
Peak: 1.0793
PeakTime: 66.0147
```

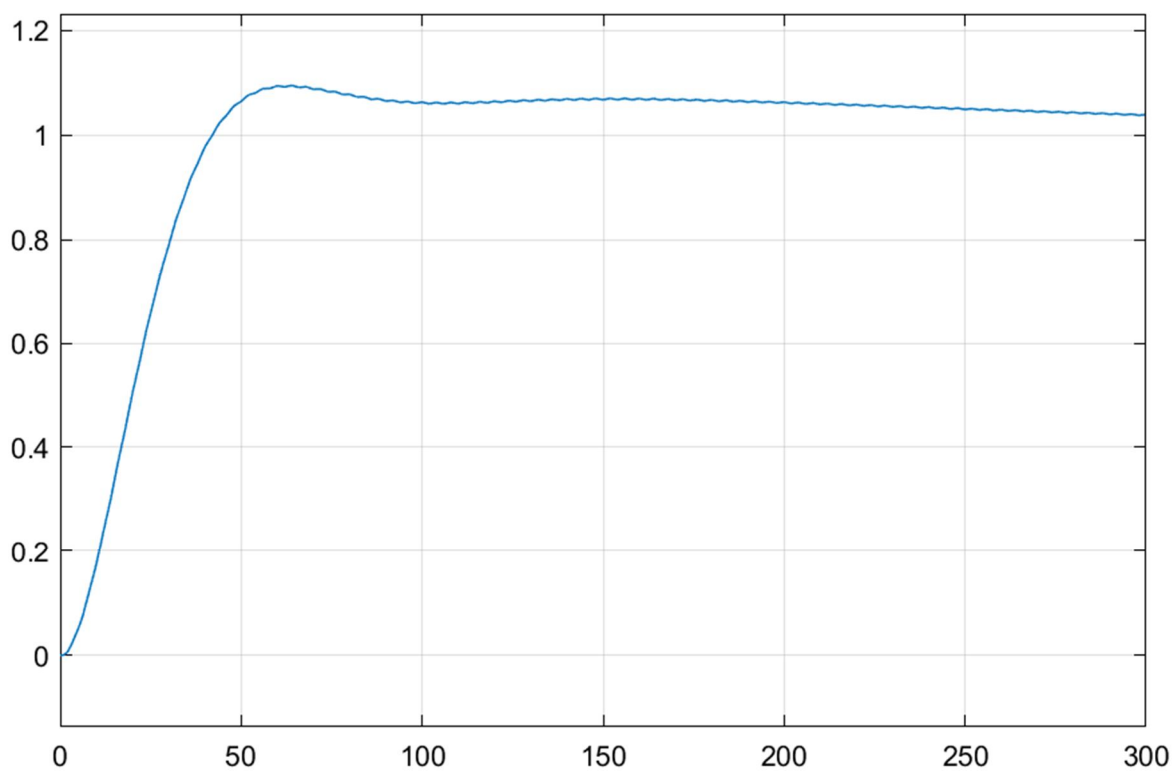
```
steady_state_error =
0.0040
```

شکل ۱- مشخصات گذرا و خطای حالت ماندگار سیستم کنترل شده

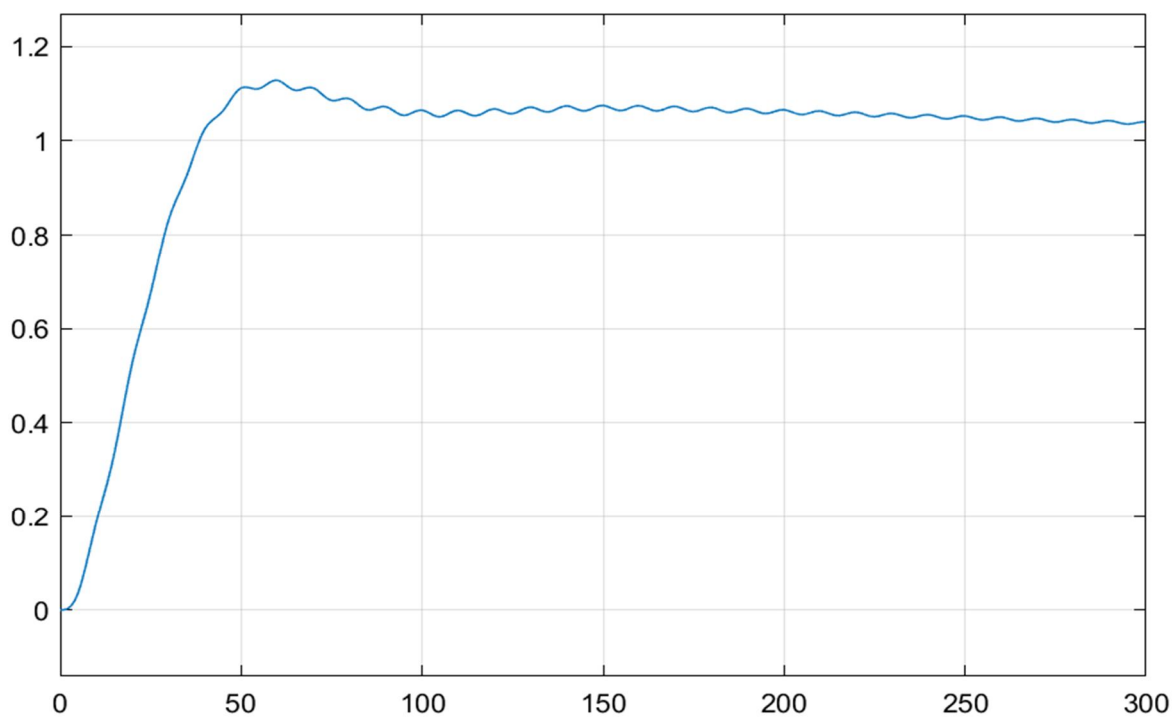
(۳)



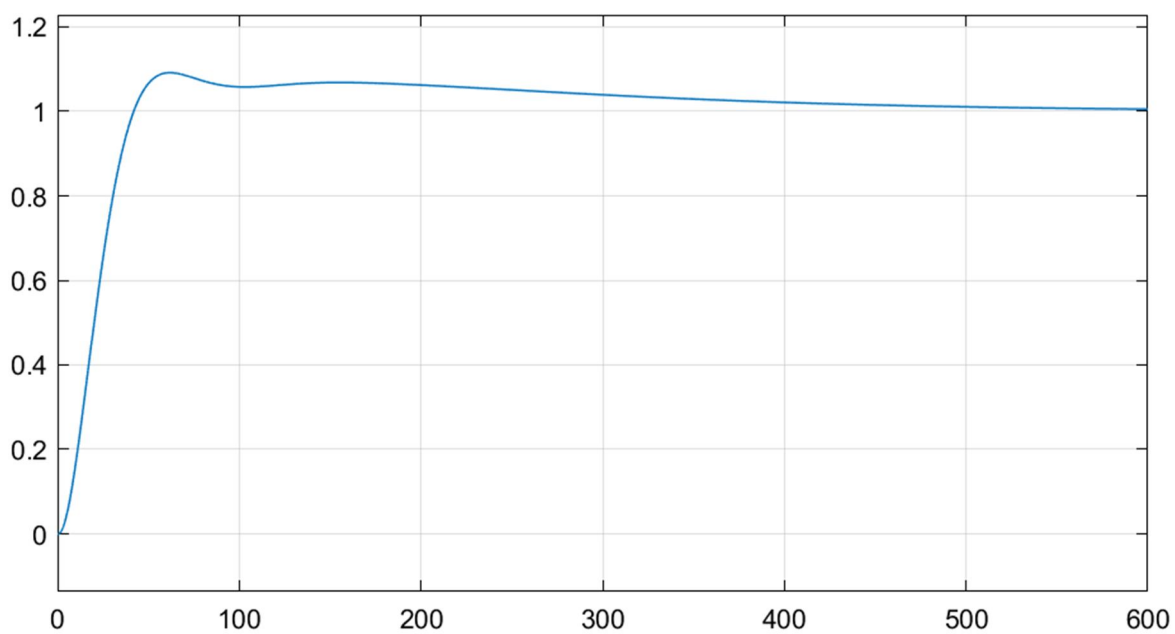
شکل ۲- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش دوخطی $T=1s$



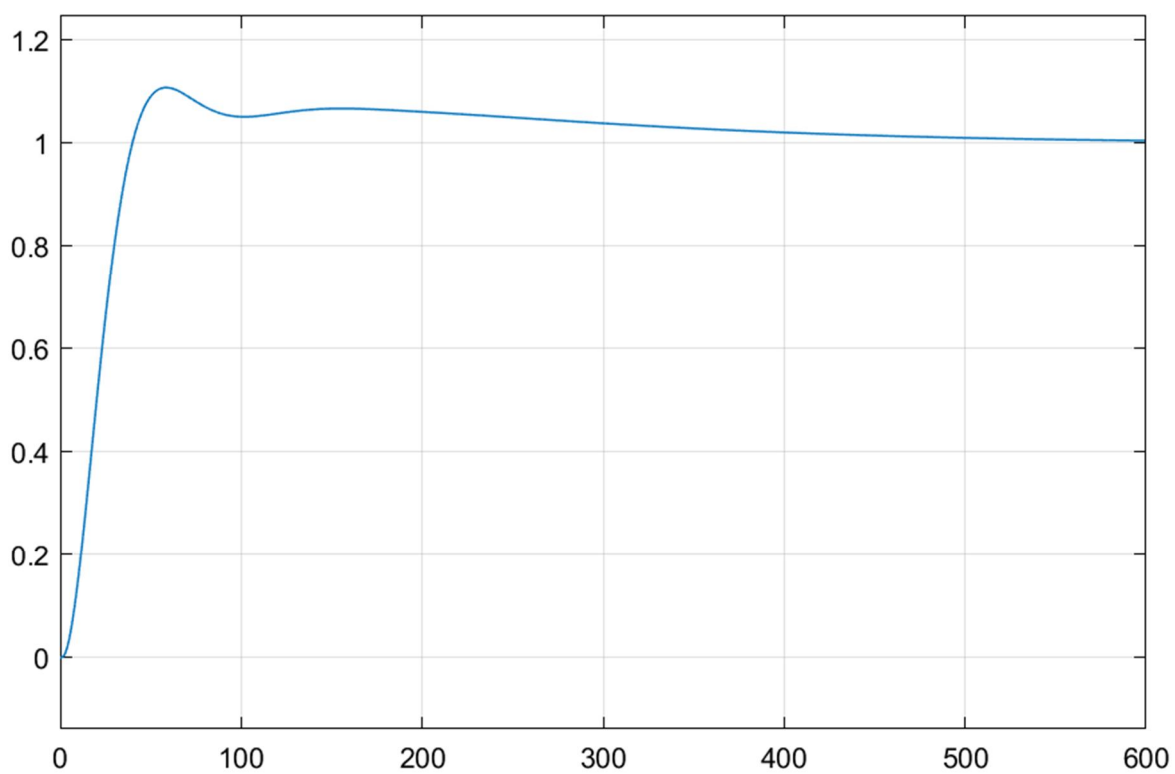
شکل ۳- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش دوخطی $T=2s$



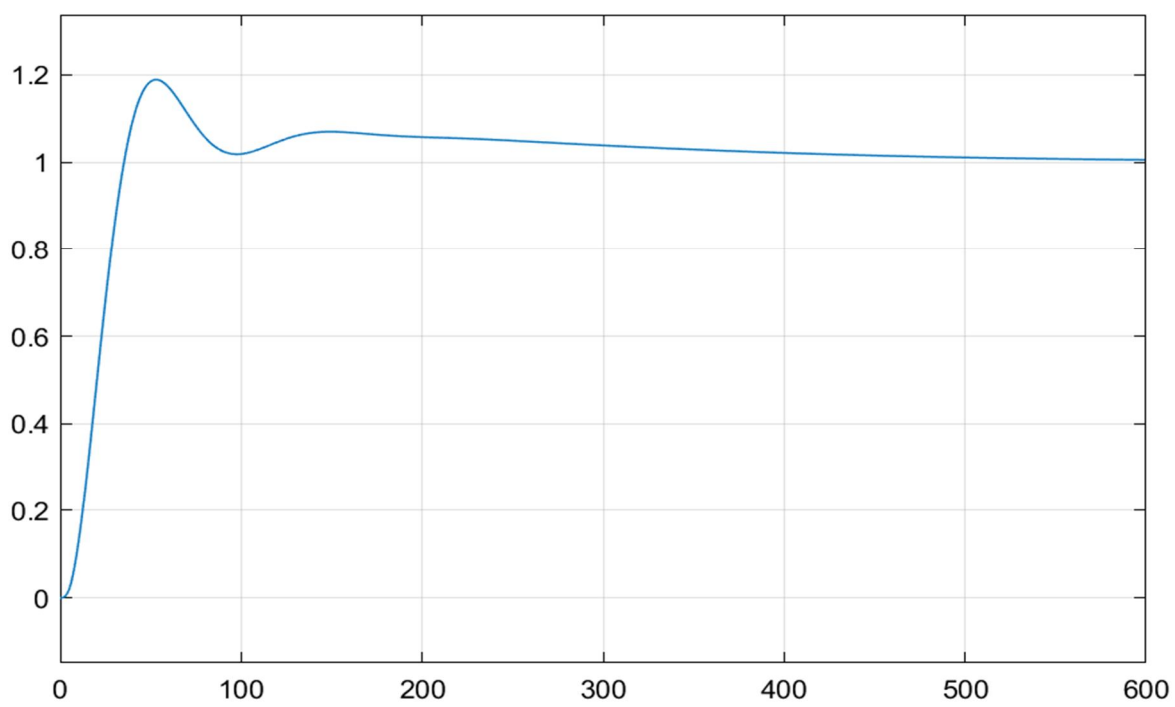
شکل ۴- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش دوخطی $T=5s$



شکل ۵- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش تطبیق یافته $T=1s$



شکل ۶- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش تطبیق یافته $T=2s$



شکل ۷- پاسخ پله سیستم کنترل شده به وسیله کنترل کننده گسسته سازی شده با روش تطبیق یافته $T=5s$

پاسخ سیستم گسسته سازی شده با دوره نمونه برداری $T=1s$ را مقایسه می‌کنیم زیرا بیشترین شباهت را به حالت پیوسته دارد.

```
RiseTime: 28.8769
TransientTime: 370.2557
SettlingTime: 370.2557
SettlingMin: 0.9191
SettlingMax: 1.0865
Overshoot: 8.0957
Undershoot: 0
Peak: 1.0865
PeakTime: 64
```

شکل ۸- مشخصات زمانی پاسخ به همراه کنترلر گسسته سازی شده به روش دوخطی

```
RiseTime: 27.8914
TransientTime: 372.1217
SettlingTime: 372.1217
SettlingMin: 0.9138
SettlingMax: 1.0910
Overshoot: 8.5628
Undershoot: 6.5461e-82
Peak: 1.0910
PeakTime: 62
```

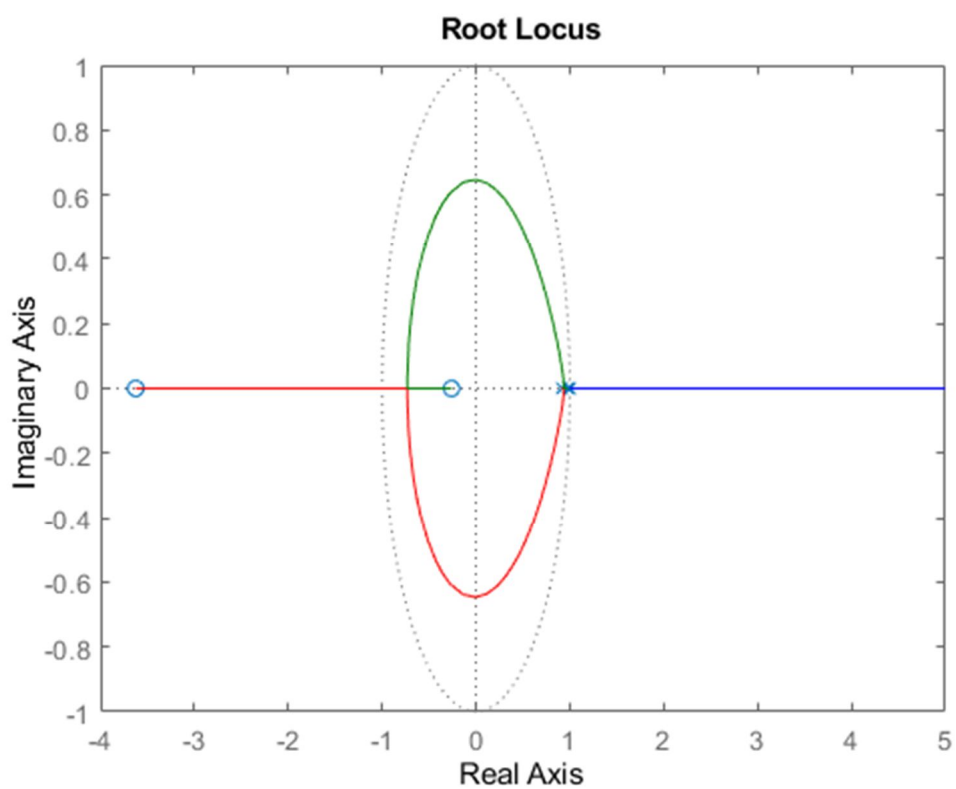
شکل ۹- مشخصات زمانی پاسخ به همراه کنترلر گسسته سازی شده به روش تطبیق یافته

همانطور که می‌بینیم مشخصات زمانی این سیستم به همراه کنترلر گسسته سازی شده با $T=1s$ تا حد زیادی شبیه به مشخصات زمانی سیستم گسسته است. همچنین گسسته سازی با روش دوخطی فراجاهش و زمان نشست کمتری نسبت به روش تطبیق یافته دارد.

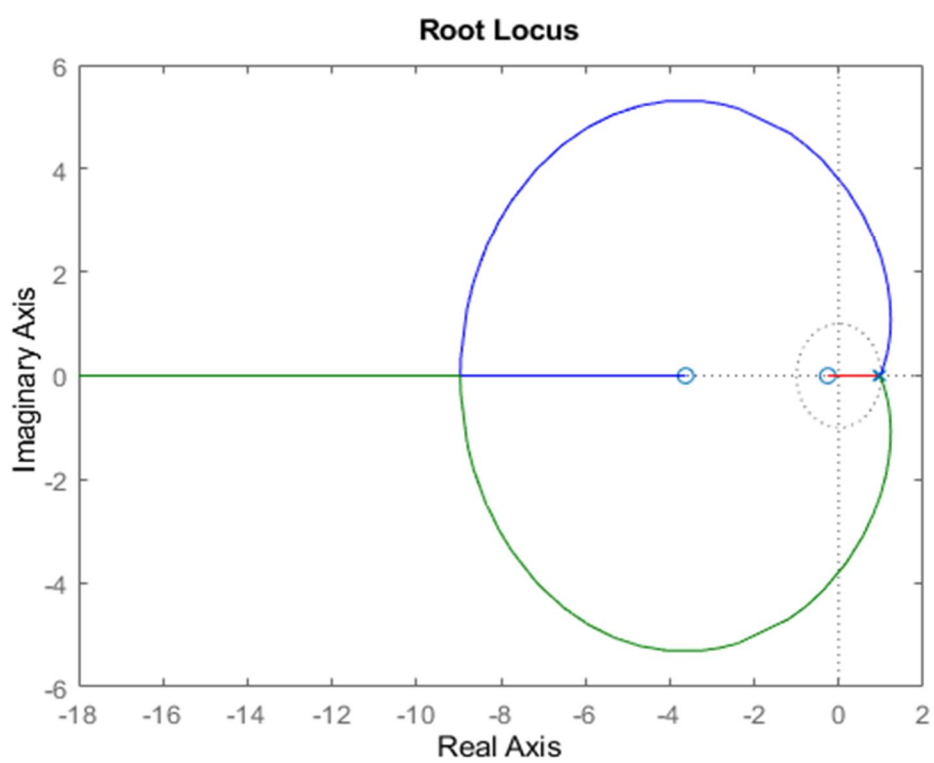
(۴)

تابع تبدیل گسسته سازی شده با $T=1s$ با روش دوخطی به صورت زیر می‌باشد.

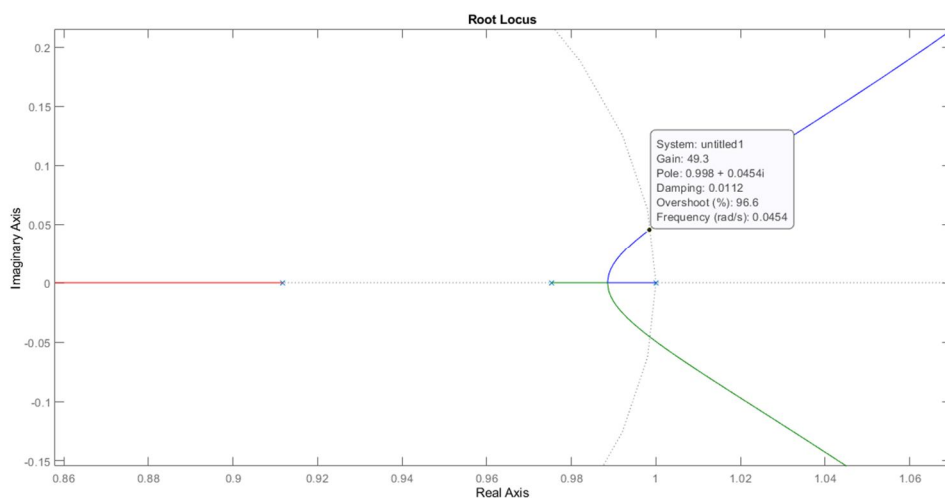
$$G_{disc} = \frac{-5.753e-07 z^3 - 1.726e-06 z^2 - 1.726e-06 z - 5.753e-07}{z^3 - 2.887 z^2 + 2.776 z - 0.8892}$$



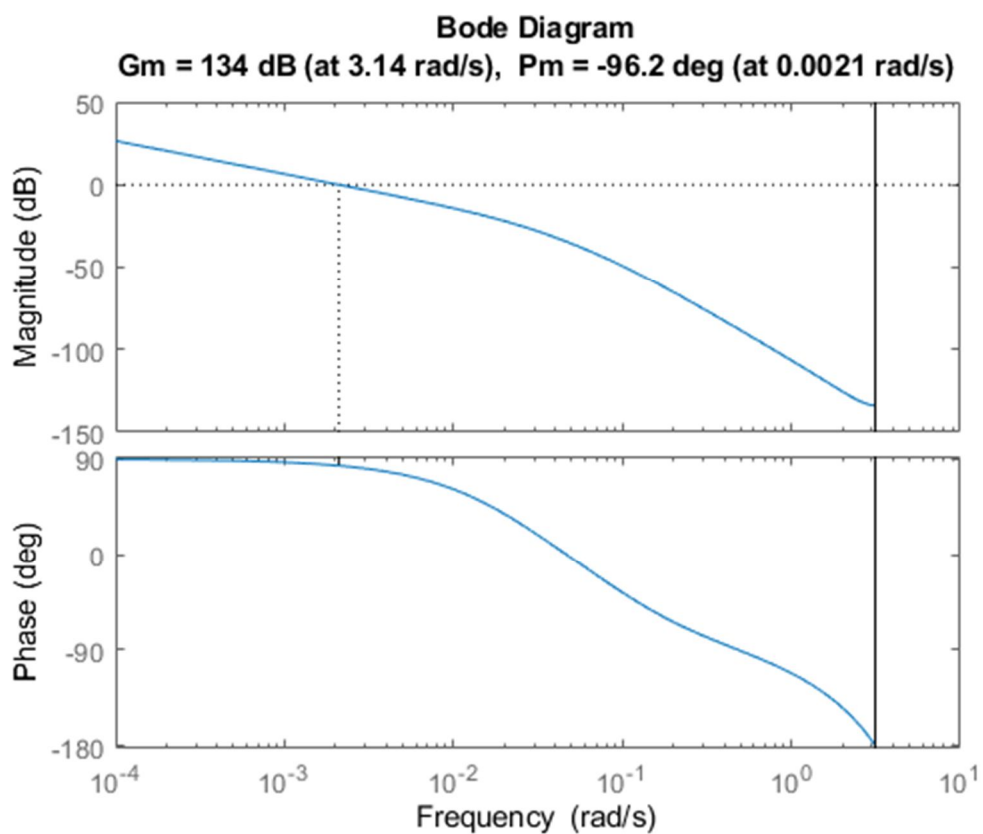
شکل ۱۰- مکان ریشه سیستم گسسته سازی شده به ازای گین های مثبت



شکل ۱۱- مکان ریشه سیستم گسسته سازی شده به ازای گین های منفی



شکل ۱۲- مکان ریشه سیستم گسسته سازی شده به ازای گین های منفی و گین مرزی برای پایداری



شکل ۱۳- نمودار بودی و حاشیه فاز و بهره سیستم حلقه باز

همانطور که در شکل ۱۲ می بینیم ریشه های سیستم به ازای بهره های منفی $-50 < K < 0$ درون دایره واحد قرار دارد و پایدار می باشد اما به ازای هیچ بهره بزرگتر از صفری سیستم پایدار نخواهد بود.

همانطور که در شکل ۱۳ می بینیم حاشیه فاز برابر ۹۶.۲- و حاشیه بهره ۱۳۴dB است، همچنین پهنای باند نیز بی نهایت می باشد.

(۵)

برای طراحی کنترلر، فراجش را ۱۰٪ و زمان نشست را برابر ۴۰۰ ثانیه در نظر می گیریم، داریم:

$$\zeta = \frac{|\ln 0.1|}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.1)^2}} = 0.5912$$

$$\frac{4}{\zeta \omega_n} = 400 \rightarrow \omega_n = 0.0169 \text{ rad/sec}$$

$$z_{1,2} = \exp(-\zeta \omega_n T \pm j \omega_n T \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0.9900 \pm j0.0135$$

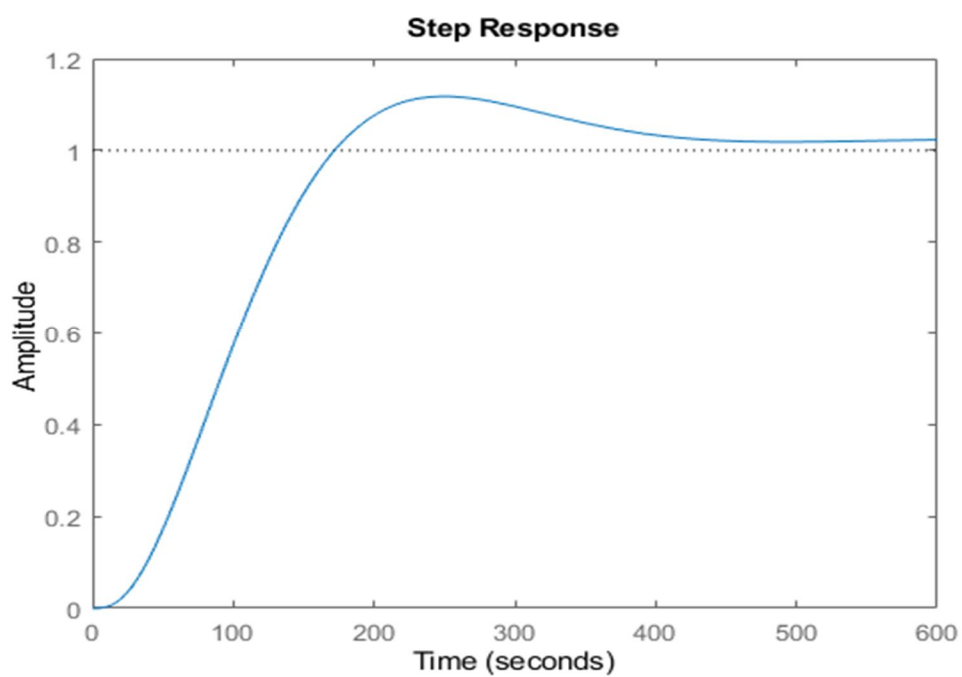
کنترلر مورد طراحی را به صورت PI در نظر می گیریم:

$$C = \frac{Kp(z - \frac{Kp - Ki}{Kp})}{z - 1}$$

حال زوایا را به قطب مطلوب حساب می کنیم

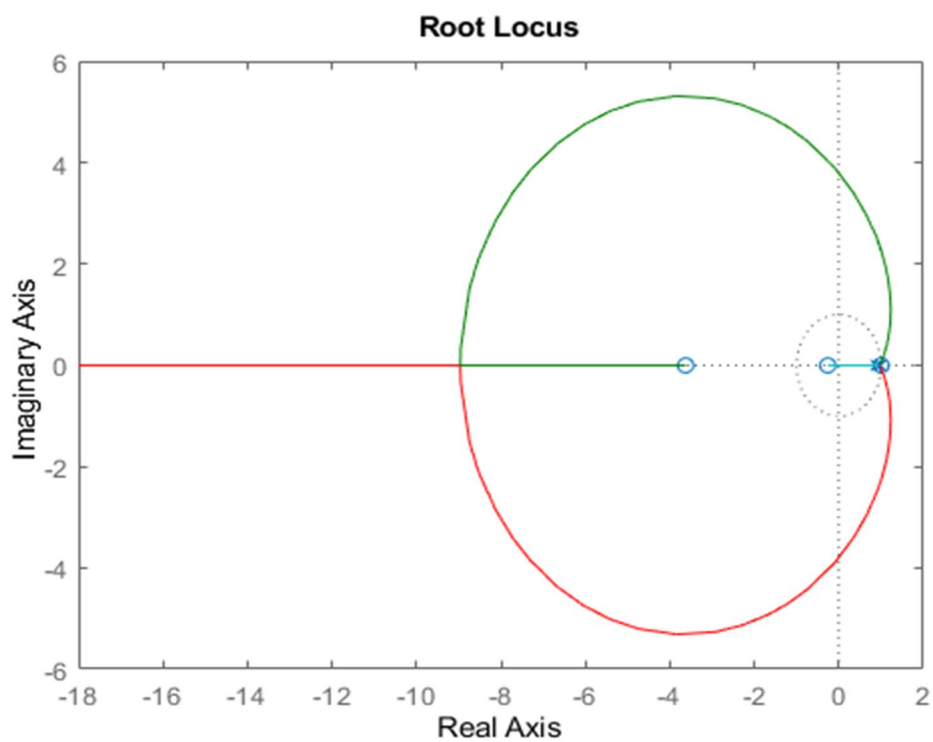
$$\begin{aligned} & \tan^{-1}\left(\frac{0.0135}{0.99 - 0.9753}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{0.0135}{0.99 - 0.9118}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{0.0135}{0.99 - 1}\right) \\ & - \tan^{-1}\left(\frac{0.0135}{0.99 + 3.6248}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{0.0135}{0.99 + 0.2602}\right) = -1.9^\circ \\ & \rightarrow \frac{Kp - Ki}{Kp} = 0.99 - \tan(1.9) \times 0.0135 = 0.9996 \end{aligned}$$

$$|K \times \frac{z - 0.9996}{z - 1} \times G|_{0.9900 \pm j0.0135} = 1 \rightarrow Kp = -5.69, Ki = -0.00109$$

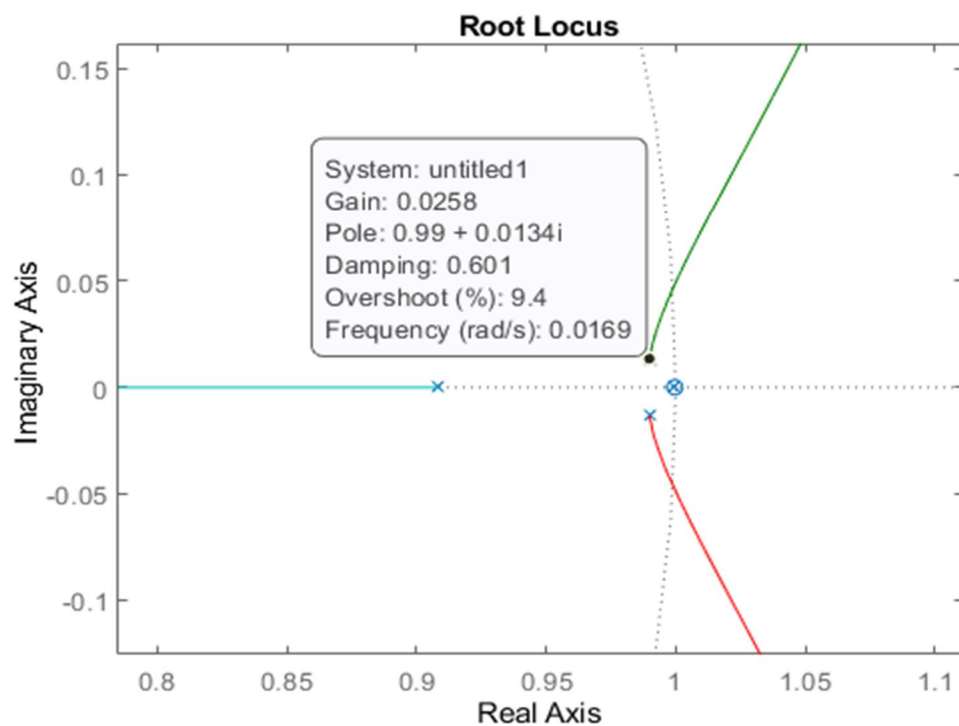


شکل ۱۴- پاسخ پله سیستم حلقه بسته به همراه کنترلر طراحی شده

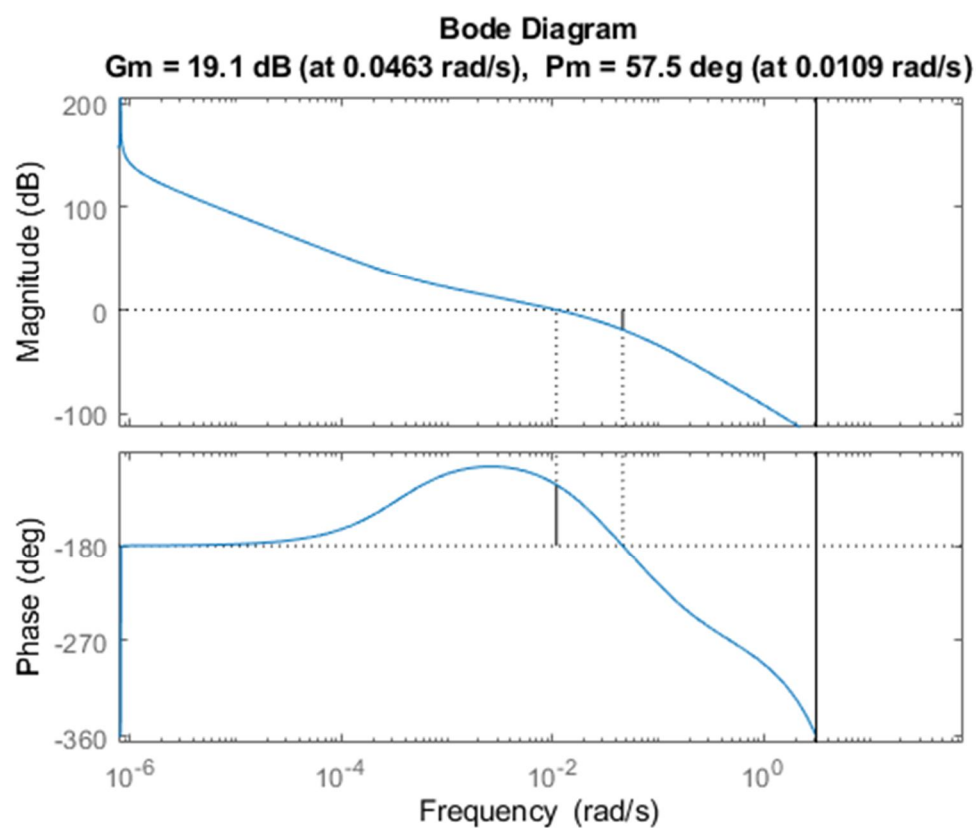
(۶)



شکل ۱۵- مکان ریشه سیستم گسسته سازی شده به همراه کنترلر طراحی شده



شکل ۱۶- قطب های مطلوب سیستم گسسته سازی شده به همراه کنترلر طراحی شده



شکل ۱۷- نمودار بودی و حاشیه فاز و بهره سیستم حلقه باز به همراه کنترلر طراحی شده

همانطور که در شکل ۱۶ می بینیم قطب های سیستم حلقه بسته در مکان دلخواه ما قرار گرفته اند و سیستم به ازای $0 < K < 9$ پایدار می باشد.

```
RiseTime: 110
TransientTime: 401.9700
SettlingTime: 401.9700
SettlingMin: 0.9034
SettlingMax: 1.1178
Overshoot: 11.7769
Undershoot: 0
Peak: 1.1178
PeakTime: 249
```

شکل ۱۸- مشخصات پاسخ پله سیستم کنترل شده

همانطور که می بینیم مقادیر زمان نشست و فراجهش به مقادیر دلخواهی که فرض کردیم نزدیک هستند.

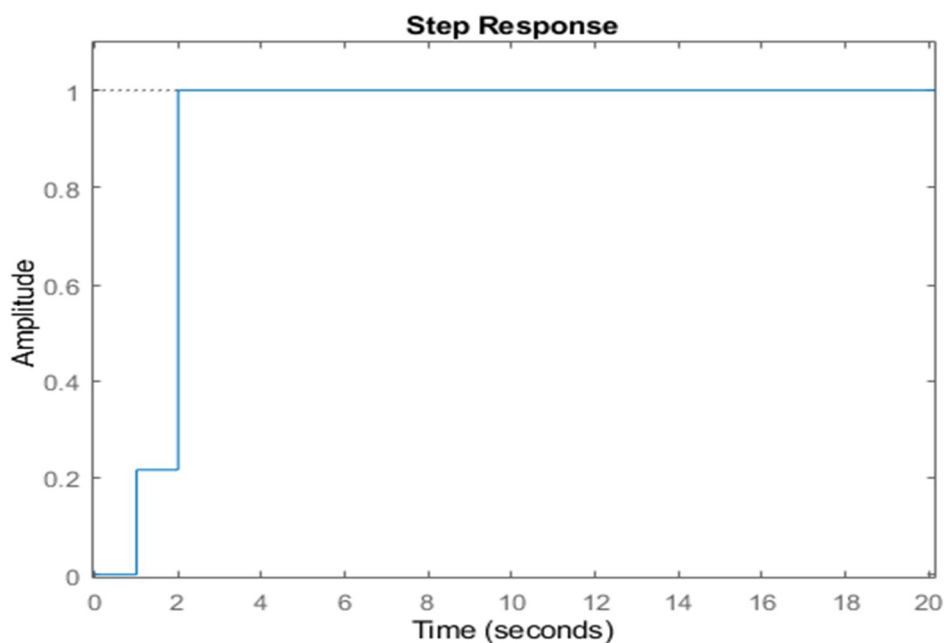
(۷)

$$F(z) = f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}$$

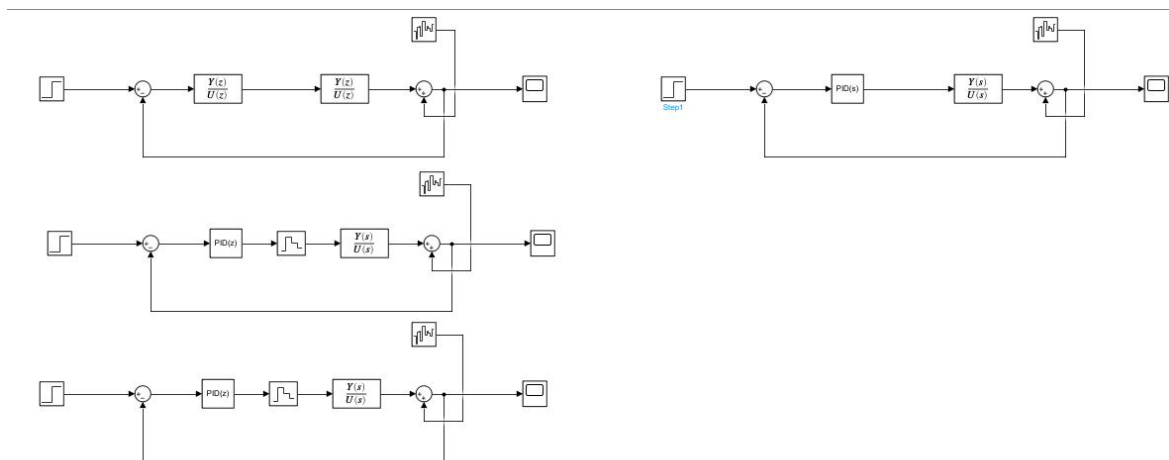
$$1 - F(z) = (1 - z^{-1})(1 + n_1 z^{-1}) \rightarrow \begin{cases} -f_1 = n_1 - 1 \\ -f_2 = -n_1 \end{cases}$$

$$F(z) = (1 + 3.6248 z^{-1})(m_1 z^{-1}) \rightarrow \begin{cases} f_1 = m_1 \\ f_2 = 3.6248 m_1 \end{cases}$$

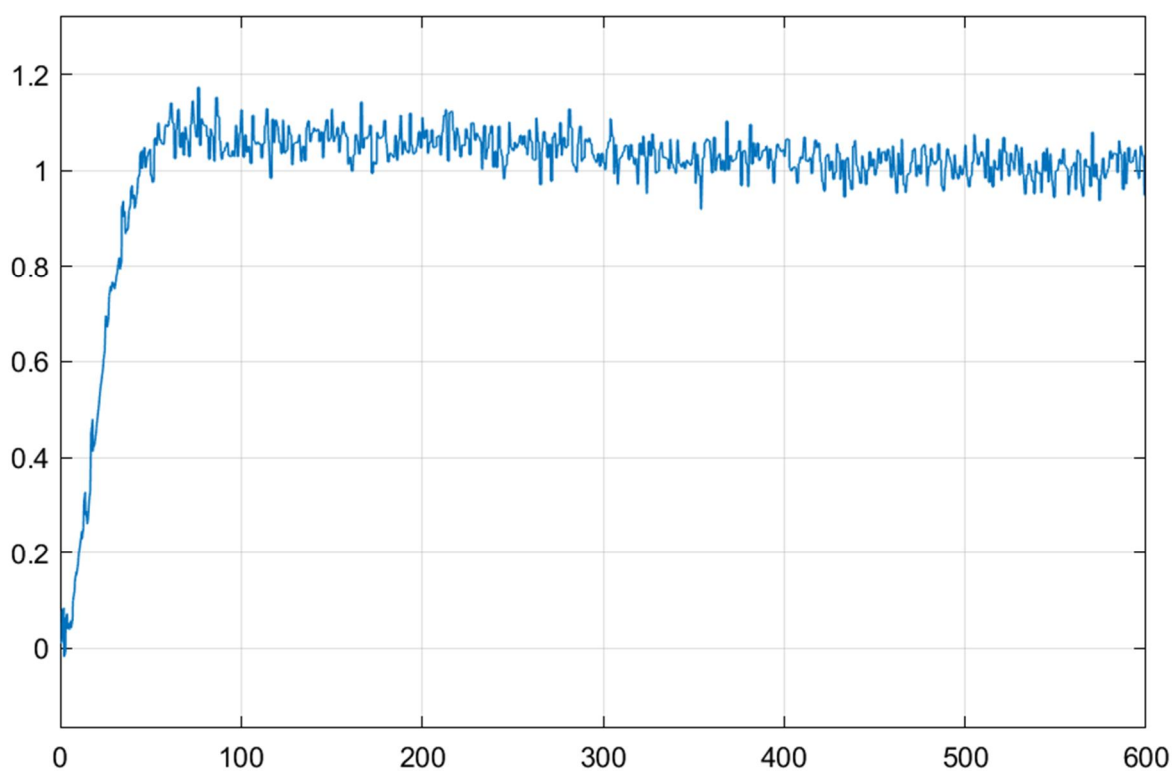
$$\rightarrow f_1 = 0.2162, f_2 = 0.7838$$



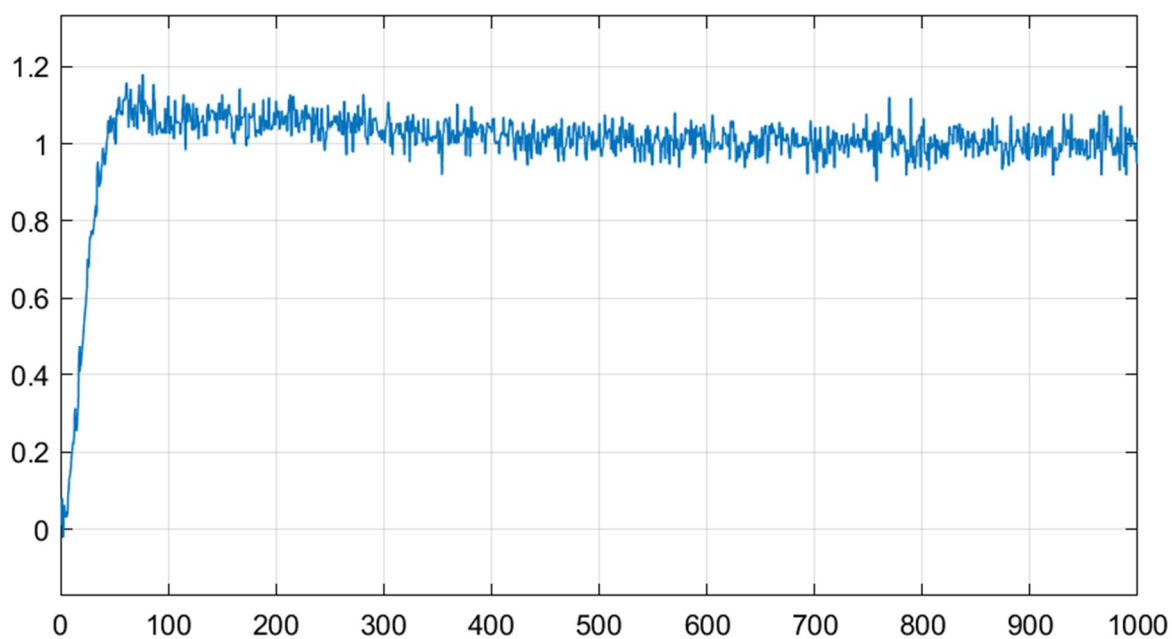
شکل ۱۹- پاسخ پله سیستم حلقه بسته به همراه کنترلر مرده نوش طراحی شده



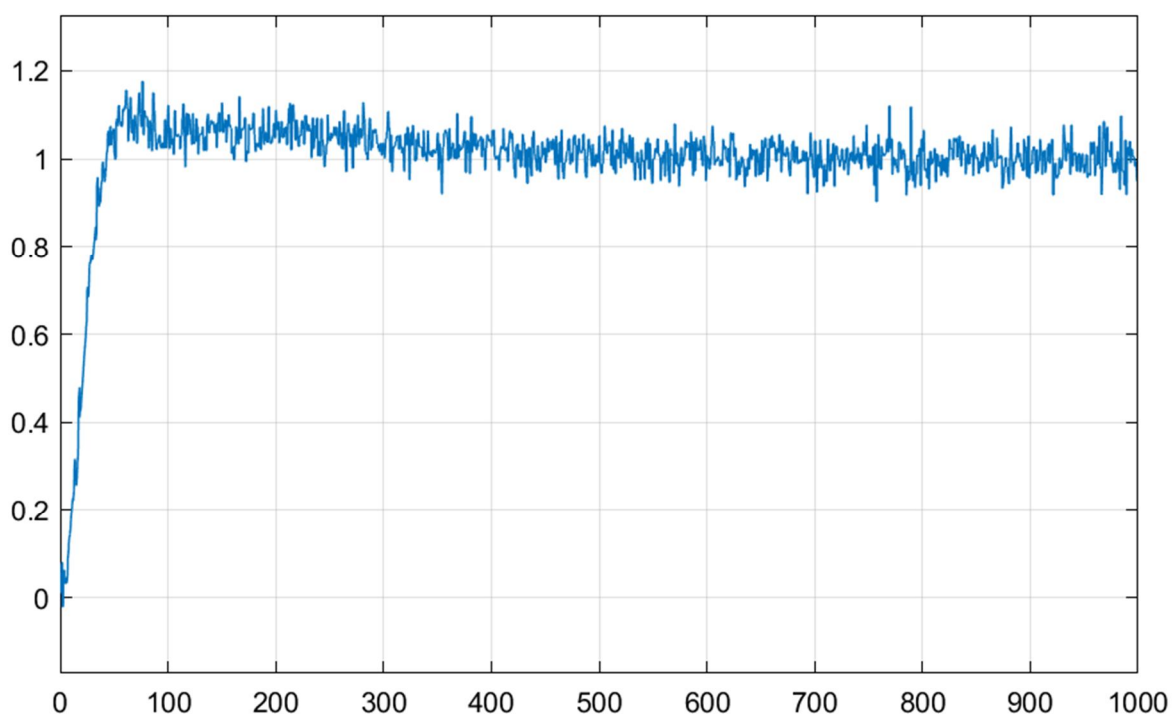
شکل ۲۰- دیاگرام سیستم های مورد تست



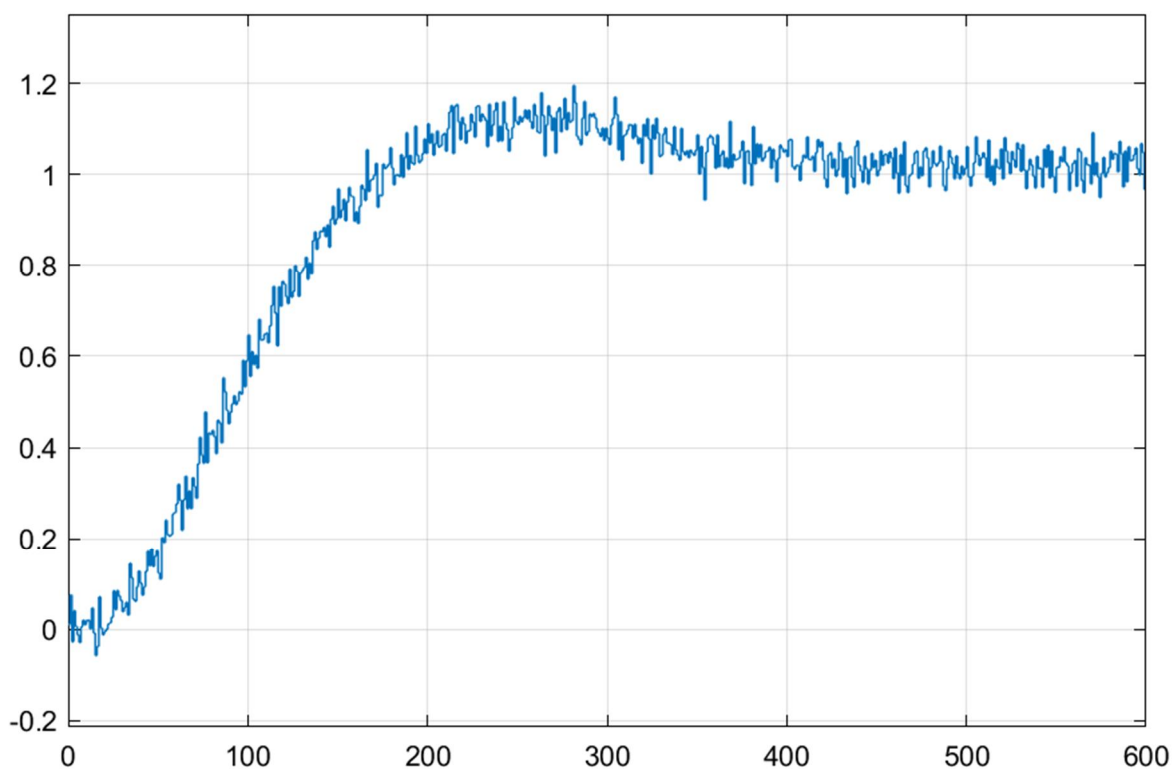
شکل ۲۱- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر آنالوگ



شکل ۲۲- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش دوخطی



شکل ۲۳- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش تطبیق یافته



شکل ۲۴- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته طراحی شده

مشاهده می‌شود که همه سیستم‌ها قابلیت مقابله با نویز سفید را دارند، به ازای T های بزرگتر و نویز های بزرگتر، پاسخ سیستم‌های با کنترلر گسسته سازی شده در پیوست آمده است.

(۹)

برای گسسته سازی معادلات حالت پیوسته از روابط زیر استفاده می‌کنیم

$$G = e^{AT}$$

$$H = \int_0^T e^{A\lambda} B d\lambda$$

```

G =

    1.0000    -4.4442    -0.0000
         0     0.9753     0.0000
         0         0     0.9118

>> H

H =

-7.891e-7
 5.21e-7
 0.0796

>> C

C =

    1     0     0

>> D

D =

    0

```

شکل ۲۵- ماتریس های حالت سیستم زمان گسسته به دست آمده با فرم کانونیکال کنترل پذیر

```

controllability =

-0.0000    -0.0000    -0.0000
 0.0000     0.0000     0.0000
 0.0796     0.0726     0.0662

observability =

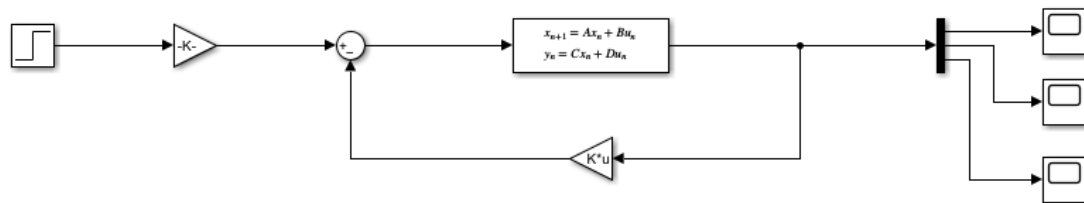
    1.0000         0         0
    1.0000    -4.4442    -0.0000
    1.0000    -8.7787    -0.0001

```

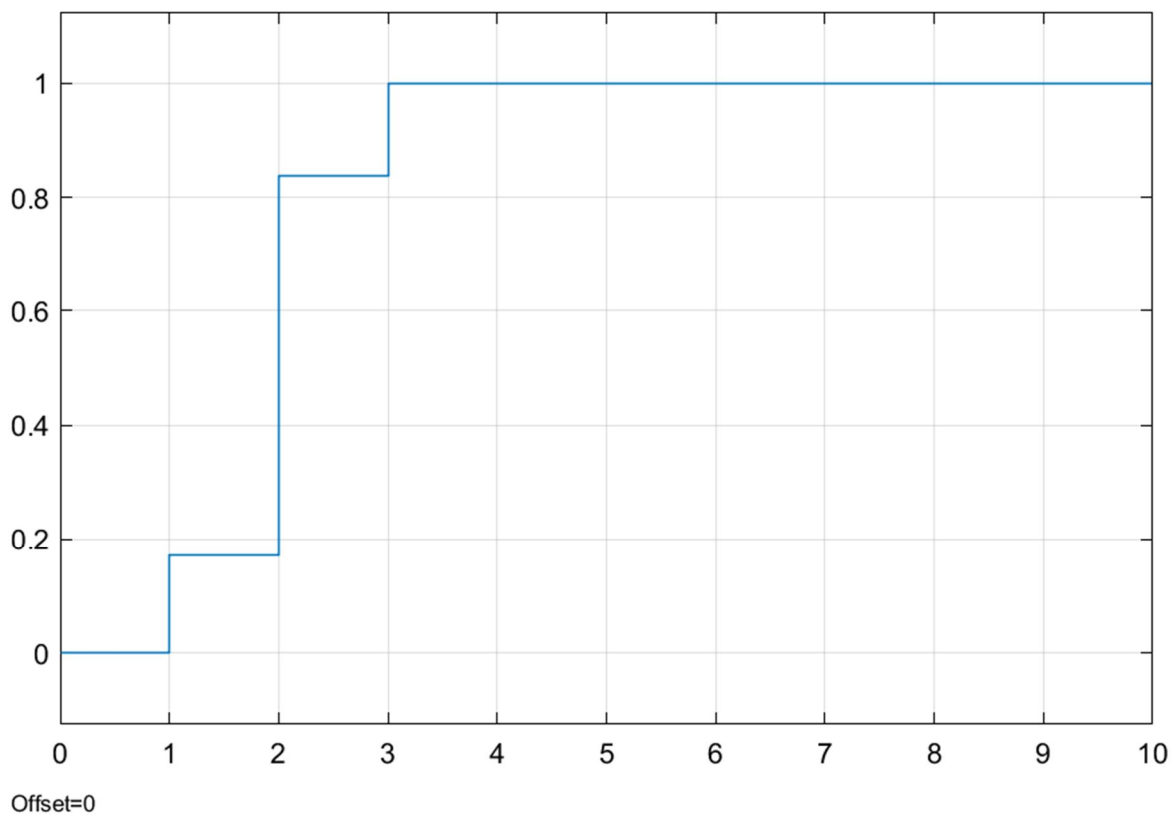
شکل ۲۶- ماتریس های کنترل پذیری و رویت پذیری

رتبه ماتریس های کنترل پذیری و رویت پذیری برابر ۳ می باشد بنابراین تحقق به دست آمده هم کنترل پذیر و هم رویت پذیر می باشد.

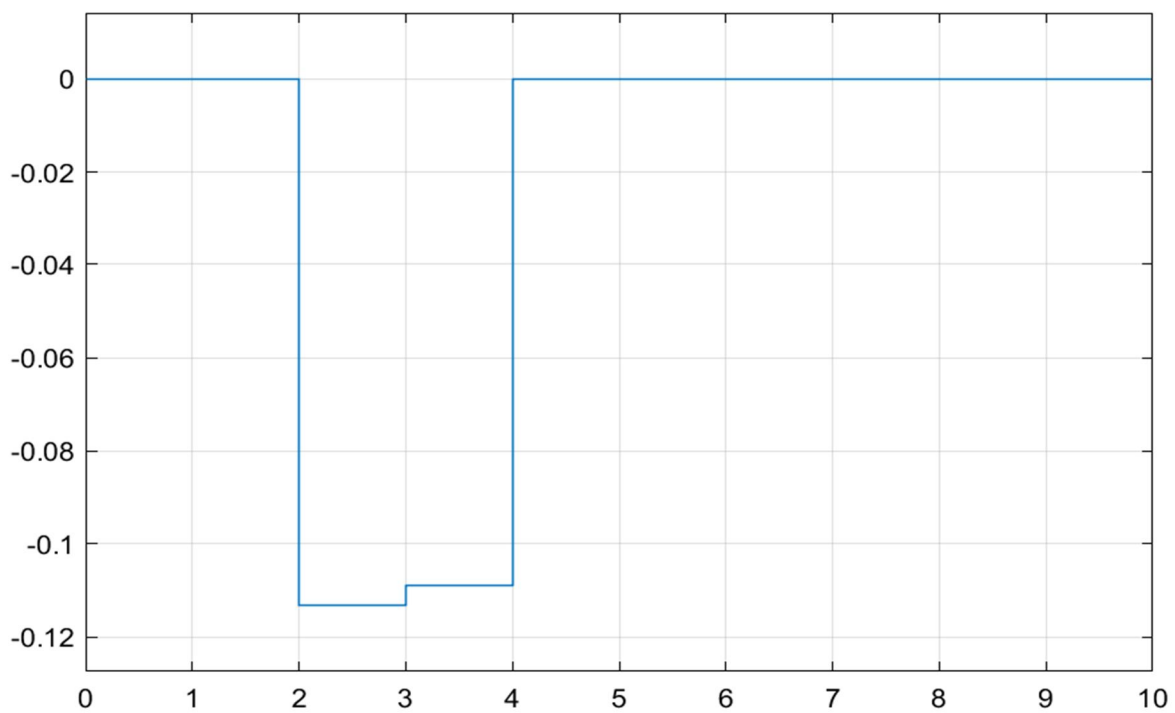
(۱۰)



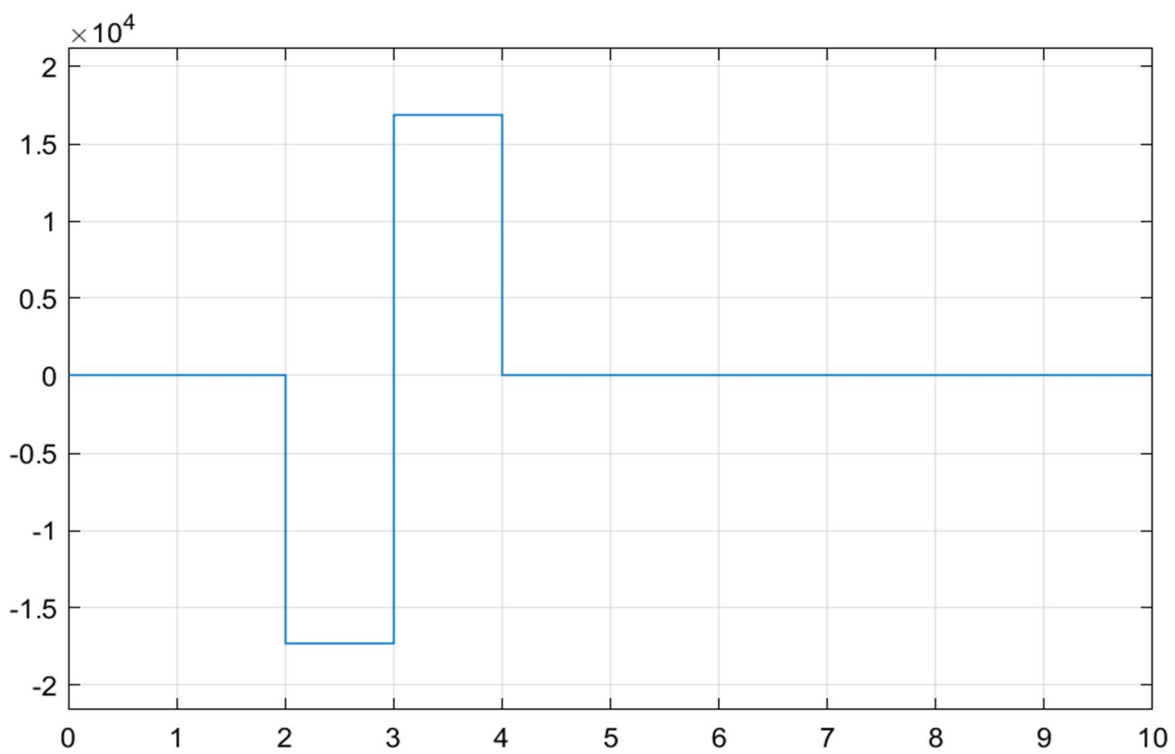
شکل ۲۷- دیاگرام به همراه کنترلر بهره مرده نوش



شکل ۲۸- پاسخ سیستم به همراه کنترلر بهره مرده نوش

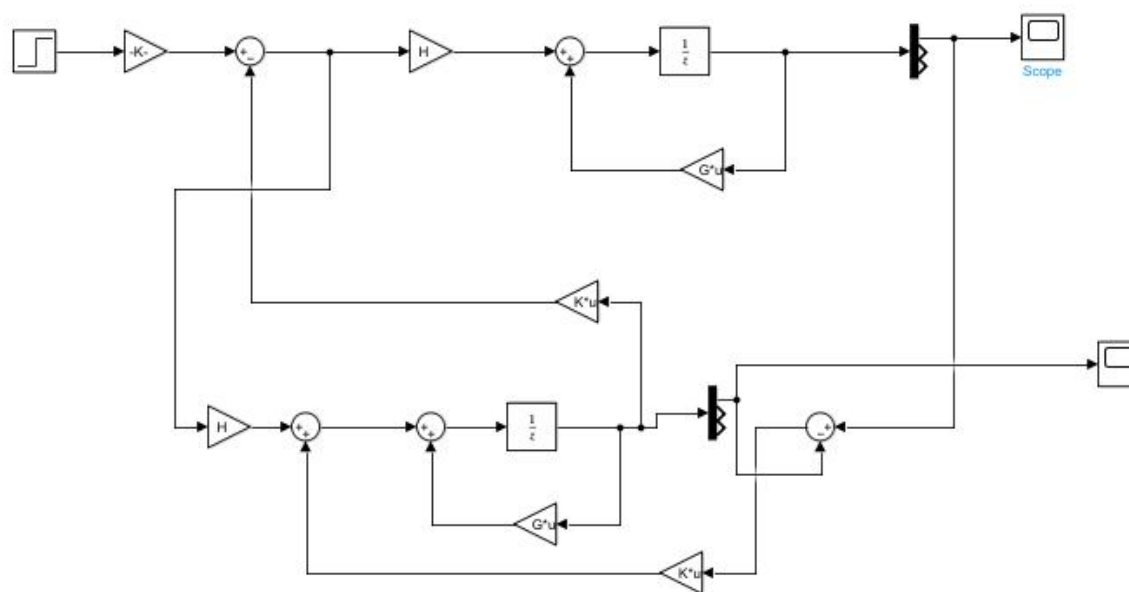


شکل ۲۹- خروجی حالت دوم سیستم با کنترلر مرده نوش

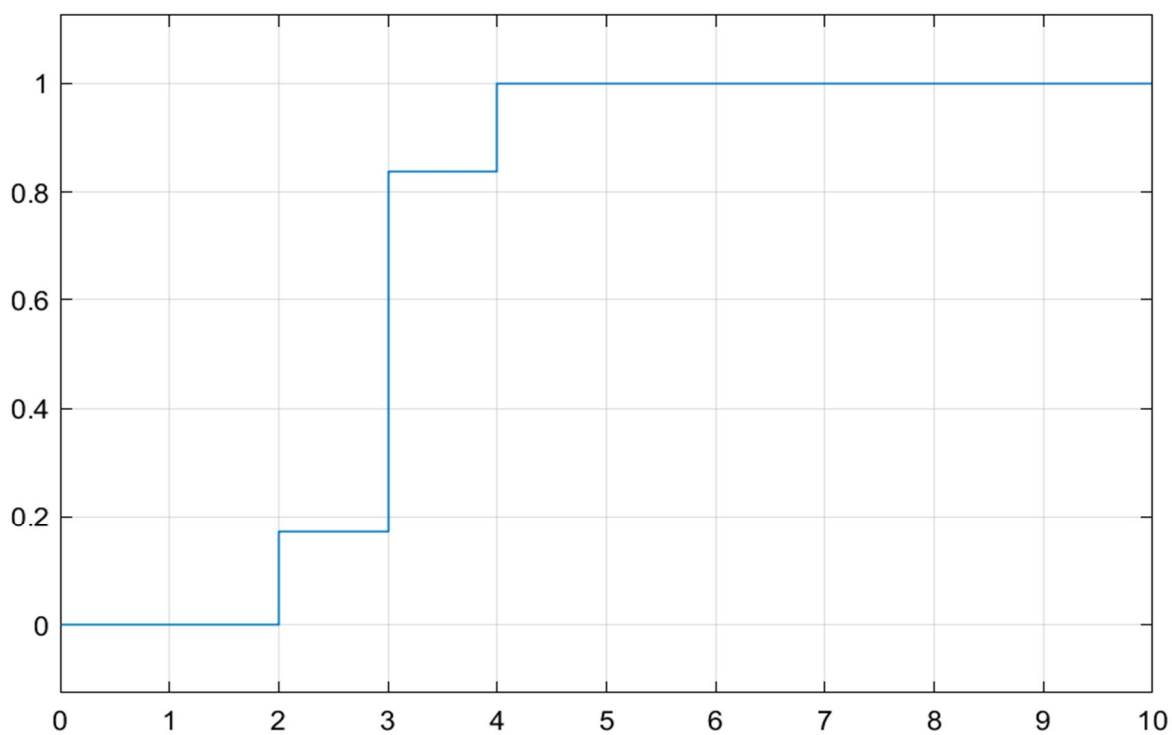


شکل ۳۰- خروجی حالت سوم سیستم با کنترلر مرده نوش

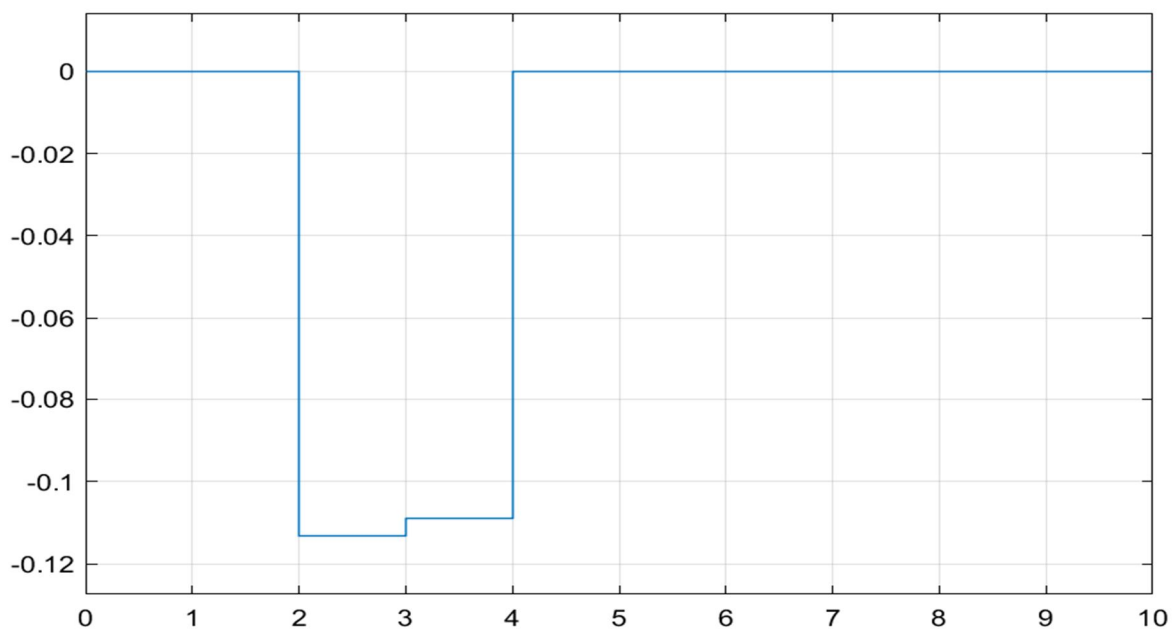
(۱۱)



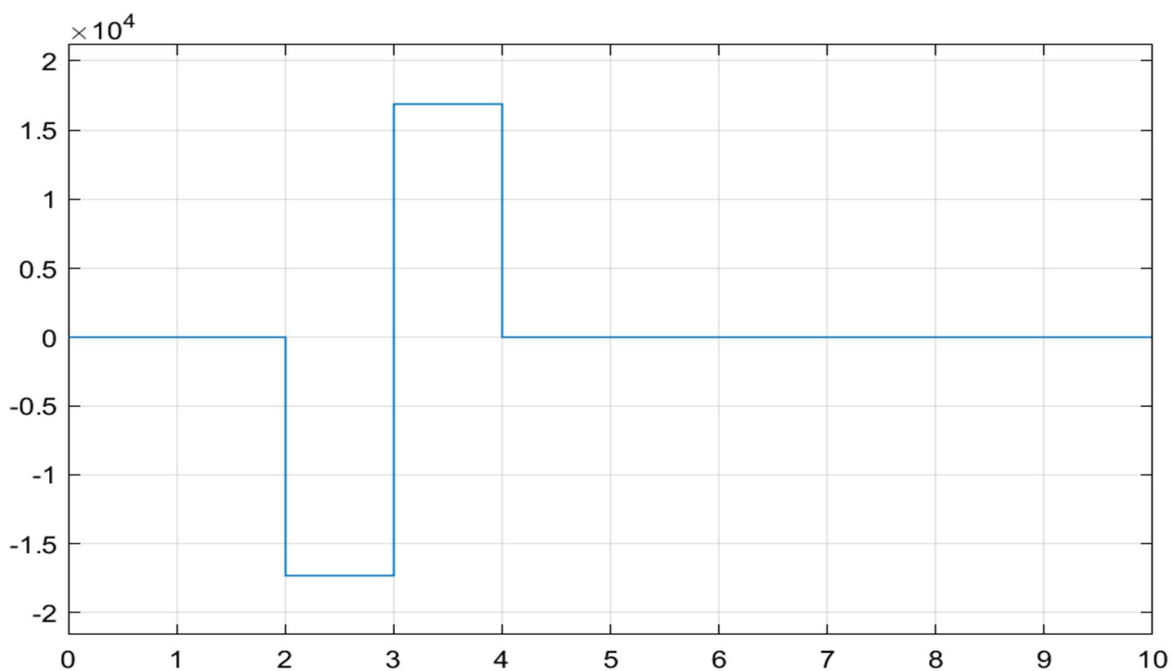
شکل ۳۱- خروجی حالت سوم سیستم با کنترلر مرده نوش



شکل ۳۲- خروجی حالت اول سیستم با کنترلر مرده نوش



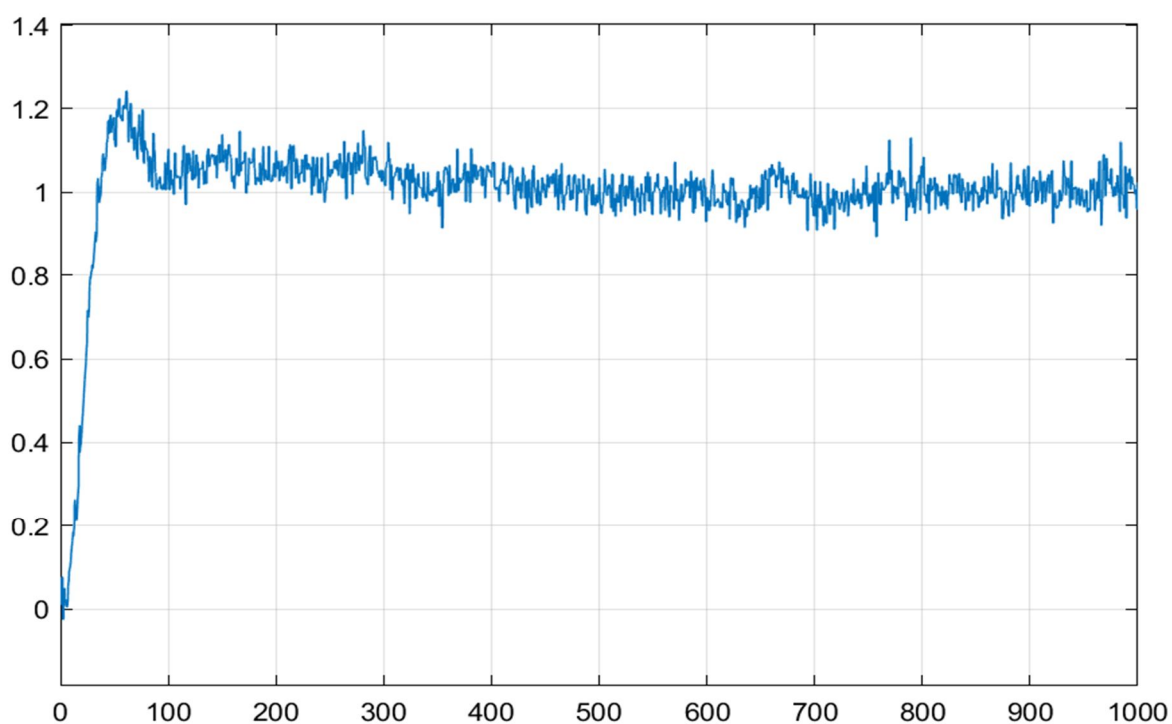
شکل ۳۳- خروجی حالت دوم سیستم با کنترلر مرده نوش



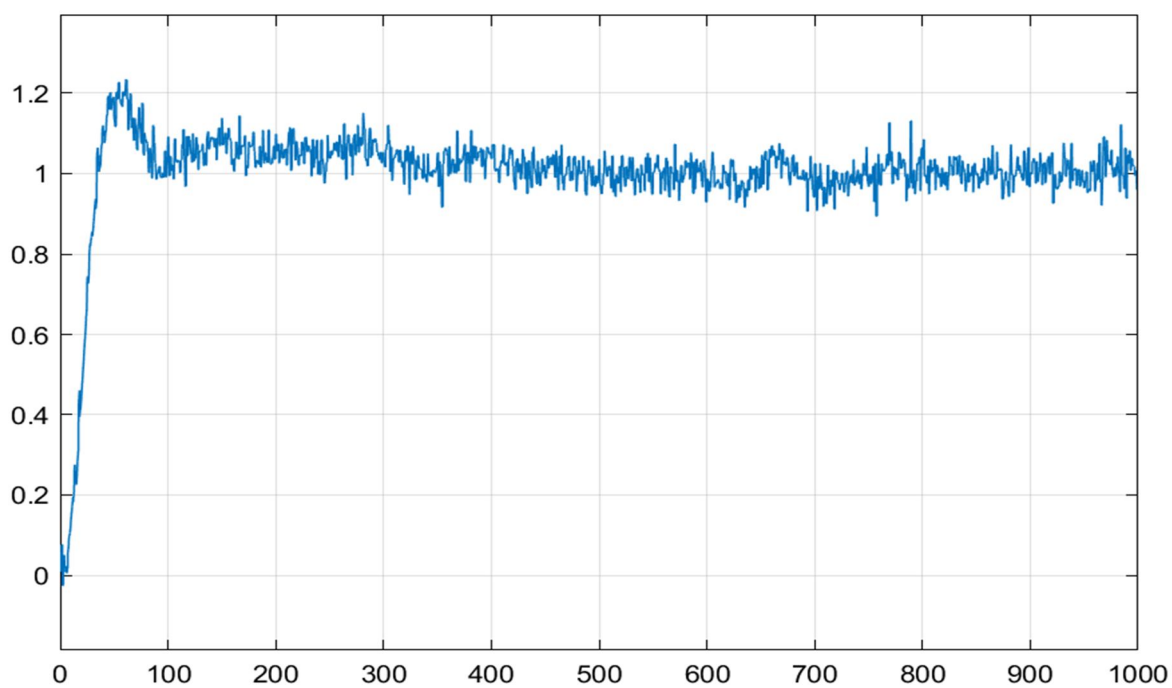
شکل ۳۴- خروجی حالت سوم سیستم با کنترلر مرده نوش

همانطور که می‌بینیم با در اختیار داشتن خروجی سیستم (حالت اول) بقیه حالت‌ها به کمک روی‌تگر به دست می‌آیند و سیستم به کمک همان بهره فیدبک طراحی شده در قسمت قبل به خوبی کنترل می‌شود.

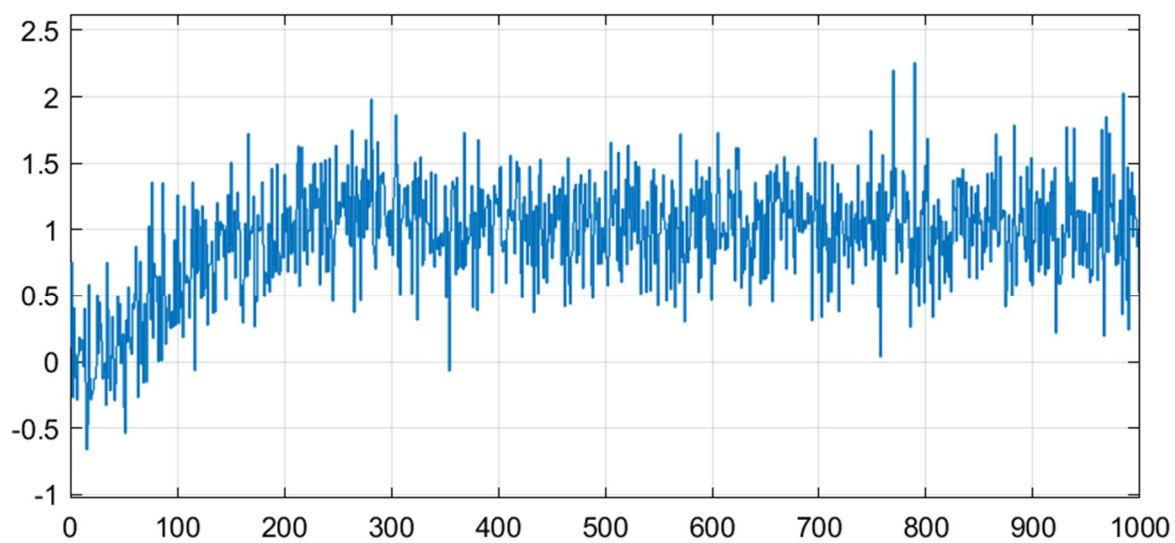
پیوست:



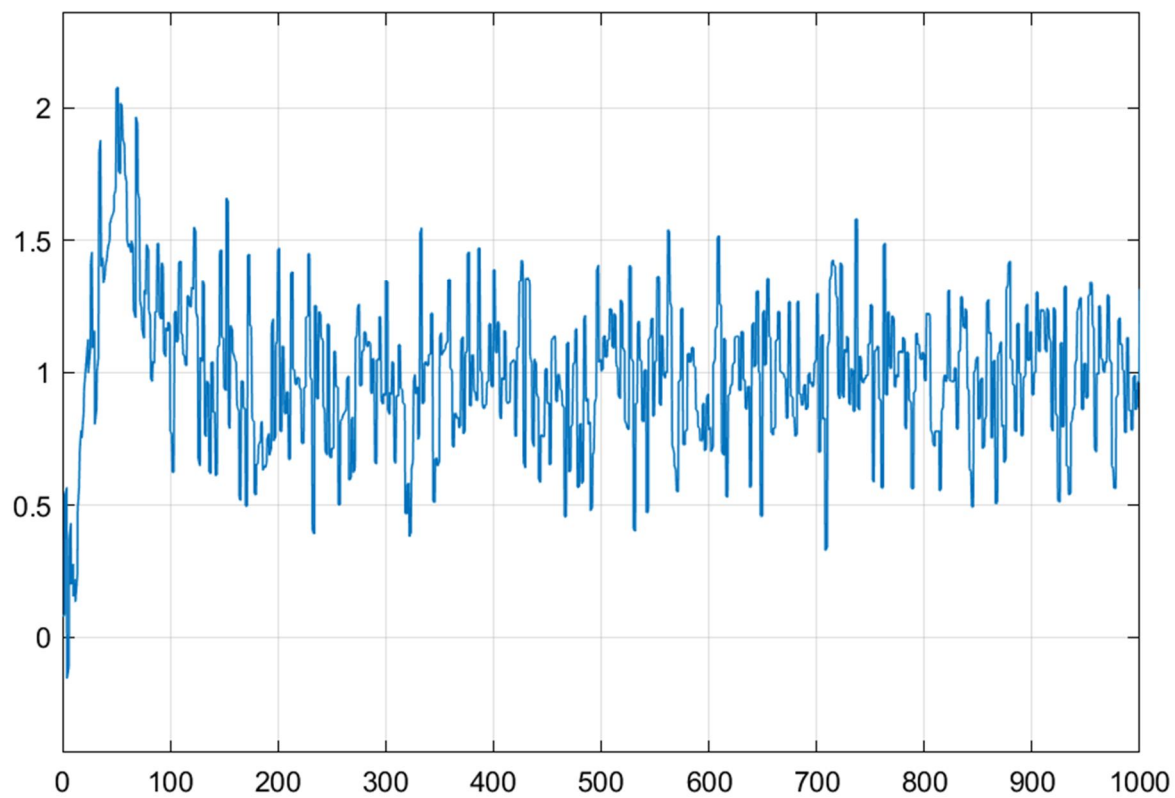
شکل ۳۵- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش دوخطی با $T=5$



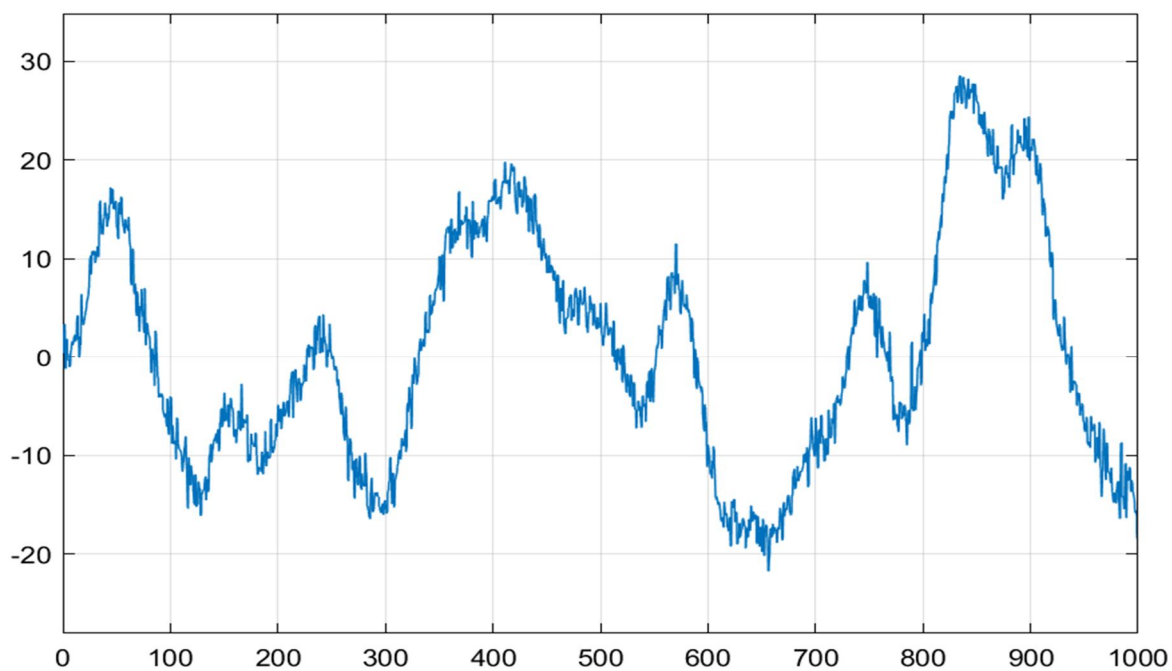
شکل ۳۶- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش تطبیق یافته با $T=5$



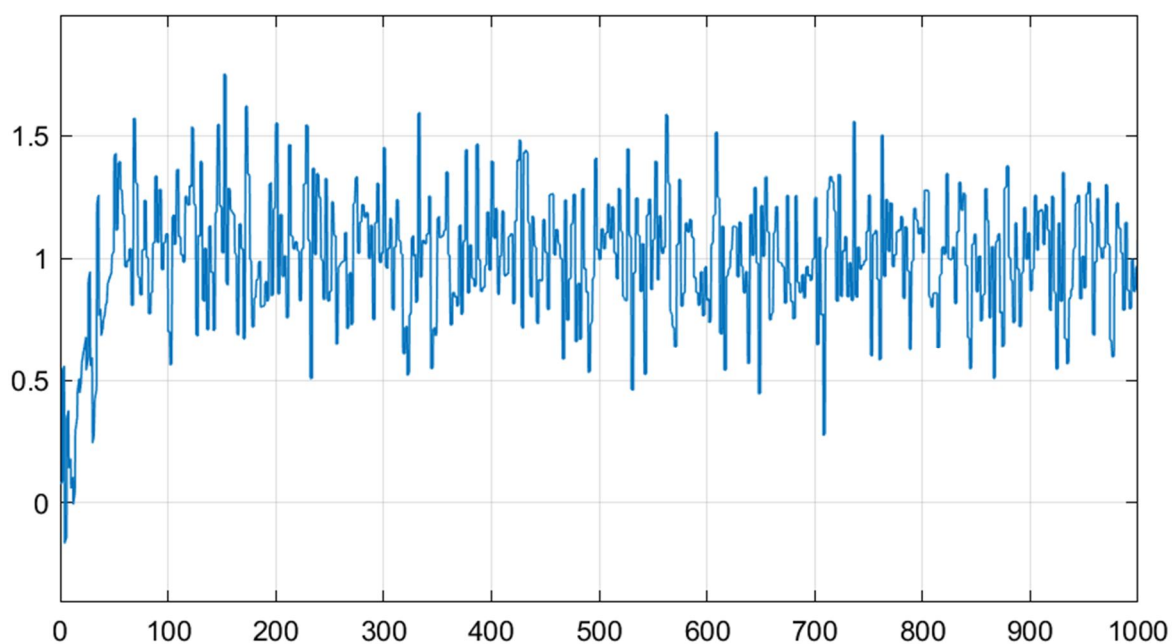
شکل ۳۷- پاسخ پله سیستم گسسته شده با کنترلر گسسته



شکل ۳۸- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش دوخطی



شکل ۳۹- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر گسسته شده به روش تطبیق یافته



شکل ۴۰- پاسخ پله سیستم آنالوگ با کنترلر آنالوگ

می‌بینیم که با افزایش توان نویز سیستم اصلی و سیستم کاملاً گسسته و سیستم همراه کنترلر گسسته شده به روش دوخطی توانایی مقابله با نویز را دارند اما سیستم به همراه کنترلر گسسته شده به روش تطبیق یافته توانایی مقابله با نویز را ندارد و پاسخ آن دقیق نیست.